



PRÊMIO  
JOVEM  
CIENTISTA

ÁGUA  
DESAFIOS DA SOCIEDADE

{ LIVRO DE  
PESQUISAS }

PRÊMIO  
JOVEM  
CIENTISTA

**ÁGUA**  
DESAFIOS DA SOCIEDADE

{ LIVRO DE  
PESQUISAS }



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**

## Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

### Presidente

Glaucius Oliva

### Diretores

Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Liane Hentschke

Ernesto Costa de Paula

Raquel de Andrade Lima Coelho (interina)

### Serviço de Prêmios

Rita de Cássia da Silva

## Gerdau

### Diretor-Presidente (CEO)

André B. Gerdau Johannpeter

### Presidente do Instituto Gerdau

Klaus Gerdau Johannpeter

### Vice-Presidente do Instituto Gerdau

Beatriz Gerdau Johannpeter

### Diretor do Instituto Gerdau

José Paulo Soares Martins

## GE

### Presidente e CEO da GE América Latina

Reinaldo Garcia

### Líder do Centro de Pesquisas Global da GE no Brasil

Kenneth Herd

### Diretor de Marketing da GE América Latina

Marcos Leal

### Gerente de Relações Públicas da GE Brasil

Ieda Passos

### Líder de Marca e Publicidade da GE América Latina

Graziella Ferrari

## Fundação Roberto Marinho

### Presidente

José Roberto Marinho

### Secretário-Geral

Hugo Barreto

### Superintendente Executivo

Nelson Savioli

### Gerente de Desenvolvimento Institucional

Flávia Constant

### Gerente de Meio Ambiente

Andrea Margit

### Coordenador de Projetos

Felipe Fernandes



**{ LIVRO DE  
PESQUISAS }**

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>~ 4</b>
<b>CATEGORIA MESTRE E DOUTOR</b>	<b>~ 7</b>
<b>CATEGORIA ENSINO SUPERIOR</b>	<b>~ 123</b>
<b>CATEGORIA ENSINO MÉDIO</b>	<b>~ 203</b>
<b>COMISSÕES JULGADORAS</b>	<b>~ 246</b>
<b>PARCEIROS</b>	<b>~ 248</b>



# INTRODUÇÃO

Água: um direito humano fundamental e um bem comum

Cotidiana e vital, a água é objeto de pesquisas desde a invenção da Ciência.

E, mesmo assim, ainda há muito a ser pesquisado para garantir sua distribuição universal, em quantidade suficiente para cada ser vivo e com qualidade para assegurar saúde e bem-estar a todos, sem deixar de atender às demandas igualmente importantes de produção de energia, irrigação, dessedentação de animais e produção industrial.

Tal necessidade de renovação e inovação levou a Organização das Nações Unidas (ONU) a se dedicar ao tema mais uma vez e declarar 2013 o Ano Internacional da Cooperação pela Água, com uma programação voltada para a atenção aos problemas básicos e urgentes relacionados aos diversos usos dos recursos hídricos.

No Brasil, o Prêmio Jovem Cientista fez o seu chamado e destacou “Água: Desafios da Sociedade” como o tema de sua XXVII edição, em 2013. A pronta resposta dos jovens pesquisadores levou à marca inédita de 3.226 trabalhos inscritos! Foram apresentados e avaliados 2.541 projetos de estudantes do Ensino Médio; outros 301 de estudantes do Ensino Superior e mais 384 de Mestres e Doutores.

O Prêmio Jovem Cientista agracia os três melhores trabalhos de cada uma das categorias acima, juntamente com os professores que atuam como orientadores dos estudantes e jovens pesquisadores. São ainda premiadas por Mérito Institucional as duas instituições – uma universidade e uma escola de ensino médio – com maior número de inscrições de projetos. E é reconhecido por seu Mérito Científico um pesquisador ou uma pesquisadora com título de doutor, com ampla experiência e capacidade de formação de pesquisadores e relevante produção científica no tema da edição.

O Prêmio Jovem Cientista renova, assim, a cada ano, seus objetivos principais: revelar aptidões, despertar o interesse pela pesquisa científica e reconhecer o valor dos esforços de cientistas em formação, em sua busca por soluções para os problemas de suas comunidades, de suas cidades e do nosso país.

Desde 1981, a iniciativa estimula a transformação de boas ideias em pesquisas capazes de superar os desafios brasileiros, por meio de uma parceria entre o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação Roberto Marinho e empresas dispostas a investir em novos talentos, como a Gerdau, engajada desde 1988, e a GE (2011-2013).

Os prêmios são entregues pela presidente da República, em Brasília, e a cerimônia de premiação reúne autoridades governamentais nas áreas de Ciência e Tecnologia, além de representantes respeitados da Academia. Os vencedores recebem bolsas do CNPq e assim podem dar continuidade às suas pesquisas, em prol do desenvolvimento do Brasil.





**CATEGORIA  
MESTRE E DOUTOR**

**1º Lugar**

**GUSTAVO MEIRELLES LIMA**

**Universidade Federal de Itajubá - Unifei (MG)**

Microgeração em sistemas de abastecimento de água

**2º Lugar**

**CLAUDIA CAROLINA SILVA EVANGELISTA**

**Universidade de São Paulo - USP (SP)**

Reduzindo drasticamente nossa dependência de água na agricultura por meio da anidrobiose

**3º Lugar**

**RODRIGO CAUDURO DIAS DE PAIVA**

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (RS)**

Hidrologia da Bacia Amazônica: compreensão e previsão com base em modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto

1º  
LUGAR

CATEGORIA  
MESTRE E DOUTOR



Gustavo Meirelles Lima, 26 anos

Universidade Federal de Itajubá (Unifei)  
Itajubá - MG

## MICROGERAÇÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

### RESUMO

O uso racional de energia ganha cada vez mais importância no cenário mundial, tanto pelo seu valor econômico quanto por seu valor ambiental. Em sistemas de abastecimento de água, os maiores consumidores de energia são as estações elevatórias e, portanto, são as unidades do sistema onde há maior preocupação em realizar estudos de eficiência energética. Porém, muitos sistemas se beneficiam de sua topografia privilegiada, realizando a captação e distribuição de água por gravidade, evitando os gastos com bombeamento. Entretanto, toda a energia potencial disponível é dissipada, seja em válvulas redutoras de pressão ou em reservatórios. Assim, toda a energia disponível que poderia ser aproveitada acaba sendo desperdiçada. Além disso, estes sistemas já possuem componentes básicos de uma central hidrelétrica, como válvulas e conduto forçado, o que facilita a implantação de uma microcentral. Entretanto, para que esta energia possa ser aproveitada de forma adequada, é necessário conhecer o funcionamento do sistema, para que o fornecimento de água não seja prejudicado. Neste trabalho, são realizados estudos em três diferentes sistemas, buscando definir uma metodologia para avaliar o potencial energético em sistemas de abastecimento de água utilizando bombas funcionando como turbina (BFTs). Além disso, foram realizados ensaios laboratoriais para avaliar o desempenho das BFTs nas diferentes condições hidráulicas encontradas.

Palavras-chave: fontes renováveis de energia, eficiência energética, microgeração, bombas funcionando como turbina.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido às questões econômicas e ambientais, o setor energético passou a procurar novas formas de produção de energia. Uma das alternativas encontradas é realizar a produção em pequena escala, próxima ao local de consumo. Este tipo de produção é conhecido por microgeração. Atualmente, com a regulamentação da Aneel através da resolução 482/12, que estabelece as condições gerais de acesso da microgeração à rede e a forma de compensação financeira pela energia gerada, este tipo de empreendimento deverá se tornar cada vez mais comum no Brasil.

A microgeração pode trazer grandes benefícios a diferentes setores da economia. Estes benefícios podem ser maximizados quando a fonte de energia estiver sendo desperdiçada no processo. No caso de sistemas de abastecimento de água, esta perda é resultado do controle de pressão nas tubulações, seja ela através de Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) ou reservatórios.

Os custos da geração de energia nestes casos são reduzidos, pois diversos componentes necessários já existem no local, tais como tubulações e válvulas. Porém, devido à baixa potência disponível nestes locais, o custo dos equipamentos de geração, representados pelo conjunto turbina e gerador, pode inviabilizar o projeto. A alternativa encontrada para reduzir o investimento é utilizar uma Bomba Funcionando como Turbina (BFT) e o Motor de Indução como Gerador (MIG).

Com o objetivo de definir uma metodologia para a avaliação do potencial energético em sistemas de abastecimento de água, foram realizados estudos em três diferentes sistemas. Em todos os casos, foi considerada a utilização de bombas funcionando como turbina, com o objetivo de melhorar a viabilidade econômica da implantação de uma microcentral. O primeiro caso apresenta o potencial de uma adutora de água bruta por gravidade. O segundo mostra o estudo da substituição de VRPs por BFTs, tanto para controle de pressão na rede quanto para geração de energia. Por fim, é apresentado o estudo em uma adutora de água tratada por gravidade que abastece um reservatório de distribuição. Em cada um dos casos, é definida uma metodologia de estudo diferente, considerando as particularidades de cada um dos sistemas, de forma que o abastecimento de água não seja prejudicado. Também foram realizados testes em laboratório para avaliar o comportamento da BFT nas diferentes condições hidráulicas encontradas nos sistemas estudados, verificando assim a viabilidade técnica das microcentrais.



As adutoras por gravidade podem ser divididas em dois tipos principais: aquelas em que é possível aproveitar toda a energia (pressão) disponível, que é o caso de adutoras entre a captação e a Estação de Tratamento de Água (ETA) e entre reservatórios, e adutoras em que a pressão de saída da BFT ainda deverá ser capaz de atender uma demanda, caso de adutoras da rede de distribuição e dos filtros da ETA.

No primeiro caso, onde toda a energia poderá ser aproveitada, deve ser feito o monitoramento da pressão e vazão do local, de preferência na época de menor consumo. Assim, é possível determinar a vazão e altura de projeto, que serão os valores mínimos encontrados. Desta forma, a geração será contínua, facilitando a operação da BFT. Caso a vazão de projeto seja nula e a adução ocorra entre reservatórios, é possível alterar sua operação para elevar a vazão mínima aduzida. Caso não seja possível, a geração só poderá ocorrer de forma intermitente.

No segundo caso, onde apenas parte da energia disponível poderá ser aproveitada, é necessário definir qual a perda de carga máxima que pode ser introduzida ao sistema. Neste caso, o monitoramento da pressão e vazão do local deverá ser feito no período de maior consumo, quando a pressão disponível é menor, ou seja, quando a perda de carga introduzida deverá ser mínima. Em casos onde a instalação da BFT será feita diretamente na rede de distribuição, a pressão deverá ser coletada em diferentes pontos da rede. Além disso, deve ser feito o levantamento dos diâmetros e comprimentos da tubulação e da topografia do local, para que seja possível realizar a calibração da rede. Desta forma, a BFT será selecionada para a vazão máxima e a perda de carga máxima permitida, definida como sendo a diferença entre a pressão mínima observada no nó crítico (ponto de menor pressão da rede) e o valor mínimo estabelecido por norma.

As curvas de altura e potência da BFT deverão ser levantadas, e uma simulação no software EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000) deverá ser feita para verificar a operação do sistema. Caso as pressões na rede fiquem muito baixas, deverá ser selecionada uma nova BFT com altura menor. Neste caso, a geração irá ocorrer de forma variável, de acordo com o consumo de água do local.

Em todos os casos, deverá ser feito o estudo para verificar a viabilidade econômica do projeto. A seguir, serão descritos os locais onde a metodologia proposta foi aplicada e os levantamentos realizados para a determinação do potencial energético.

## 2.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL

### 2.1.1. SAAE Cruzeiro – SP

Cruzeiro é uma cidade localizada na região Leste do Estado de São Paulo, próxima à Serra da Mantiqueira, inserida dentro da Bacia do Rio Paraíba do Sul. De acordo com os dados do último censo realizado (IBGE, 2010) a cidade possui uma área de aproximadamente 306 km<sup>2</sup>, com uma população de 77.039 habitantes.



Figura 2. Localização de Cruzeiro (Fonte: Prefeitura Municipal de Cruzeiro, 2012).

O sistema de abastecimento é municipal, composto por três sistemas de captação e tratamento em diferentes locais, como mostra a Figura 3. O estudo foi realizado apenas no sistema 1, responsável por cerca de 60% do abastecimento de água da cidade, com 13.966 ligações.

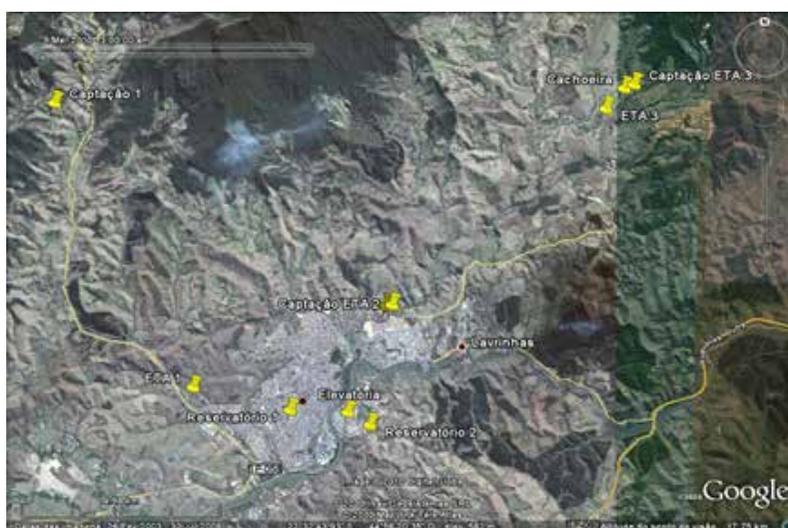


Figura 3. Localização das captações, ETAs, reservatórios e estações elevatórias do SAAE Cruzeiro (Fonte: Google Earth, 2012).

Neste sistema, a captação é feita no rio Batedor, e é composta por uma barragem de concreto com comporta em sua margem esquerda, alimentando um canal de adução, que se divide em dois, abastecendo uma ETA, utilizada apenas para decantação da água em situações onde há grande concentração de sedimentos, principalmente no período chuvoso, e também uma câmara de carga, de onde saem duas adutoras, uma de 10" e outra de 12", que abastecem a ETA Avelino Júnior. Na chegada da ETA, existe um pequeno reservatório para reduzir a pressão e mantê-la a um nível praticamente constante, em torno de 7 m. Logo em seguida, a água bruta passa pelo processo de filtração e desinfecção. A água tratada é então armazenada em um reservatório, de onde saem 4 adutoras, responsáveis por alimentar alguns bairros próximos e outro reservatório, conhecido como a caixa d'água da cidade, de onde é feito o abastecimento por gravidade. Parte desta água é conduzida à estação elevatória de Itagaçaba, que por sua vez abastece o reservatório Bela Vista. A Figura 4 apresenta um esquema deste sistema e os locais onde será estudada a implantação de duas microcentrais: a primeira logo na chegada das adutoras de água bruta na ETA Avelino Júnior e a segunda na rede de distribuição Vista Alegre, abastecida pelo reservatório Bela Vista.

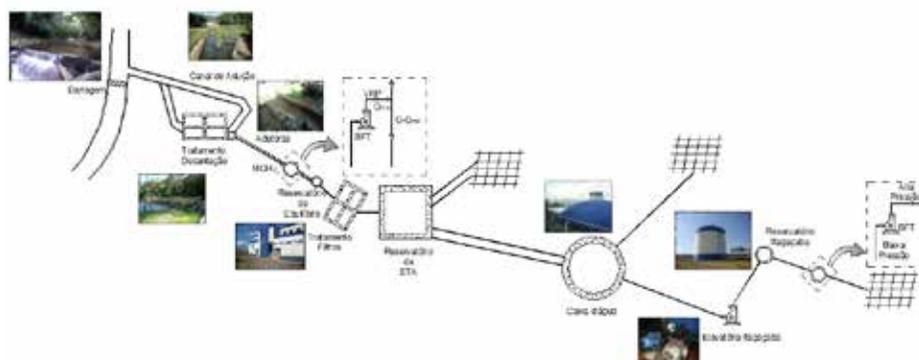


Figura 4. Esquema do sistema de abastecimento de água e localização das MCHs em Cruzeiro.

## 2.1.2. Águas Guariroba (Campo Grande – MS)

O município de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul, está localizado no centro do Estado. Possui uma área de 8.096 km<sup>2</sup> e 796.252 habitantes (IBGE, 2010). O município não possui grandes rios, pois se encontra sobre o divisor de águas das bacias do Paraná e Paraguai. Entretanto, o Estado é o detentor da maior porcentagem do aquífero Guarani dentro do território brasileiro.



Figura 5. Localização de Campo Grande (Fonte: Prefeitura Municipal de Campo Grande, 2012).

Ao contrário de Cruzeiro, em Campo Grande há uma concessionária, chamada Águas Guariroba, responsável desde 23 de outubro de 2000 pela gestão dos serviços de captação, adução, produção, tratamento e distribuição de água potável, além de realizar a coleta, afastamento, tratamento e disposição final do esgoto.

O sistema de abastecimento de água e coleta de esgoto possui as seguintes características:

- 2 captações de água superficial;
- 2 estações de tratamento de água;
- 119 captações de água subterrânea;
- 96 reservatórios;
- 44 elevatórias de água tratada;
- 3 estações de tratamento de esgoto;
- 26 elevatórias de esgoto;
- 6.240.607 m<sup>3</sup>/mês de volume disponibilizado de água;
- 22.675 cv de potência instalada (7.050.997 kWh/mês, equivalente a 2,7% da energia distribuída pela Enersul).

Como pode ser observado, este sistema é muito maior e mais complexo do que o descrito para o município de Cruzeiro. Outra diferença observada é a preocupação da concessionária com ações de racionalização do uso de energia elétrica e água,

realizando diversos projetos para otimização do sistema.

Com o objetivo de manter o sistema em constante melhoria, foi estudada a possibilidade da implantação de uma microcentral no sistema Guararoba. Este sistema é composto por uma captação superficial, aduzindo água bruta por gravidade (tubulação sem pressurização) até um reservatório que alimenta três bombas. Esta elevatória abastece a ETA Guararoba. Após passar pelo tratamento, a água é armazenada em quatro grandes reservatórios, que irão abastecer direta ou indiretamente a população. No subsistema conhecido como RG, a água segue para um reservatório menor, por gravidade, de onde será distribuída para a população através de duas adutoras, uma por gravidade e outra através de bombeamento. O estudo para a implantação da microcentral será feito na adutora de água tratada, entre os reservatórios da ETA e RG. A Figura 6 apresenta um esquema do sistema e o local para implantação da microcentral.

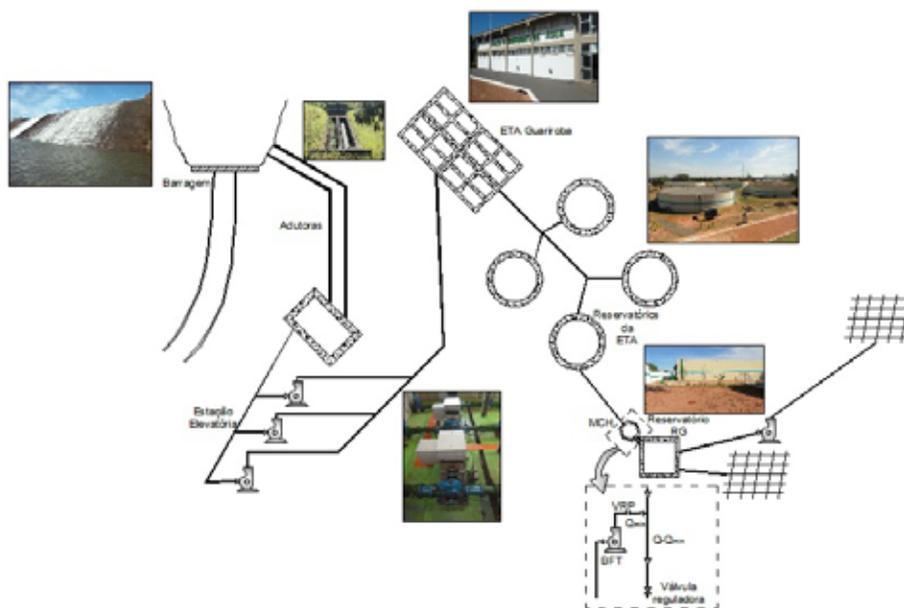


Figura 6. Esquema do sistema de abastecimento de água e localização da MCH em Campo Grande.

## 2.2. OBTENÇÃO DOS DADOS

Apesar de os estudos de caso apresentarem diferentes características, em todos eles é necessário definir os seguintes parâmetros:

- local mais adequado para instalação da microcentral;
- vazão e altura de projeto;
- carga a ser atendida;
- viabilidade econômica.

A seguir, será descrito como foram obtidos os dados necessários para a realização do estudo.

### 2.2.1. Vazão

Para os estudos realizados no SAAE Cruzeiro, a medida de vazão foi realizada através de um medidor de vazão ultrassônico da marca Thermo Polysonics (Figura 7). A utilização deste equipamento ocorreu devido à sua facilidade de instalação, que é feita externamente. Este medidor é utilizado na medição de líquidos limpos, e seu princípio de funcionamento se baseia no tempo de trânsito de pulsos de ultrassom emitidos e recebidos pelos dois sensores acoplados na parede externa da tubulação. Os dados coletados foram armazenados em um datalogger da marca Contemp, com taxa de aquisição de 1 minuto, durante uma semana. Para o estudo da microcentral na ETA Avelino Júnior, a instalação foi feita logo após o tanque de estabilização, quando as duas adutoras passam para uma tubulação única de 600 mm. Também foi feita a medição pontual da vazão nas duas adutoras para determinar a contribuição de cada uma na vazão total. No caso da microcentral da rede Vista Alegre, a instalação foi feita logo na saída do reservatório de distribuição, e a coleta de dados durou apenas 24 horas. A vazão em cada um dos nós da rede foi obtida relacionando a vazão total à área de influência de cada nó, considerando que o vazamento possui a mesma proporção em todos os pontos da rede.



Figura 7. Medidor de vazão ultrassom e sistema de aquisição de dados em Cruzeiro.

Para o estudo realizado em Campo Grande, foram coletados os dados de três meses da macromedição realizada pela concessionária através de um medidor eletromagnético, instalado logo na chegada ao reservatório de jusante (Figura 8), com uma taxa de aquisição de 1 minuto.



Figura 8. Medidor de vazão eletromagnético de Campo Grande.

### 2.2.2. Pressão

As medidas de pressão em Campo Grande foram realizadas através de um datalogger. Ao contrário da medida de vazão, a pressão não faz parte do sistema de macromedição, e, portanto, foi necessária a instalação do datalogger (Figura 9), com horário sincronizado ao sistema de aquisição de vazão, na chegada do reservatório de jusante, local onde deverá ser instalada a BFT. A taxa de aquisição utilizada foi de 1 minuto, porém a medida durou apenas dois dias.



Figura 9. Datalogger utilizado em Campo Grande.

Já no caso de Cruzeiro, onde a microcentral será instalada na rede Vista Alegre, a medida de pressão foi feita em diferentes pontos da rede, também através de dataloggers, para que seja possível realizar a calibração da rede e, posteriormente, determinar as zonas de pressão através do software EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000), definido assim o melhor local para a instalação da BFT. Assim como para a medida de vazão, a aquisição durou 24 horas, também com taxa de aquisição de 1 minuto. A Figura 10 mostra os pontos de medidas de pressão, feitas no cavalete das residências, além da medida do nível do reservatório de distribuição. A diferença entre a cota onde foi feita a coleta dos dados e a rede de distribuição foi considerada para realizar a calibração e simulação da rede.



Figura 10. Localização dos dataloggers na rede Vista Alegre (Fonte: Google Earth).

No caso da microcentral da ETA Avelino Júnior, não foi possível realizar a medida de pressão, pois antes do tanque de equalização, local onde deverá ser instalada a BFT, não há ponto para tomada de pressão, e, além disso, o poço de visita sofre inundações constantes devido à descarga de água no local, o que danificaria o equipamento. Desta forma, optou-se por obter a medida de pressão neste ponto através da diferença da queda bruta e as perdas de carga ao longo das duas adutoras. A queda bruta, bem como o perfil e o comprimento das adutoras, foi obtida através do DGPS (Differential Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global Diferencial) ProMark 3, apresentado na Figura 11. Este sistema consiste na instalação de um receptor GPS em um local fixo, denominado de base, enquanto o segundo receptor, denominado móvel, é instalado nos pontos onde se deseja conhecer as coordenadas. Isto permite a correção diferencial do erro, já que a base

servirá de referência para todos os outros pontos, fornecendo precisão centimétrica. A Figura 12 apresenta os perfis transversal e longitudinal da adutora, e as cotas da tomada d'água na captação e da casa de máquinas na ETA.



Figura 11. Instalação do DGPS de base e móvel.

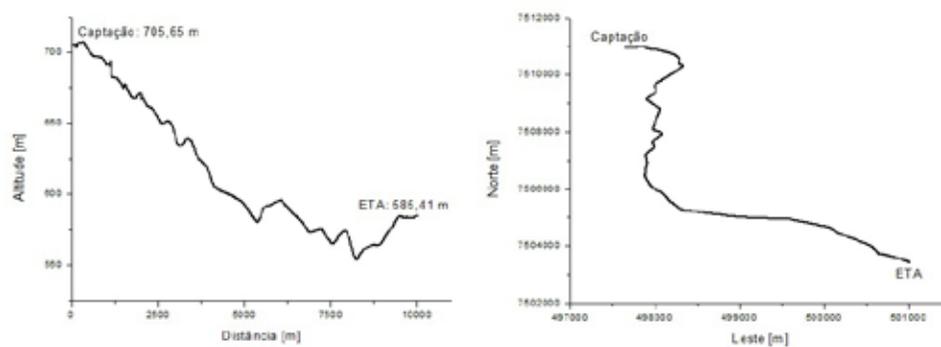


Figura 12. Perfil transversal e longitudinal das adutoras.

Conhecendo o comprimento da tubulação, seu diâmetro e seu material, determinou-se a perda de carga para cada ponto da série de vazões através das Equações 1 e 2 (PORTO, 2006). As perdas de carga localizadas não foram consideradas, pois, segundo Azevedo Netto (1998), quando o comprimento da adutora for superior a 4.000 vezes seu diâmetro, estas são desprezíveis em relação à perda distribuída.

$$CE_{af} = \frac{(CE_{a1} \cdot V_{a1})}{(V_{a1+a2})} + \frac{(CE_{a2} \cdot V_{a2})}{(V_{a1+a2})}$$

onde:

$\Delta H$  [m] – perda de carga;

$f$  [1] – fator de atrito da tubulação;

$Leq$  [m] – comprimento equivalente da tubulação;

$D$  [m] – diâmetro da tubulação;

$v$  [m/s] – velocidade do escoamento;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – aceleração da gravidade.

$$AF = \sum ((C.L). 0,75))$$

onde:

$f$  [1] – fator de atrito da tubulação;

$\epsilon$  [m] – rugosidade absoluta;

$D$  [m] – diâmetro da tubulação;

$Rey$  [1] – número de Reynolds.

### 2.2.3. Topografia

Para o estudo da microcentral da rede Vista Alegre, foi necessário determinar a cota dos nós da rede de distribuição. Desta forma, foi feito um levantamento topográfico utilizando o DGPS para determinar estes valores em alguns pontos da rede (Figura 13). A cota dos nós restantes foi obtida através da interpolação dos valores, utilizando o software Spring (CAMARA et al., 1996).

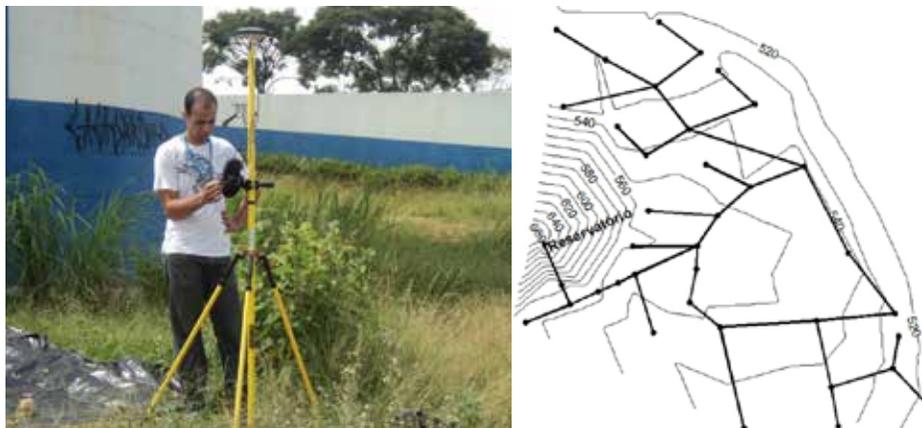


Figura 13. Levantamento topográfico da rede Vista Alegre.

### 2.2.4. Potência Elétrica

Para avaliar a economia no consumo de energia elétrica, é necessário conhecer o consumo de energia e a demanda dos sistemas. Ressalta-se que, de acordo com a resolução 482/12 da Aneel, a energia gerada por uma microcentral pode ser abatida da conta de energia de um consumidor diferente do produtor, desde que ambos estejam inscritos no mesmo CNPJ. No caso da ETA Avelino Júnior em Cruzeiro, isso é de grande importância, já que a demanda da ETA é muito menor



Figura 14. Instalação do medidor de grandezas elétricas para monitoramento da demanda na ETA em Cruzeiro.

que a geração. Neste caso, optou-se por instalar um medidor de grandezas elétricas no quadro de comando (Figura 14), para verificar qual será a energia excedente.

Nos outros dois casos, como a geração não ultrapassa o consumo, apenas o conhecimento das tarifas praticadas é necessário para que seja feita a análise econômica. A Tabela 1 apresenta os valores de tarifa adotados para realizar a análise econômica. No caso da rede Vista Alegre, como a microcentral ficará na rede de distribuição, considerou-se a tarifa de energia do sistema consumidor mais próximo do local, a estação elevatória Itagaçaba.

Tabela 1. Tarifas utilizadas para realizar a análise econômica das microcentrais.

Local	Tarifa [R\$/kWh]
ETA Avelino Júnior	0,32308
Captação Sistema 3 - Cruzeiro	0,14244 (fora de ponta)
	0,22632 (horário de ponta)
Rede Vista Alegre	0,29920
Campo Grande	0,137972 (fora de ponta)
	1,174351 (horário de ponta)

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. SAAE CRUZEIRO

#### 3.1.1. ETA Avelino Júnior

Com o local definido e os dados de pressão e vazão coletados, foi feita a curva de permanência de vazões aduzidas durante o período de monitoramento, realizado entre os dias 22 e 29 de junho de 2011, como mostra a Figura 15. Esta curva apresenta os valores de vazão em função da frequência em que é igualada ou superada.

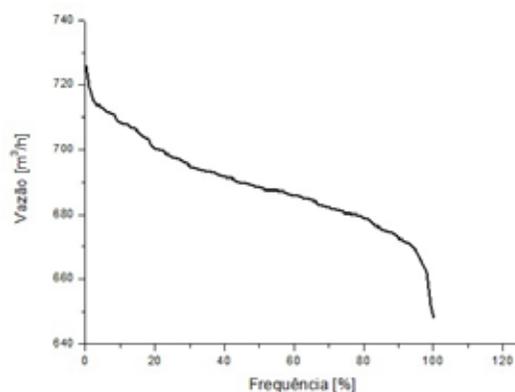


Figura 15. Curva de permanência de vazões aduzidas em Cruzeiro.

Como pode ser observado, não há grande amplitude da vazão aduzida, com uma diferença de apenas 11,26% entre o valor máximo e mínimo, o que faz com que a curva tenha uma queda pouco acentuada. Apesar desta característica, optou-se por utilizar a vazão mínima encontrada para realizar o projeto da microcentral, já que a BFT não possui dispositivo para controle e regulagem de vazão. Assim, propõe-se o uso de um by-pass para que a vazão mínima seja turbinada, enquanto o restante passe normalmente pela tubulação principal. Apesar de esta alternativa regularizar a vazão turbinada, a pressão continuará oscilando. Desta forma, propõe-se também o uso de uma VRP para estabilizar a pressão na entrada da BFT, ou seja, a altura de projeto também será a mínima observada, o que ocorre na máxima vazão. Utilizando-se o método de Chapallaz (1992), foi feita a seleção do grupo gerador, composto pela BFT e MIG (Tabela 2).

Em seguida, deve ser avaliada a viabilidade econômica do projeto. Assim, determinou-se qual a economia de energia proporcionada pela microcentral. A Figura 16 apresenta a demanda média da ETA ao longo de um dia. Percebe-se um aumento na demanda a partir das 18 horas até as 5 horas, devido à carga de iluminação da ETA. Além disso, nota-se que, com apenas uma das BFTs, é possível sustentar toda a demanda da ETA, que durante todo o período de medição atingiu um valor máximo de 14,9 kW.

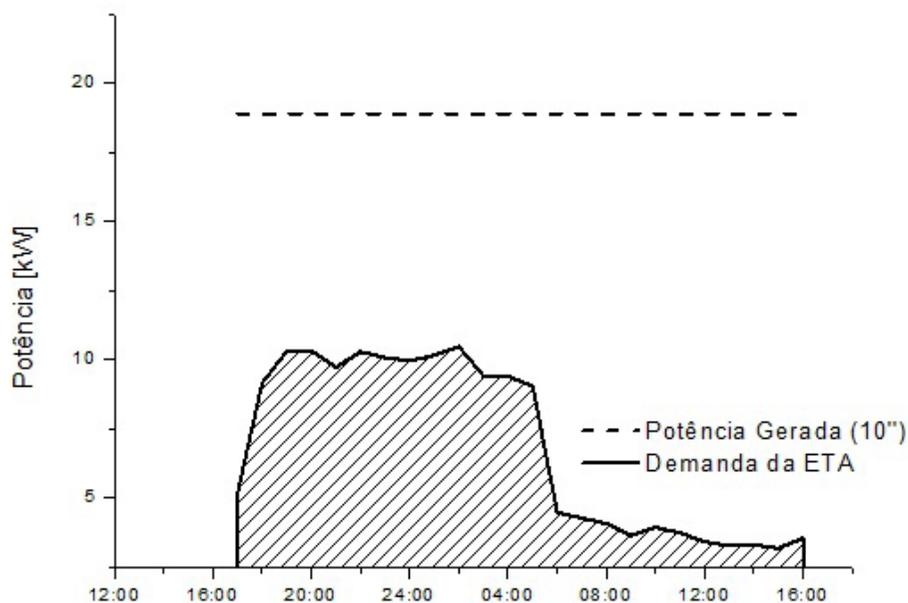


Figura 16. Curva de demanda média da ETA de Cruzeiro.

Entretanto, o SAAE Cruzeiro possui outras instalações que podem se beneficiar com a produção de energia da microcentral da ETA Avelino Júnior. Assim, considerou-se que a energia excedente será utilizada para compensação das contas de energia da captação do sistema 3. Considerando o investimento inicial necessário (obras, quadro de proteção e grupo gerador) e as despesas com operação e manutenção, o projeto apresenta um payback de 1,57 anos (Tabela 2), indicando alta atratividade do investimento. Além disso, o custo do kW instalado está bem abaixo do estimado para PCHs, que é de R\$ 5.000,00 (TIAGO FILHO, 2008). Isto ocorre devido à existência de alguns componentes necessários a uma usina, como câmara de carga e conduto forçado.

Tabela 2. Resultados da microcentral da ETA Avelino Júnior.

	Adutora de 10"	Adutora de 12"
<b>Altura [m]</b>	33	19
<b>Vazão [m<sup>3</sup>/h]</b>	282	367
<b>Rendimento do grupo gerador [%]</b>	74,5	75,5
<b>Potência elétrica gerada [kW]</b>	19	46
<b>Investimento inicial [R\$]</b>	115.932	
<b>Economia anual [R\$]</b>	97.014	
<b>TIR [%]</b>	73,7	
<b>Payback [anos]</b>	1,57	
<b>Custo específico [R\$/kW]</b>	1.784	

### 3.1.2. Rede Vista Alegre

Com os dados coletados entre os dias 10 e 11 de fevereiro de 2011 e os resultados da calibração da rede obtidos por Viana et al. (2011), foi feita a simulação hidráulica da rede Vista Alegre. A Figura 17 mostra as zonas de pressão para três diferentes períodos. Percebe-se uma zona ao norte que apresenta alta pressão em todos os três períodos. Assim, identificou-se o trecho 22, indicado na Figura 17, como sendo o mais adequado para a instalação da BFT.

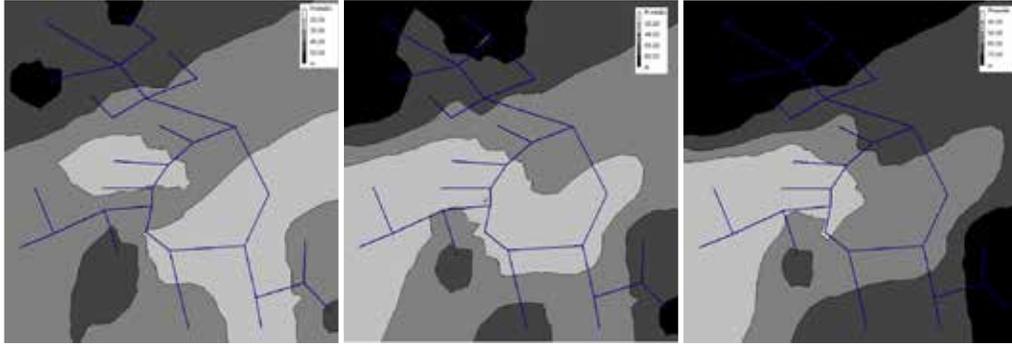


Figura 17. Localização do trecho a ser implantada a BFT e zonas de pressão da rede Vista Alegre sem controle de pressão: a) Mínima; b) Média; c) Máxima.

Observando os resultados da simulação dentro da zona de influência da BFT, identificou-se o nó 26 como o mais crítico, ou seja, onde ocorrem as menores pressões. Desta forma, para o período de vazão máxima, de 13,2 m<sup>3</sup>/h, observou-se que a pressão deste nó é de 38,9 m, conforme mostra a Figura 18.

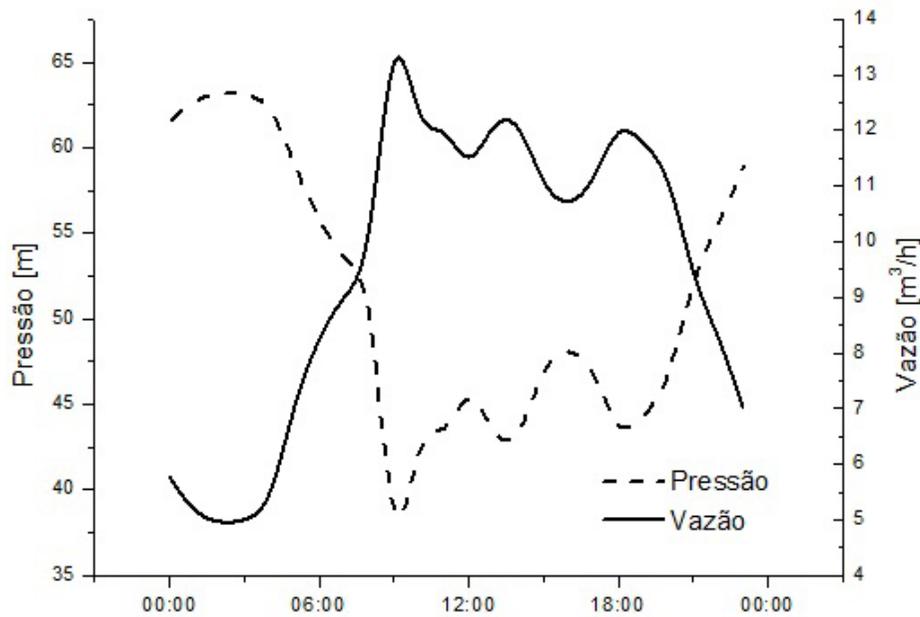


Figura 18. Variação de vazão no setor e pressão no nó crítico.

Assim, admitiu-se que, para a vazão máxima, a perda de carga provocada pela BFT deverá manter 10 m de pressão neste nó, valor mínimo recomendado pela NBR 12218 (ABNT, 1994). Portanto, a altura de projeto da BFT será de 28,9 m.

Utilizando o método de Chapallaz et al. (1992), encontrou-se a curva de altura da BFT selecionada. Para realizar sua simulação no software EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000), utilizou-se uma válvula genérica (GPV), que permite que sua curva de perda de carga seja inserida. As novas zonas de pressão obtidas apresentaram uma grande redução de pressão, como mostra a Figura 19.

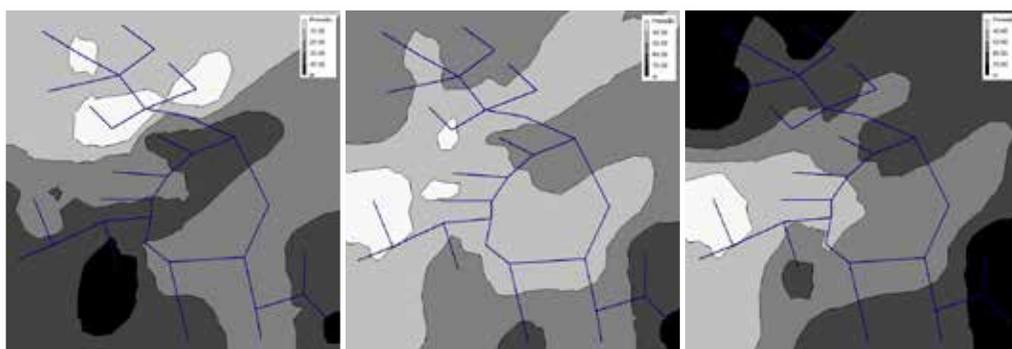


Figura 19. Zonas de pressão da rede Vista Alegre utilizando uma BFT para controle de pressão: a) Mínima; b) Média; c) Máxima.

Comparando-se a pressão ao longo do dia apenas no nó 26 (Figura 20), observa-se que, apesar do controle efetuado, nos períodos de maior pressão a queda não foi tão acentuada. Isto se deve ao fato de a vazão ser muito baixa nestes períodos, e, portanto, a BFT não insere uma perda de carga suficiente para manter uma pressão adequada. O mesmo pode ser observado com a potência elétrica gerada, já que a potência hidráulica é maior com o aumento da vazão. Mesmo assim, a redução de pressão observada em média é de 38,5%, o que representa uma redução diária nos vazamentos de 108,3 m<sup>3</sup>, enquanto a potência gerada média é de 247,8 W.

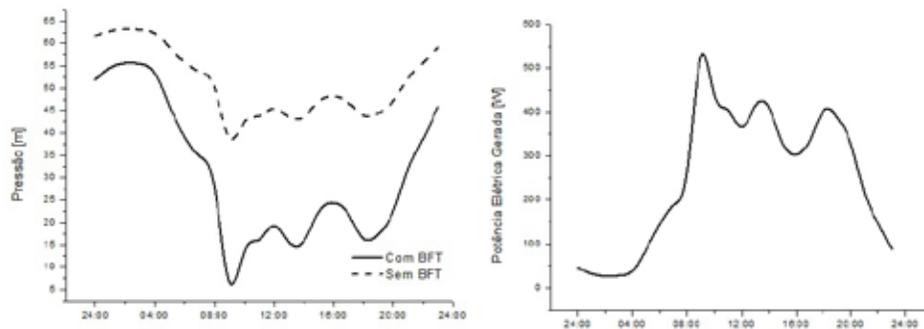


Figura 20. Comparação das pressões no ponto mais crítico da rede e potência elétrica gerada utilizando uma BFT.

Para otimizar a geração e também o controle de pressão, Budris (2011) sugere o uso de múltiplas BFTs em paralelo. Desta forma, optou-se por utilizar dois conjuntos para dois períodos de consumo definidos: o primeiro compreende o horário de maior demanda, entre as 7 e 22h, que terá os mesmos dados de projeto do caso com apenas uma BFT, enquanto o segundo compreende o horário de menor consumo, entre as 23h e 6h, quando a pressão é mais elevada. Neste caso a vazão de projeto será de 8,24 m<sup>3</sup>/h enquanto a altura será de 45,9 m.

Assim como foi feito anteriormente, a curva de altura da nova BFT foi levantada e, em seguida, realizou-se a simulação da rede para seu período de funcionamento. A Figura 21 apresenta a nova zona de pressão obtida para o período noturno (máxima pressão). Percebe-se que os valores se aproximam mais da média, devido ao melhor controle da pressão.



Figura 21. Zonas de pressão da rede Vista Alegre utilizando duas BFTs para controle de pressão no período de pressão máxima.

Ao se comparar os resultados apenas do nó 26 (Figura 22), é possível observar melhor a estabilização da pressão na rede. A potência elétrica gerada também se elevou, já que uma BFT mais adequada foi selecionada para o período de menor consumo. Em média, a redução de pressão foi de 47,3%, reduzindo o volume de vazamentos em 123,8 m<sup>3</sup> por dia, enquanto a potência gerada média foi de 290,1 W. O mesmo procedimento poderia ser feito para que uma terceira BFT operasse nos picos de pressão ainda existentes, mas desta forma a operação se tornaria mais complexa. Outra alternativa é o uso de um conversor de frequência para manter a pressão no nó crítico constante e igual ao valor mínimo estabelecido, variando a rotação da BFT conforme a necessidade de uma maior ou menor perda de carga localizada. Entretanto, neste caso, o investimento seria muito elevado, já que a geração ocorreria em rotação variável, o que demanda alta tecnologia.

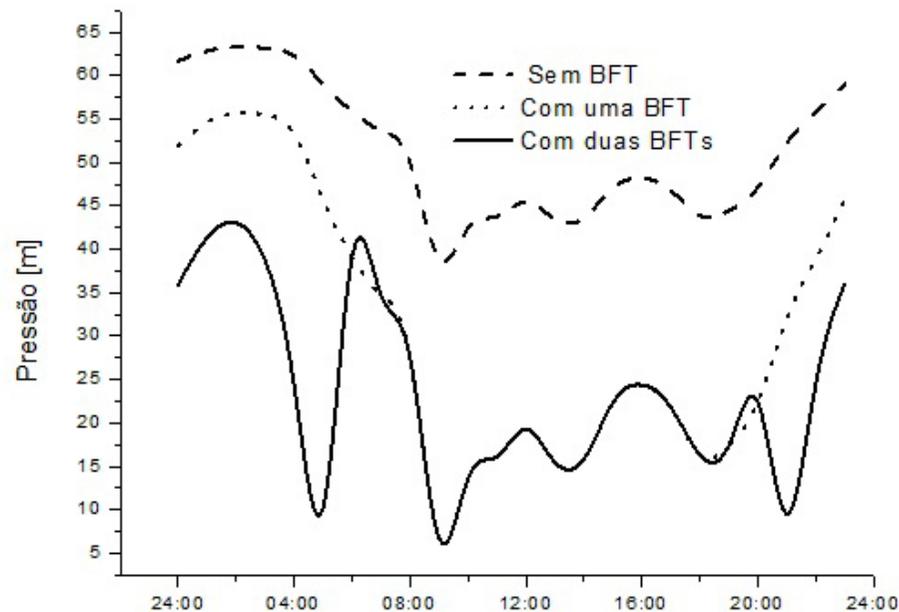


Figura 22. Comparação das pressões no ponto mais crítico da rede.

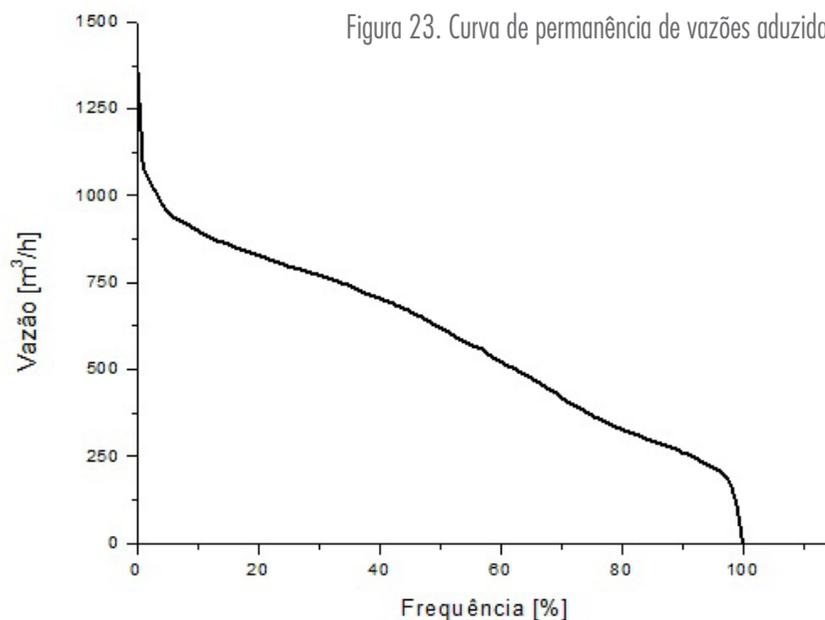
Apesar da redução do volume de vazamentos, a análise econômica deve considerar apenas o benefício encontrado devido à geração de energia. Isto porque uma VRP exerce a mesma função de controle de pressão, ou seja, a vantagem do uso da BFT se dá exclusivamente devido à produção de energia e ao seu menor preço quando comparada à VRP. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos. Devido à baixa potência encontrada, nenhum dos dois casos apresentou viabilidade econômica.

Tabela 3. Resultados da microcentral da rede Vista Alegre de Cruzeiro.

Cenário	1 BFT	2 BFTs
Altura [m]	28,9	45,9
Vazão [m <sup>3</sup> /h]	13,2	8,24
Rendimento do grupo gerador [%]	45,3	40,0
Potência elétrica gerada média [W]	248	290
Investimento inicial [R\$]	19.685	31.780
Economia anual - Energia [R\$]	650	760
TIR [%]	—	—
Payback [anos]	—	—
Custo específico [R\$/kW]	79.439	109.548

### 3.2. CAMPO GRANDE

Assim como para o caso da ETA Avelino Júnior, obteve-se primeiramente a curva de permanência de vazões aduzidas, apresentada na Figura 23. Apesar da maior extensão da série, ela não contempla o período de menor consumo (inverno), fato que pode representar um aumento do potencial realmente disponível.



A curva neste caso tem uma queda um pouco mais acentuada, ou seja, há uma maior variação na vazão aduzida. Isto ocorre pois a adução é controlada de acordo com o nível d'água observado no reservatório RG. Pode-se observar também que a vazão mínima é nula, ou seja, em determinados momentos da operação a adução é interrompida devido ao elevado nível do reservatório. Assim, para que a geração seja possível, as seguintes alternativas podem ser adotadas:

- realizar a geração apenas nos horários com maior demanda de água, enquanto em outros períodos não haverá geração;
- realizar a geração com duas ou mais BFTs em paralelo, permitindo a geração de energia por um período maior;
- redefinir o esquema de adução e controle de nível para elevar a vazão mínima, mantendo as condições operacionais dos reservatórios e adutoras, e assim gerar energia durante todo o dia.

A alternativa a ser escolhida depende da necessidade e das condições de operação do sistema. Para facilitar a operação da microcentral e maximizar os benefícios, optou-se por estudar a viabilidade de alterar a operação de adução.

Para realizar este estudo, selecionou-se o dia de menor consumo da série de vazões (Figura 24). Percebe-se que, durante o horário de ponta, a vazão aduzida não é a máxima, pois a produção de água tratada é interrompida, ou seja, há necessidade de se controlar o nível do reservatório da ETA. Consequentemente o nível do reservatório RG sofreu uma queda, mas se mantém bem acima de seu nível mínimo de 20%. Também é possível observar que, apesar do total aduzido durante o dia ser o mínimo observado, o valor extremo foi de 195 m<sup>3</sup>/h, superior ao da série.

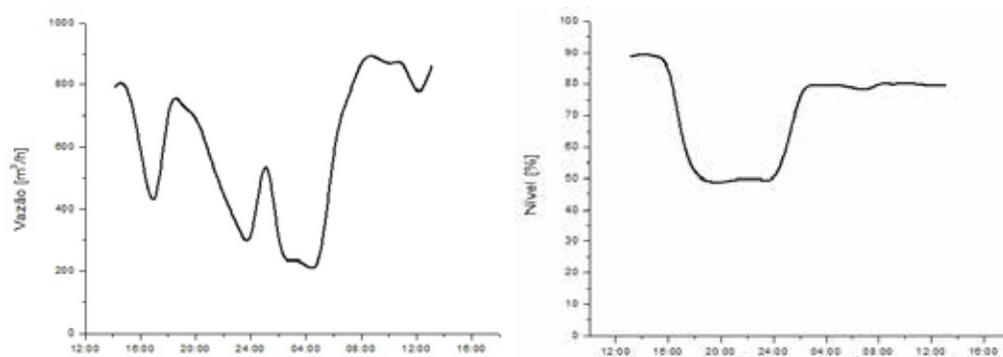


Figura 24. Variações da vazão aduzida e do nível do reservatório RG no dia de menor consumo.

Para avaliar a possibilidade de alterar a operação dos reservatórios, foi feita a análise utilizando o método dos volumes diferenciais (GOMES, 2009). Os novos valores de vazão aduzida para cada intervalo de tempo de 1 hora foram obtidos através de um processo de otimização utilizando programação não linear. Assim, o problema ficará sujeito às seguintes condições:

- maximizar a economia de energia;
- variáveis (vazão aduzida) com valores entre 0 e 1.393 m<sup>3</sup>/h;
- níveis dos reservatórios da ETA e RG entre 20 e 100%;
- vazão média de entrada igual à vazão média de saída;
- somatória das diferenças positivas e negativas entre as vazões de entrada e saída dos reservatórios deve ser igual e inferior ao volume útil do reservatório.

A Tabela 4 e a Figura 25 apresentam os resultados desta otimização. Ressalta-se que apenas a vazão aduzida ao reservatório RG foi alterada. Caso houvesse necessidade, ainda poderia ser feita a otimização da produção de água na ETA. Esta alternativa também é válida para um cenário onde outros reservatórios que recebam água por gravidade da ETA também venham a ter uma microcentral. Percebe-se que a vazão aduzida se mantém próxima de um valor constante por um período maior, porém o reservatório chega a trabalhar em seu nível mínimo no fim do horário de ponta. Já as condições operacionais do reservatório da ETA pouco mudaram. Desta forma, conseguiu-se aumentar a vazão mínima para 411,7 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 4. Resultados obtidos para a otimização da vazão aduzida ao reservatório RG.

Horário	RG			ETA		
	Q <sub>entra</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>saída</sub> [m <sup>3</sup> /h]	NA [%]	Q <sub>entra</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>saída</sub> [m <sup>3</sup> /h]	NA [%]
14:00	600	783	32,23	5.094	5.135	68,28
15:00	845	840	32,59	5.094	4.872	70,13
16:00	748	592	43,00	5.094	3.627	82,35
17:00	788	745	45,83	2.938	1.634	93,22
18:00	955	962	45,38	0	3.139	67,06
19:00	572	737	34,36	0	2.722	44,38
20:00	529	714	22,00	0	1.862	28,87
21:00	528	558	20,00	4.631	4.904	26,59
22:00	430	430	20,00	5.094	4.671	30,12

<b>23:00</b>	412	347	24,31	5.094	4.605	34,19
<b>00:00</b>	450	253	37,46	5.094	4.233	41,37
<b>01:00</b>	588	522	41,86	5.094	3.927	51,09
<b>02:00</b>	412	216	54,91	5.094	4.110	59,29
<b>03:00</b>	427	247	66,90	5.094	3.747	70,52
<b>04:00</b>	416	214	80,35	5.094	3.669	82,40
<b>05:00</b>	498	203	100,00	5.094	4.013	91,41
<b>06:00</b>	679	679	100,00	5.094	4.433	96,92
<b>07:00</b>	502	774	81,86	3.240	3.294	96,47
<b>08:00</b>	732	857	73,55	3.240	5.279	79,47
<b>09:00</b>	724	919	60,57	3.240	4.109	72,23
<b>10:00</b>	687	844	50,13	3.240	4.130	64,81
<b>11:00</b>	726	908	38,02	3.240	3.769	60,40
<b>12:00</b>	783	736	41,18	3.631	3.208	63,92
<b>13:00</b>	917	868	44,42	4.094	3.529	68,62
<b>Média</b>	623	623	—	3.859	3.859	—

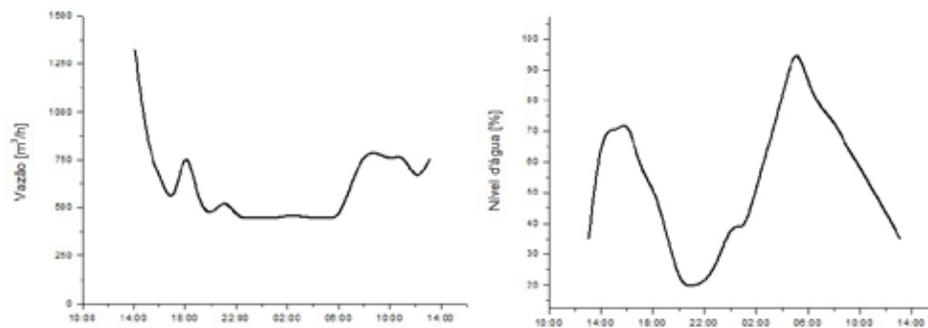


Figura 25. Variações da vazão aduzida e do nível do reservatório RG após a otimização.

Sabendo-se também que a altura mínima, que ocorre quando a vazão é máxima, durante o período de observação foi de 21,75 m, foi feita a seleção da BFT para este ponto de operação. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos. Assim como na ETA Avelino Júnior, o projeto apresentou grande atratividade, e com o custo do kW também inferior ao estimado para uma PCH.

Tabela 5. Resultados da análise econômica de Campo Grande.

<b>Altura [m]</b>	21,8
<b>Vazão [m<sup>3</sup>/h]</b>	412
<b>Rendimento do grupo gerador [%]</b>	77,6
<b>Potência elétrica gerada [kW]</b>	19
<b>Investimento inicial [R\$]</b>	36.895
<b>Economia anual [R\$]</b>	47.894
<b>TIR [%]</b>	129,8
<b>Payback [anos]</b>	0,93
<b>Custo específico [R\$/kW]</b>	1.919

### 3.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

Com o objetivo de verificar o comportamento de uma BFT em diferentes condições hidráulicas, foram realizados ensaios laboratoriais. Assim, foram montadas três diferentes bancadas para avaliar a operação da BFT nas seguintes condições:

- BFT com tubo de sucção: é o ensaio de referência, onde a bomba irá operar como se fosse realmente uma turbina, utilizando seus resultados para comparação com os outros casos. O controle de vazão é feito à montante da BFT, reduzindo a pressão de entrada;
- BFT com controle de vazão na saída: neste ensaio, são simuladas as condições de operação de um sistema de abastecimento típico, onde o controle de vazão é feito devido ao consumo da população, à jusante da BFT. Neste caso, a pressão de entrada irá aumentar com a redução da vazão e a BFT irá atuar no controle de pressão;
- By-pass com BFT: o objetivo deste ensaio é verificar se a BFT instalada no by-pass de uma adutora, juntamente com uma VRP, irá operar com altura e vazão constantes, independentemente do controle feito na tubulação principal.

A Figura 26 apresenta um esquema das bancadas utilizadas para o ensaio. Uma bomba de maior potência, juntamente com um conversor de frequência, simula a queda da BFT. Resistências são utilizadas para dissipar a energia gerada. Desta forma, controla-se a rotação da BFT, colocando-se mais ou menos carga.

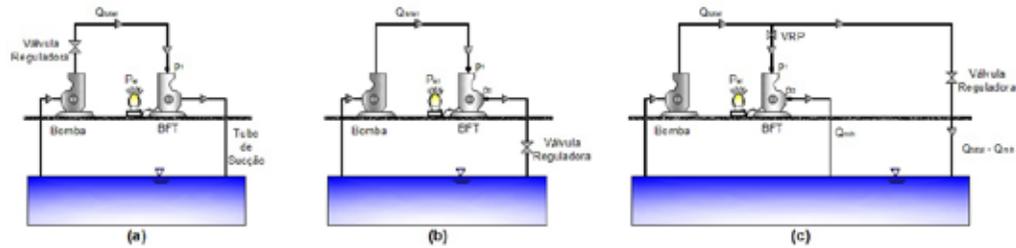


Figura 26. Esquema das bancadas de ensaio: a) BFT com tubo de sucção; b) BFT com controle de vazão à jusante; c) BFT em um by-pass.

A medição de vazão é feita através de medidores ultrassônicos da marca Thermo Polysonics, enquanto as medidas de pressão são feitas através de transdutores de pressão da marca SMAR. A potência elétrica é medida através do medidor de grandezas elétricas Yokogawa CW 140. Também é feita a medida de rotação da BFT através do tacômetro ótico da marca Icel, para evitar que a máquina dispare, mantendo sua velocidade constante. Assim, é possível calcular a altura de queda líquida da BFT, a potência hidráulica fornecida e seu rendimento através das Equações 3 a 6.

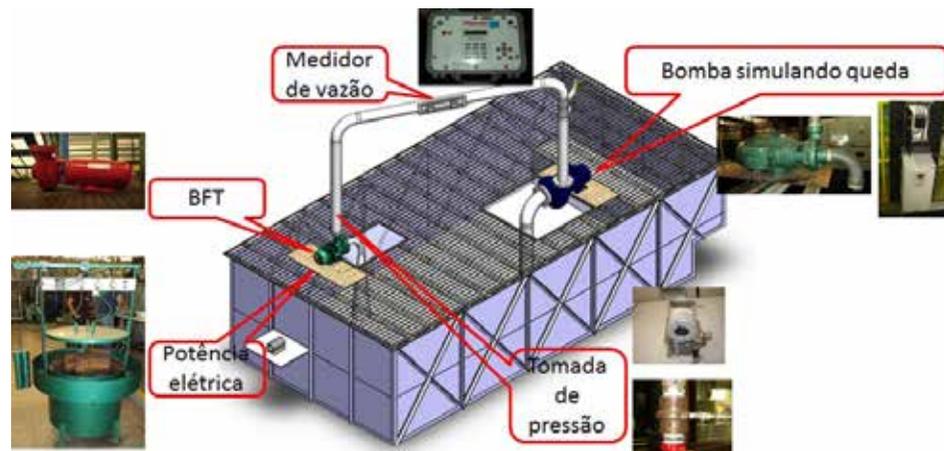


Figura 27. Localização das medições feitas durante os ensaios.

$$[\mathbf{y}_{k+1} - H(\mathbf{x}_{k+1}^f)]$$

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3}$$

$$\eta_c = \frac{P_{el}}{P_h}$$

onde:

H [m] – altura de queda líquida da BFT;

$p_1/\rho \cdot g$  [m] – pressão na entrada da turbina;

$p_2/\rho \cdot g$  [m] – pressão na saída da turbina. No caso da BFT com tubo de sucção, considera-se nula;

$v_1$  [m/s] – velocidade na seção de entrada da BFT;

$v_2$  [m/s] – velocidade na seção de saída da BFT. No caso da BFT com tubo de sucção, considera-se a seção final do tubo de sucção;

$z_1$  [m] – cota de posição na entrada da BFT;

$z_2$  [m] – cota de posição na saída da BFT. No caso da BFT com tubo de sucção, considera-se o nível d'água do canal de fuga;

Q [m<sup>3</sup>/s] – vazão turbinada;

D [m] – diâmetro da seção considerada (entrada ou saída);

Ph [kW] – potência hidráulica;

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – massa específica da água;

$\eta_c$  [%] – rendimento do grupo gerador;

Pel [kW] – potência elétrica gerada.

### 3.3.1. BFT com Tubo de Sucção

O ensaio realizado na BFT utilizando o tubo de sucção apresentou os resultados da Tabela 6 e Figura 28.

Tabela 6. Resultados do ensaio realizado na BFT com tubo de sucção.

Q [m <sup>3</sup> /h]	p1/Q.g [m]	H [m]	Pel [kW]	Ph [kW]	$\eta_{gg}$ [%]
16,50	31,72	28,05	0,12	1,16	8,23
18,58	31,32	29,27	0,29	1,40	17,86
21,19	35,48	30,21	0,47	1,58	22,26
22,82	37,55	31,04	0,63	1,72	26,38
24,56	39,38	32,21	0,84	1,91	31,18
25,97	40,90	32,87	1,00	2,05	33,78
29,31	44,14	33,82	1,42	2,32	39,41
31,05	47,73	34,77	1,74	2,47	42,28
32,32	49,74	35,31	1,92	2,57	42,91
33,31	52,20	35,85	2,11	2,65	43,72
34,48	55,30	36,30	2,35	2,72	44,44
37,47	57,00	36,98	2,57	2,99	45,94
39,32	59,45	37,47	2,80	3,13	46,04
41,17	61,90	37,91	3,03	3,27	45,62

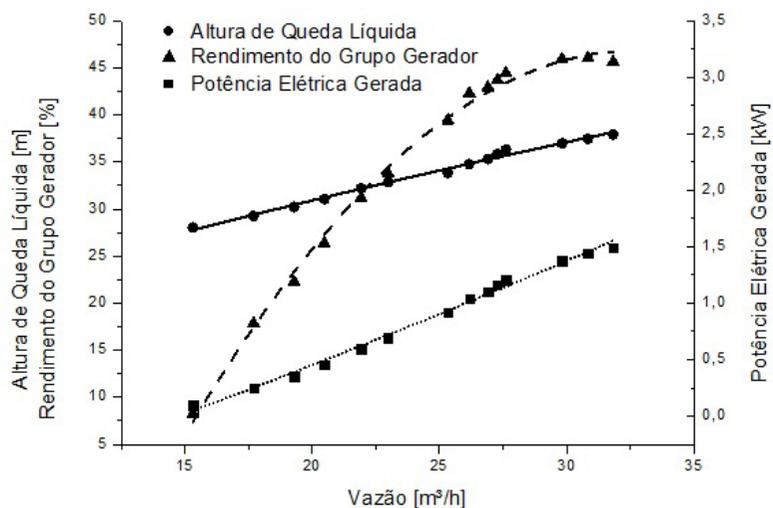


Figura 28. Curvas de altura de queda líquida, rendimento do grupo gerador e potência elétrica gerada para a BFT com tubo de sucção.

### 3.3.2. BFT com Controle de Vazão à Jusante

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio, enquanto a Figura 29 ilustra as curvas características da BFT.

Tabela 7. Resultados do ensaio realizado na BFT com controle de vazão à jusante.

Q [m <sup>3</sup> /h]	p1/q.g [m]	p2/q.g [m]	H [m]	Pel [kW]	Ph [kW]	$\eta_{gg}$ [%]
36,69	62,99	9,13	38,75	1,84	3,87	47,66
32,09	70,63	26,00	36,36	1,30	3,17	41,05
26,58	75,34	35,94	34,81	0,83	2,52	33,04
25,26	76,44	39,06	34,04	0,71	2,34	30,56
23,56	77,46	41,25	32,80	0,54	2,10	25,76
22,56	78,51	44,06	32,17	0,43	1,97	21,61
21,45	79,42	46,56	30,84	0,29	1,80	15,95

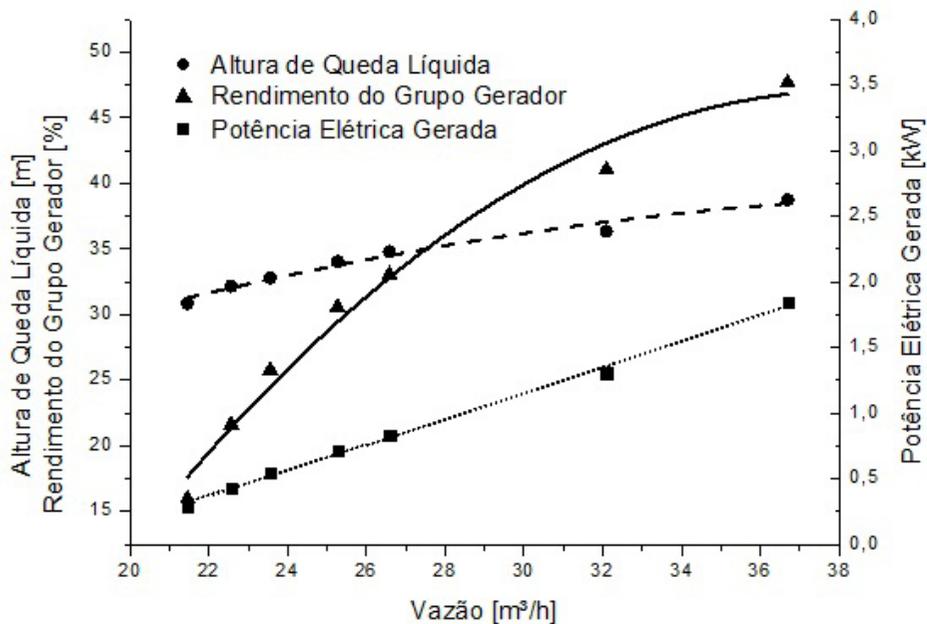


Figura 29. Curvas de altura de queda líquida, rendimento do grupo gerador e potência elétrica gerada para a BFT com controle de vazão à jusante.

Comparando as curvas de altura e de rendimento obtidas com as curvas da operação da BFT com tubo de sucção (Figura 30), percebe-se que há uma diferença significativa da curva de rendimento entre os dois modelos, sendo que a BFT com controle de vazão à jusante sempre opera com um rendimento menor. Isto pode ser explicado pela ausência do tubo de sucção, que permite que o escoamento atinja o nível de jusante de maneira uniforme, além de recuperar parte da energia cinética do fluido que passa pelo rotor. Apesar da queda de rendimento, as duas curvas de altura obtidas se mantiveram próximas, indicando a viabilidade técnica ao se utilizar uma BFT para controle de pressão na rede.

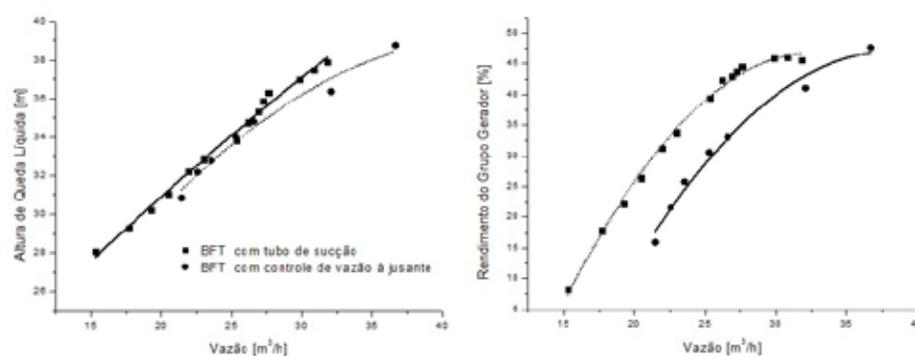


Figura 30. Comparação da altura e rendimento para a operação da BFT com tubo de sucção e com controle de vazão à jusante.

Além desta comparação, também foi avaliada a diferença entre as curvas de altura e rendimento teóricos, obtidas de acordo com o procedimento descrito no item 3.4.1. A Figura 31 mostra esta comparação. Percebe-se que o erro é alto, em torno de 20% para baixas vazões. A partir de 70% da vazão nominal, o erro passa a ser de cerca de 5%. O mesmo ocorre com o rendimento, que tem a diferença reduzida ao se aproximar da vazão nominal. Portanto, quando for feito o estudo da viabilidade técnica e econômica para utilizar uma BFT para controle de pressão, deve-se tomar cuidado ao utilizar as curvas teóricas obtidas, principalmente quando a variação de vazão for grande, ou seja, quando a BFT precisar operar com baixas vazões.

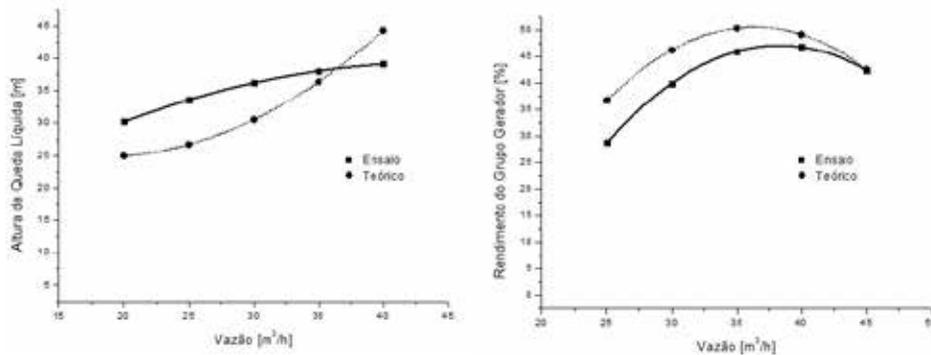


Figura 31. Comparação das curvas teóricas de altura e rendimento com os resultados do ensaio.

### 3.3.3. BFT em um by-pass

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio. É possível observar que, independentemente da vazão total do sistema, a vazão turbinada pela BFT manteve-se constante devido ao controle de pressão em sua entrada. Da mesma forma, a potência elétrica gerada também se manteve constante. Isto mostra a viabilidade do uso de uma VRP para regularizar a operação da BFT, facilitando a aplicação da energia gerada, já que esta não sofrerá alterações.

Tabela 8. Resultados do ensaio realizado na BFT em um by-pass.

Ponto	$Q_{total}$ [m³/h]	$Q_{turbina}$ [m³/h]	$p_l$ [m]	$P_{el}$ [W]
1	38,3	25,1	33,3	743
2	33,5	25,4	33,4	727
3	29,6	25,2	33,5	737
4	25,5	25,5	33,7	749
Média	—	25,3	33,5	739
Desvio-padrão	—	0,17	0,17	9,41
Desvio [%]	—	0,68	0,50	1,27

## 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho mostrou que o potencial energético em sistemas de abastecimento de água está presente em diferentes pontos do sistema, como captações de água bruta, distribuição entre reservatórios e até mesmo diretamente na rede de distribuição, em válvulas redutoras de pressão. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2010), o Brasil possui aproximadamente 660 prestadores de serviços de água, sendo que em muitos deles existe um potencial energético.

Para que estes aproveitamentos possam ser viáveis técnica e economicamente, é necessário estudar a operação de cada sistema, pois sua operação é única, e dificilmente será igual à de outro sistema. Com os estudos realizados nos três sistemas, foi possível atingir o objetivo de criar metodologias específicas para análise do potencial em cada um dos casos. Dentre as alternativas propostas, destacam-se:

- utilização de by-pass e VRP em adutoras por gravidade, a fim de manter a BFT em um ponto de operação constante, aumentando a confiabilidade e facilidade de sua operação;
- alteração na operação de reservatórios que recebem água através de adutoras por gravidade, com o objetivo de maximizar a potência disponível;
- utilização de BFTs específicas para diferentes períodos do dia no lugar de VRPs, melhorando o controle de pressão na rede.

Devido à existência de componentes de uma central, tais como câmara de carga e conduto forçado, os casos das adutoras de água bruta e tratada se mostraram atrativos economicamente. No caso da utilização da BFT para controle de pressão, não houve viabilidade econômica, já que esta deve ser avaliada considerando apenas os benefícios resultantes da geração de energia e a redução do investimento inicial, devido ao menor custo da BFT com relação à VRP, já que ambas exercem a função de controle de pressão. Sistemas que utilizem VRPs em setores com maior consumo de água podem apresentar viabilidade, já que a potência gerada será maior.

Entretanto, os testes realizados em laboratório mostraram que há uma queda no rendimento quando a BFT opera com controle de vazão à jusante. Além disso, os métodos propostos para determinar o comportamento da BFT fora de seu ponto de máxima eficiência mostraram diferenças quando comparados com os resultados obtidos em laboratório. Isto pode gerar erros no projeto da microcentral, que podem definir sua viabilidade. Portanto, sempre que possível, recomenda-se que seja feito o ensaio na BFT para obter suas reais condições de operação e, assim, garantir o sucesso do projeto. Já o ensaio realizado para verificar a regularização do ponto de operação da BFT

através do uso de uma VRP mostrou que é possível manter a potência elétrica gerada constante, o que facilita a operação da microcentral.

Algumas novas linhas de pesquisa podem ser criadas a partir deste tema, como o aprimoramento dos métodos de obtenção das curvas teóricas das BFTs para melhorar a previsão de seu comportamento hidráulico, a utilização de conversores de frequência para controlar a pressão na saída da BFT, realizando a geração em rotação variável, avaliação da cavitação da BFT nas diferentes condições hidráulicas encontradas, o estudo do potencial energético em sistemas de esgotamento sanitário e o comportamento das BFTs neste caso.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12218** – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482/2012**. Brasília: ANEEL, 2012.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de Hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1998.

BUDRIS, A. R. Multiple “Pump as Turbine” Installations Keep Efficiency High Over Wide Flow Range. **Water World**, 2011.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO, F. Spring: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-oriented Data Modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, p. 395-403, 1996.

CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. Manual on Pumps Used as Turbines. **MHPG Series**, v. 11, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany, 1992.

GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água**. 3 ed. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 ago. 2011.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0 User's Manual**. Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, 2000.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos** – 2010. Brasília, DF, 2010.

TIAGO FILHO, G. L. **Oportunidades em PCH** – desafios de mercado e tecnológico. VI Conferência de PCH: Mercado e Meio Ambiente, São Paulo, 2008.

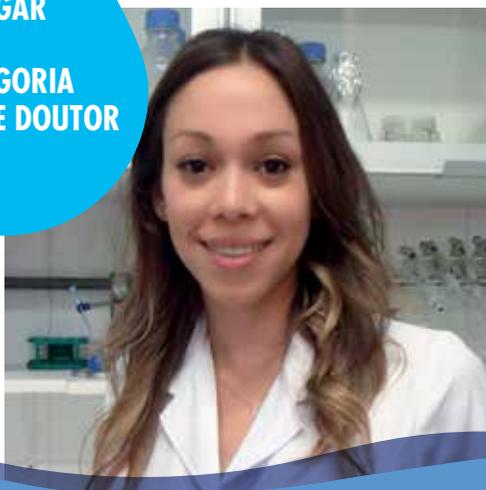
VIANA, A. N. C. et al. **Conservação hidroenergética**. Projeto de Pesquisa, Eletrobras, 2011.



2º

LUGAR

CATEGORIA  
MESTRE E DOUTOR



Cláudia Carolina Silva Evangelista, 24 anos

Universidade de São Paulo (USP)

São Paulo - SP

## REDUZINDO DRASTICAMENTE NOSSA DEPENDÊNCIA DE ÁGUA NA AGRICULTURA POR MEIO DA ANIDROBIOSE

### RESUMO

A seca é um problema que atinge o Brasil anualmente, prejudicando milhões de brasileiros. Investimentos exorbitantes de bilhões de reais são feitos todos os anos pelo Governo Federal em medidas que, no geral, são apenas paliativas. As perdas econômicas são enormes, tanto para os grandes produtores, quanto para a agricultura familiar.

Em períodos de estiagem, como gerir de maneira inteligente os escassos recursos hídricos entre o consumo humano e animal, a produção de energia e a agricultura?

Intrigantemente, algumas espécies animais e vegetais desenvolveram uma estratégia sofisticada e bela de sobrevivência à seca extrema: a anidrobiose ("vida sem água"). Uma vez que estas espécies entram neste estado ametabólico, tornam-se as estruturas de natureza biológica mais resistentes de que se tem conhecimento, suportando não apenas a dessecação extrema, mas também diversos fatores abióticos.

Nossa proposta de gestão inovadora dos recursos hídricos aplicada ao uso do solo visa à otimização do uso das águas em período de secas. Vislumbramos uma estratégia sem precedentes: a preservação de plantações através da anidrobiose. Neste cenário, os recursos hídricos seriam redirecionados, i.e., preferencialmente investidos no consumo humano e animal e na produção de energia. Não haveria a necessidade de se utilizar volumes incalculáveis

de água para irrigar as grandes extensões de terra em uso agrícola, uma vez que estas plantas poderiam ser reversivelmente preservadas a seco pelo processo de anidrobiose.

Para isto, objetivamos neste projeto científico identificar genes associados ao processo de anidrobiose em uma espécie modelo. Este é o primeiro passo e o mais fundamental para a engenharia anidrobiótica de plantações.

Realizamos uma triagem funcional via interferência por RNA (RNAi) de ~100 genes possivelmente associados à anidrobiose, uma abordagem inédita no mundo. Identificamos algumas das principais etapas no processo de anidrobiose: transporte controlado de água, reparação de danos oxidativos, controle do envelhecimento de proteínas e ativação de sinalização celular/proteica. Estes resultados ajudam a compreender as bases moleculares da anidrobiose e podem ser utilizados para o uso da engenharia anidrobiótica na agricultura.

Palavras-chave: anidrobiose, seca, estresse hídrico, dessecação, animação suspensa.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 O impacto das secas na agricultura

Em 2013, o Brasil enfrentou a pior seca registrada nos últimos 50 anos, superando o ano anterior, em que já havia batido o seu recorde (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2013). Segundo dados do Governo Federal, 1.415 municípios sofrem os efeitos da seca, afetando quase 22 milhões de brasileiros. A falta de chuvas atinge mais de 90% dos municípios do semiárido, ultrapassando a extensão das 1.135 cidades que o compõem (DILMA..., 2013).

O semiárido brasileiro, principalmente o chamado Polígono das Secas, é a área mais atingida, estendendo-se por oito estados da região Nordeste (AL, BA, CE, PB, PE, PI, RN e SE), além do norte de Minas Gerais, totalizando uma extensão territorial de mais de 980 km<sup>2</sup>.

Em virtude da situação cada vez mais agravante, o Governo Federal está investindo R\$ 32 bilhões em obras estruturais, com o intuito de garantir o abastecimento de água de forma definitiva, como barragens, canais, adutoras e estações elevatórias. Além disso, no início do mês de abril, foi anunciado o investimento de mais R\$ 9 bilhões em ações para enfrentar a estiagem (DILMA..., 2013).

As perdas diretas nas lavouras da região chegaram aos R\$ 3,6 bilhões em 2012 e afetaram tanto grandes produtores de cana-de-açúcar, soja,

algodão e tabaco, quanto agriculturas familiares, que são responsáveis pela produção dos principais alimentos consumidos pela população brasileira, como: mandioca, feijão e milho, este último sendo também principal fonte de alimentação de bovinos.

No início de 2013, Aldemir Freire (economista-chefe do IBGE em Natal) fez um balanço da situação econômica, comparando valor e quantidades de dez culturas (feijão, castanha-de-caju, arroz, mandioca, milho, algodão, banana, cana-de-açúcar, café e soja) produzidas na região em 2011 e 2012. O tombo estimado, a valores de 2011, foi de 18%: R\$ 20,1 bilhões para R\$ 16,5 bilhões, sendo que feijão (R\$ 961 milhões) e milho (R\$ 532 milhões) lideraram as perdas. “O prejuízo equivale, por exemplo, a quase metade do valor total da obra de transposição do rio São Francisco, a mais importante da região, orçada em R\$ 8,2 bilhões”, e a situação fica cada vez mais crítica, com a previsão de ainda mais seca entre junho de 2013 e fevereiro de 2014 (PIOR..., 2013).

## 1.2 A anidrobiose

Apesar de todo este cenário gerado pela seca, quando voltamos nosso olhar para a biologia e seus inúmeros fenômenos (desenvolvimento, evolução, cognição, socialização), encontramos processos admiravelmente belos. Um deles se destaca por ser fascinante, contraintuitivo e cujas aplicações biotecnológicas são revolucionárias: a anidrobiose.

A anidrobiose (an-: sem; hidro: água; bios: vida; “vida sem água” em uma tradução livre) é uma estratégia sofisticada e bela de sobrevivência que algumas espécies utilizam diante da seca extrema (extensivamente revisto em KEILIN, 1959; CROWE, 1971; TUNNACLIFFE; LAPINSKI, 2003). Ela pode ser observada, por exemplo, em larvas de uma espécie de mosca africana chamada *Polypedilum vanderplanki* (fig. 1). Os ovos desta mosca são comumente depositados em pequenas poças de água sobre as rochas. Ao eclodirem, as larvas iniciam uma fase de desenvolvimento rápido. Contudo, o sol causticante e as altas temperaturas podem facilmente secar estas pequenas piscinas, dando fim ao ambiente aquoso fundamental para o crescimento das larvas. Diante deste cenário aterrador para estes organismos, observando minuto após minuto a evaporação da água que os cercam, aproximando-se inexoravelmente da morte por desidratação, as larvas de *P. vanderplanki* fazem algo espetacular aos olhos de qualquer observador. Estes organismos aparentemente frágeis, provavelmente vistos como pequenas vítimas do acaso, respondem ao desafio desencadeando uma série de respostas moleculares, fisiológicas e anatômicas que permitirão que eles entrem literalmente no limbo da existência: transformar-se-ão em estruturas semelhantes a cristais biológicos

(WATANABE et al., 2006; revisto em CORNETTE; KIKAWADA, 2011).

Estas larvas irão desidratar-se de maneira controlada e simultaneamente acumular proteínas e açúcares dentro de suas células. A água, que mantinha a estrutura das proteínas e a integridade das membranas celulares, agora se vai. Mas estas proteínas e moléculas de açúcar irão formar um biovidro (do inglês, *bioglass*) que substituirá a matriz aquosa por uma matriz sólida (SAKURAI et al., 2008).

Quando toda a poça de água tiver secado e eventuais outras espécies habitantes deste pequeno oásis tiverem morrido por dessecação, as larvas de *P. vanderplanki* estarão adormecidas, em um estado de animação suspensa - a anidrobiose. Elas não estarão mais vivas, pois não há metabolismo; contudo, elas também não morreram. Justifica-se, portanto um de seus nomes, "quironomídeo adormecido" (*sleeping chironomid*).

Após dias e dias de calor insuportável, vem a tão esperada chuva. Esta bênção dos céus traz consigo a semente da vida: a água. Ao cair sobre as rochas, formam-se novamente as pequenas poças de água. Em uma destas várias pedras, estão as larvas dessecadas de *P. vanderplanki*. As pequenas moléculas de água entram neste corpo retorcido, escuro, que mais parece um grão de areia ou uma partícula de sujeira, como pó, e fazem reviver *P. vanderplanki*. Este processo de reidratação faz estas larvas saírem desse estado de suspensão da vida e as traz de volta à vida, retomando todo o metabolismo, fisiologia e desenvolvimento.

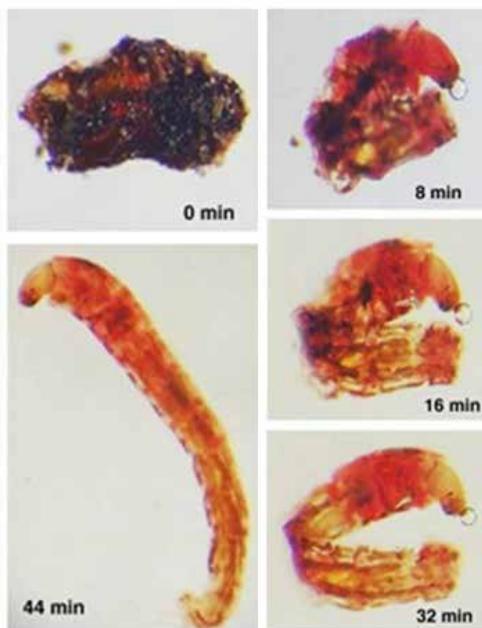


Figura 1. Larva do quironomídeo *Polypedilum vanderplanki* em processo de ressurreição que dura 44 minutos (retirado de WATANABE et al., 2006).

Fosse apenas pelo fato de evitar a morte através da cristalização, a anidrobiose já seria impressionante. Mas ela é muito mais do que isto. Esta bela e breve descrição revela apenas parte de um mecanismo muito mais fabuloso, que ocorre não apenas nestas larvas, mas em diversas outras espécies anidrobióticas, tais como alguns vermes (*Panagrolaimus superbus*) e certas espécies de plantas da ressurreição (*Myrothamnus flabellifolia* e *Selaginella lepidophylla*, fig. 2).



Figura 2. Superior: Espécime adulto do verme de vida livre anidrobiótico *Panagrolaimus superbus*, modelo deste estudo. Inferior: Planta da ressurreição, *Selaginella lepidophylla*, em dois estados: viva e em anidrobiose.

Uma vez que estas espécies entram neste estado ametabólico (i.e., em fase sólida), tornam-se as estruturas de natureza biológica mais resistentes de que se tem conhecimento. Não apenas suportam a dessecação extrema, mas agora também são resistentes a temperaturas extremas. Pode-se, por exemplo, mergulhar estes animais em nitrogênio líquido ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) e eles não perdem a viabilidade. A anidrobiose gera uma estabilidade tão grande que a imersão em hélio líquido ( $269^{\circ}\text{C}$  negativos, temperatura que não ocorre em nenhum ambiente natural de nosso planeta) não é letal. Nem mesmo impressionantes  $-273,1^{\circ}\text{C}$  (apenas  $0,05$  grau Celsius acima do zero absoluto) foram capazes de danificar organismos em estado de anidrobiose (BECQUEREL, 1950a; 1950b). Estes mesmos organismos resistem se forem aquecidos a  $100^{\circ}\text{C}$  logo após o congelamento, eventualmente suportando até  $151^{\circ}\text{C}$  (revisto em CROWE, 1971).

Este estado de anidrobiose, ou resistência à dessecação extrema, reserva em suas mangas outras surpresas. Ele torna os animais resistentes também à radiação ultravioleta e raios X. Estes tipos de radiação, que são letais para toda e qualquer forma de vida que conhecemos, não são problemas para os organismos que estão em anidrobiose. Estudos revelaram que, de fato, a radiação danifica o DNA destes organismos, mas eles são capazes de literalmente reconstruir todo seu genoma em poucas horas (ZAHRADKA et al., 2006).

Por fim, a anidrobiose confere também resistência ao vácuo e à pressão hidrostática extrema. Vermes expostos a uma pressão de  $\sim 6.000$  atmosferas mantiveram viabilidade (SEKI; TOYOSHIMA, 1998). A maioria dos animais e plantas na superfície da Terra estão expostos a uma pressão de apenas 1 atmosfera.

### **1.3 A proposta: reduzir as perdas na agricultura através de estratégias baseadas na anidrobiose**

Nossa proposta se baseia em uma estratégia revolucionária e sem precedentes: a preservação de plantações através da anidrobiose. Este conceito permitiria uma gestão inovadora e inteligente dos recursos hídricos durante a seca, direcionando-os para outros setores (consumo humano, animal e geração de energia) (fig. 3).

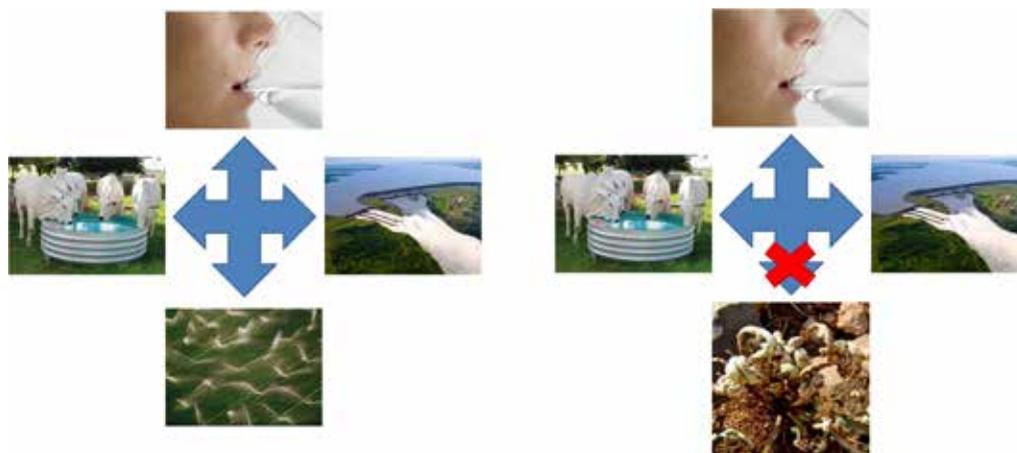


Figura 3. Nossa proposta de gestão inovadora de águas aplicada ao uso do solo em tempos de seca. Esquerda: em tempos de chuvas, os quatro setores (consumo humano, animal, irrigação e geração de energia) são bem abastecidos com água. Direita: em períodos de estiagem, a preservação das plantações via anidrobiose não apenas evitaria as perdas na agricultura como também possibilitaria o redirecionamento dos recursos hídricos.

Apesar de todo o desenvolvimento em tecnologias de previsão do tempo e de distribuição da água entre as grandes regiões do Brasil, ano após ano temos presenciado a perda de lavouras em períodos de estiagem prolongada. Tratam-se de perdas não apenas para a população geral, refletidas em uma redução da oferta de produtos agrícolas e aumento de seus preços, mas também para os agricultores, que, em muitos casos, perdem tudo: o investimento, as terras e seus bens para cobrir os empréstimos obtidos nos bancos.

Vemos nos noticiários os casos de agricultores relatando a situação limítrofe de suas plantações. A lavoura começa a definhando perante a redução da água no solo, e o pequeno e médio agricultor diz: "Se não chover em poucos dias, toda minha lavoura será perdida!" Semanas depois, a chuva vem, mas é tarde demais: tudo foi perdido poucos dias antes - as plantas sucumbiram à desidratação.

Nosso projeto vislumbra um cenário semelhante, mas com desfecho bem diferente. Imaginamos plantações protegidas por estratégias baseadas em anidrobiose. Plantas que não morreriam diante da seca, mas entrariam em animação suspensa. Não podemos controlar o tempo/clima, mas poderíamos resguardar nossas lavouras em meio à estiagem.

Visualize um pequeno produtor que espera colher seus frutos 100 dias após a semeadura. Apenas 14 dias antes da colheita, uma dramática alteração no

clima ocorre e uma forte estiagem se estabelece. No cenário a que estamos acostumados, o agricultor e sua colheita estariam fadados à desgraça. Contudo, se compreendêssemos as bases moleculares da anidrobiose - quais são os genes responsáveis por este processo de cristalização, de resistência à dessecação extrema -, poderíamos tornar as plantas de interesse econômico em organismos anidrobióticos. Nesta história, apenas 14 dias antes da colheita, a plantação não morreria, simplesmente entraria em animação suspensa: totalmente resistente à seca. Quando a chuva chegasse, com 4 semanas (ou mais) de atraso, a água traria a vida de volta às plantas, e a colheita estaria garantida.

#### 1.4 Os desafios para a engenharia anidrobiótica

Os segredos para o desenvolvimento deste cenário são dois: (i) descobrir as bases genéticas da anidrobiose e (ii) aplicar este conhecimento, transformando plantas comuns em anidrobióticas.

O primeiro desafio é a base da engenharia anidrobiótica, sendo, portanto, o tema do projeto aqui apresentado: identificar os genes responsáveis por conferir resistência à dessecação extrema. Uma vez que conheçamos estes genes e, conseqüentemente, as proteínas por eles codificadas, compreenderemos como a anidrobiose ocorre.

O segundo aspecto se refere a utilizar este conhecimento para converter plantas de interesse comercial (setor alimentício, têxtil etc.) em resistentes à seca. Duas das possíveis estratégias para se alcançar este objetivo são: (a) modificação genética das plantas, para expressarem estes genes durante períodos de seca, fazendo-as entrar em animação suspensa como processos endógenos ou (b) pulverização nas plantações com uma solução de cristalização - composta pelos açúcares e proteínas naturalmente acumulados em animais e plantas anidrobióticas.

Plantas transgênicas expressando genes associados à anidrobiose seriam naturalmente resistentes à seca, pois estariam aptas a se cristalizar em condições desfavoráveis. Por outro lado, a pulverização de colheitas com uma solução de cristalização também seria factível devido a duas evidências: uma natural e uma experimental.

A evidência natural deriva das mitocôndrias de animais anidrobióticos. Elas são organelas com membranas e genomas próprios, cujos genes não codificam proteínas associadas à anidrobiose. Pelo contrário, todos os dados atuais indicam que estes genes são majoritariamente nucleares. Contudo, quando um animal entra em anidrobiose, todas as suas estruturas celulares são preservadas, incluindo as mitocôndrias. Este fato evidencia que uma estrutura

não anidrobiótica (a mitocôndria) “imersa” em um meio de cristalização (citoplasma da célula do anidrobioto) é capaz de internalizar os açúcares e proteínas disponíveis no citoplasma, os quais promoverão sua cristalização junto com o restante da célula.

A segunda evidência é de natureza experimental. A imersão de partículas virais (utilizadas para vacinação) em uma solução baseada em anidrobiose foi capaz de preservar a validade (i.e., imunogenicidade e título) desta vacina por meses a 45°C (ALCOCK et al., 2010). Estes dados demonstram claramente que, mesmo não codificando os genes associados à anidrobiose, os vírus e mitocôndrias podem ser conservados a seco após simples imersão em meio contendo componentes acumulados em anidrobiotos. O mesmo poderia ser tentado em plantas.

### **1.5 O uso da Interferência por RNA (RNAi) para identificação de genes associados à anidrobiose**

A técnica de interferência por RNA (RNAi) permite o silenciamento (inativação) de genes de maneira específica através de moléculas de RNA dupla fita (dsRNAs). A inativação de um determinado gene pode promover uma alteração fenotípica na célula ou no organismo; por exemplo, a planta teria uma estatura menor. Portanto, indiretamente, a RNAi permite identificar a função dos genes: neste caso, o gene silenciado está relacionado com o crescimento vegetal.

Recentemente, a RNAi foi utilizada também para a identificação de genes associados à anidrobiose no verme anidrobiótico *Panagrolaimus superbus*. A estratégia nestes estudos é simples: os vermes são alimentados com bactérias expressando dsRNAs, que promoverão a inativação de um determinado gene. Em seguida, os vermes são dessecados por 24 horas, posteriormente reidratados e a viabilidade determinada (REARDON et al., 2010).

Se inativarmos um gene não relacionado ao processo de anidrobiose, a população de vermes conseguirá entrar em animação suspensa e, após reidratação, apresentará uma elevada viabilidade (grupo controle).

Entretanto, se inativarmos um gene envolvido no processo de anidrobiose, a população de vermes não conseguirá entrar em animação suspensa e, após reidratação, apresentará uma queda de viabilidade em relação ao grupo controle. Pode-se, assim, identificar de maneira funcional quais genes são associados à anidrobiose.

Nosso interesse é utilizar a engenharia anidrobiótica para fins agrônômicos, e existem plantas anidrobióticas que poderiam ser usadas como modelo de

pesquisa para a identificação de genes associados à dessecação extrema. Contudo, decidimos utilizar o verme nematoide de vida livre *Panagrolaimus superbus* (fig. 2) como modelo de pesquisa por uma série de motivos.

Primeiramente, devido à sua simplicidade como um modelo de pesquisa: ele é muito pequeno (~1 mm de comprimento), conseqüentemente demandando pouco espaço, seu ciclo de vida é curto (de reprodução rápida) e possui baixo custo de manutenção. Ele é ainda uma espécie muito próxima ao *C. elegans*, que é um modelo de pesquisa mundialmente utilizado, para o qual diversas técnicas já estão bem estabelecidas e descritas. Adicionalmente, a utilização de RNAi demanda dois elementos: (i) que a espécie seja suscetível ao silenciamento e (ii) que o genoma ou o transcriptoma da espécie sejam conhecidos. Nenhuma planta anidrobiótica cumpre ambas as premissas, mas *P. superbus* sim. Por fim, o processo de anidrobiose entre espécies diferentes compartilha diversos aspectos comuns, como a acumulação de açúcares e proteínas do tipo LEA (BROWNE et al., 2002), sugerindo que a via de anidrobiose deste nematoide poderia ser utilizada para a engenharia anidrobiótica em plantas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos gerais

Os objetivos gerais deste projeto são: (i) identificar os genes responsáveis pela anidrobiose no verme nematoide *P. superbus* e (ii) conhecer mais profundamente o papel de um destes genes no processo de resistência à dessecação extrema.

### 2.2 Objetivos específicos

- 1) Testar duas novas estratégias de RNAi em *P. superbus*:
  - via imersão em solução contendo moléculas longas de RNA dupla fita (dsRNAs); e
  - via imersão contendo moléculas curtas de RNA dupla fita (siRNAs de 27 pb).
  
- 2) Utilizar estas estratégias de RNAi para avaliar o envolvimento de ~100 genes candidatos ao processo de anidrobiose nos vermes *P. superbus*.
  
- 3) Realizar ensaios de resistência ao estresse oxidativo em animais cujo gene

peroxiredoxina foi silenciado por RNAi. Este ensaio visa conhecer o papel deste gene específico no processo de resistência à dessecação extrema.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Manutenção dos nematoides

Populações de *P. superbus* foram mantidas em incubadoras a 21°C, no escuro, em placas com NGM ágar (Nematode Growth Medium, meio de crescimento de nematoides) e alimentadas com uma camada de *Escherichia coli* (linhagem OP50).

#### 3.2 Avaliação da imersão como um meio para desencadear RNAi

Três siRNAs de 27 pb (“substratos de dicer”) contra o gene *ifb-1* (filamento intermediário B 1; número de acesso EU368943) e três contra actina (número de acesso EU368944.1) de *P. superbus* foram desenhados utilizando o programa gratuito Strand Analysis (PEREIRA et al., 2007). Estas moléculas são duplexes de RNA de 27 pb, com dois nucleotídeos desapareados na porção 3’ e um grupo fosfato na extremidade 5’. Como controle negativo, foi desenhado um substrato de dicer contra GFP (número de acesso X83960). Os substratos de dicer foram adquiridos da empresa Sigma-Aldrich.

Os vermes (*P. superbus*) foram coletados das placas de manutenção e lavados com tampão M9. Em seguida, foram transferidos para tubos de 1,5 ml contendo diferentes concentrações de substratos de dicer (0,1 µM, 1 µM e 10 µM, em triplicata) e mantidos no escuro durante 24 horas, sem agitação, a 21°C. Os volumes finais de todos os tubos foram de 100 µL. Os vermes foram imersos em soluções contendo uma das seguintes moléculas: i) substrato de dicer contra GFP (controle negativo); ii) substrato de dicer contra *ifb-1* 1; iii) substrato de dicer contra *ifb-1* 2; iv) substrato de dicer contra *ifb-1* 3; v) uma mistura equimolar de substratos de dicer contra *ifb-1* 1, 2 e 3; ou vi) uma mistura equimolar de substrato de dicer contra actina 1, 2 e 3.

Alternativamente, cerca de 200 vermes foram imersos em uma solução de 35 µL de dsRNA 5K, dsRNA 11K ou dsRNA GFP (0,86 µg/µL, diluído em 5 mM Tris-HCl).

### 3.3 Triagem de ~100 genes potencialmente envolvidos na anidrobiose em *P.*

#### *superbus*

**Seleção dos alvos.** Um total de 99 alvos potenciais (além de 3 controles positivos) foi considerado para a triagem (anexo 1). O primeiro grupo englobava 34 cDNAs relacionados a quinases, obtidos a partir de uma população mista de *P. superbus* e clonados no vetor pDNR-Lib. Estes alvos foram selecionados porque os processos de sinalização são supostamente muito importantes para os animais entrarem em anidrobiose. O segundo grupo abrangia genes que se mostraram superexpressos durante a anidrobiose em outras espécies animais (ADHIKARI et al., 2009; HAEGEMAN et al., 2009; MALL et al., 2010; SCHOKRAIE et al., 2010; BOSCHETTI et al., 2012; EYRES et al., 2012; SCHOKRAIE et al., 2012; TYSON et al., 2012; YAMAGUCHI et al., 2012). Um grupo de 65 alvos foi selecionado considerando os seguintes aspectos: (i) genes que demonstraram serem induzidos em uma espécie (ou mais) durante anidrobiose; e (ii) existência de homólogo(s) dentro da biblioteca EST de *P. superbus*. Consequentemente, a tabela do anexo 1 engloba 102 genes: 99 genes candidatos e 3 controles positivos.

**Interferência por RNA.** RNAi foi desencadeada por imersão de 200-600 vermes por 24 horas, no escuro, em soluções com dsRNAs na concentração final de 0,8 µg/mL (volume de imersão: 35 µL) ou substratos de dicer (siRNAs de 27 pb) na concentração final de 1 µM (volume de imersão: 100 µL). Os dsRNAs foram produzidos por transcrição *in vitro*, usando uma abordagem modificada desenvolvida por Yu et al. (2002). Resumidamente, 500 nanogramas de cDNA alvo (clonado em pDNR-Lib vector) foram submetidas a PCR utilizando primers que ancoram ao vector e apresentam uma cauda do promotor T7. A PCR foi realizada com a GoTaq DNA Polymerase (Promega), em 50 µL de volume de reação, sob as seguintes condições: 94°C por 5 minutos (um ciclo), 94°C por 30 segundos, 53°C por 30 segundos, 72°C por 1 minuto (33 ciclos), 72°C por 10 minutos (1 ciclo). Os produtos resultantes da amplificação foram precipitados com isopropanol, ressuspensos com água ultrapura e submetidos à transcrição *in vitro* (TranscriptAid T7 High yield transcription kit; ThermoScientific), seguida por tratamento com DNase I, de acordo com as instruções do fabricante. Os dsRNAs foram então diluídos para 1 µg/µL com água ultrapura e Tris-HCl (pH 6,8) foi adicionado a uma concentração final de 5 mM.

Outros 14 genes de *P. superbus* foram amplificados por RT-PCR (exatamente como descrito para GP41, item 3.4) e clonados no vector pCR 2.1 TOPO (Invitrogen). Estas sequências clonadas foram utilizados como moldes para uma segunda rodada de PCR, do mesmo modo como foi feito com pDNR-Lib, mas agora utilizando primers gene-específicos e T7. Os fragmentos

amplificados resultantes puderam ser facilmente utilizados para a transcrição *in vitro*, tal como descrito antes.

Cinquenta substratos de dicer foram desenhados como descrito anteriormente, com a adição de grupos de fosfato nas porções 5' terminais, e foram adquiridos da Sigma-Aldrich.

**Confirmação do silenciamento gênico por RT-PCR.** A confirmação do silenciamento gênico foi realizada por RT-PCR, exatamente como descrito para GP41 (item 3.4). Os primers utilizados para dsRNAs (5K e 11K) e siRNAs (ifb-1) foram desenhados no programa "Gene Runner" e adquiridos da Sigma-Aldrich.

**Desafio de dessecação.** Para identificar os genes relacionados à anidrobiose, os vermes foram submetidos ao desafio de dessecação de acordo com Shannon et al. (2005). Resumidamente, os vermes silenciados foram imobilizados em membranas filtrantes Supor 0,45 µm (Sigma-Aldrich) por filtração a vácuo com um funil de Sartorius, colocados em tubos de 1,5 mL e, em seguida, submetido às seguintes condições: 98% de umidade relativa (UR) por 24 horas numa solução saturada de sulfato de cobre (a menos que indicado de outra forma), 10% de UR por 24 horas em sílica gel seca e pré-hidratação em 100% de umidade relativa por 24 horas em vapor de água destilada. A reidratação foi realizada por 24 horas pela adição de 1,5 mL de tampão M9 às amostras. A porcentagem de sobrevivência foi analisada por coloração com Eritrosina B e microscopia.

**Ensaio de letalidade.** A fim de determinar se a diminuição na sobrevivência foi devido à interrupção do processo de anidrobiose ou a uma letalidade não relacionada, as análises de sobrevivência foram também realizadas depois do silenciamento por imersão (mas sem dessecação).

### 3.4 RNAi e confirmação molecular do silenciamento gênico de GP41

Um cDNA com similaridade com a peroxiredoxina (designada GP41, número de acesso no GenBank GR881190), clonado no vetor L4440 (resistência à ampicilina), em *E. coli* HT115 foi gentilmente cedido pela Profa. Dra. Ann Burnell (Universidade Nacional da Irlanda).

Esta linhagem bacteriana é usada para RNAi via alimentação (designada dsGP41) e foi crescida em tubos de 50 mL com LB líquido e ampicilina (50 µg/mL) sob agitação (210 rpm, 37°C) durante a noite. Subsequentemente, os tubos foram centrifugados durante 10 minutos a 3500 g. Os pellets foram ressuspensos com 600 µL de LB líquido com ampicilina e vertidos em placas de Petri contendo NGM ágar e IPTG (1 mM). As placas foram deixadas durante dois dias em temperatura ambiente para induzir a expressão de

dsRNA pelas bactérias.

Os vermes foram então coletados das placas de manutenção com OP50 e lavados com tampão M9. Em seguida, uma pequena quantidade de vermes foi transferida para as placas contendo as bactérias expressando dsRNA contra GP41. Eles ficaram por quase 15 dias se alimentando para garantir o silenciamento de toda a população. Bactérias HT115 contendo GFP clonado no vector L4440 (L4440::GFP, referido como "GFP") foram usadas como controle negativo. Populações alimentadas com bactérias L4440::GP41 são referidas como "dsGP41", "silenciadas para GP41" ou "GP41-silenciadas". O termo "GP41" foi utilizado para se referir ao gene correspondente/cDNA.

A confirmação molecular do silenciamento gênico foi realizada por RT-PCR. O gene da  $\beta$ -actina foi utilizado como controle interno (número de acesso EU368944). Inicialmente, o RNA total foi extraído a partir dos vermes usando o reagente TRIzol (Invitrogen, Carlsbad, EUA) de acordo com as orientações do fabricante. As amostras de RNA foram quantificadas por espectrofotometria e posteriormente diluídas em água ultrapura (livre de RNase) para se obter uma concentração final de 1  $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ . Todas as amostras de RNA foram pré-tratadas com DNase I (Fermentas, Maryland, EUA), seguindo uma versão modificada do protocolo do fabricante: uma unidade de enzima (30 minutos a 37°C), seguida pela adição de outra unidade de enzima (30 minutos a 37°C). As reações de transcrição reversa (RT) foram realizadas utilizando o kit ImProm-ITM (Promega, Madison, EUA) e primers randômicos (500 ng), em um volume final de 20  $\mu\text{L}$ , de acordo com o fabricante. A seguir, a PCR foi realizada utilizando o kit GoTaqR DNA polimerase (Promega, Madison, EUA) de acordo com as instruções do fabricante. A PCR foi realizada utilizando 2  $\mu\text{L}$  de RT e 25 picomoles de cada primer gene-específico (forward e reverso) para "GP41" ou  $\beta$ -actina (tubos separados) em um volume final de 50  $\mu\text{L}$ .

Todas as reações de PCR foram realizadas sob as seguintes condições: 94°C por 5 minutos (1 ciclo), 94°C por 30 segundos, 57°C por 30 segundos, 72°C por 1 minuto (33 ciclos), 72°C por 10 minutos (1 ciclo). Os produtos de PCR foram resolvidos em gel de agarose 1% corado com Sybr Safe (Invitrogen, Carlsbad, EUA). A densitometria das bandas foi feita utilizando o software Image J. A normalização dos dados foi feita dividindo-se o valor obtido para o gene silenciado pelo valor encontrado para  $\beta$ -actina.

### 3.5 Avaliação do papel de GP41 como antioxidante

Os vermes GP41-silenciados (em tampão M9) foram submetidos a estresse oxidativo por adição de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , Synth) para as seguintes concentrações finais: 0  $\mu\text{M}$  (zero), 1  $\mu\text{M}$ , 10  $\mu\text{M}$ , 100  $\mu\text{M}$ , 1 mM,

10 mM, 20 mM e 40 mM. O volume final de todos os tubos foi de 100  $\mu$ L. Estes valores foram selecionados de acordo com estudos anteriores em *C. elegans* (LARSEN, 1993).

As amostras foram, em seguida, homogeneizadas por agitação suave e incubadas a 20°C durante 24 horas. Após este período, o sobrenadante foi removido e 1 mL de Eritrosina B (0,4% w/v) foi adicionada e deixada durante quatro horas. Os vermes foram então lavados três vezes com tampão M9 e as porcentagens de sobrevivência foram determinadas por microscopia (N = 200 para cada grupo).

### 3.6 As análises estatísticas

Os experimentos foram realizados em triplicata (ou quadruplicata) e os dados são apresentados como médias e desvios padrões. As análises estatísticas foram realizadas utilizando "Teste T", "One-Way ANOVA" (com Tukey ou Dunn de post-hoc) ou "Mann-Whitney Rank Sum" com o software SigmaStat. As diferenças estatísticas foram consideradas quando  $p \leq 0,05$ .

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Desencadeamento eficaz de RNAi por imersão dos vermes em duplexes longos e curtos de RNA

Embora a alimentação seja um eficiente método para o desencadeamento de RNAi em *P. superbus*, a imersão em duplexes de RNA apresenta algumas vantagens para triagens de média escala. Portanto, decidimos determinar se imergir *P. superbus* em soluções contendo duplexes de RNA longos (>100 pb) ou curtos (27 pb) também seria uma estratégia eficaz para promover o silenciamento. Conforme podemos verificar por RT-PCR (fig. 4), um silenciamento bem-sucedido foi alcançado via imersão em dsRNAs longos por 24 horas. Da mesma forma, duplexes de RNA com 27 pb (conhecidos como substratos de dicer) também desencadearam RNAi a 0,1  $\mu$ M e 1  $\mu$ M (fig. 4). Como esperado, os substratos de dicer contra regiões distintas de um mesmo alvo promoveram diferentes efeitos de silenciamento (HOLEN et al., 2002). Adicionalmente, um efeito dose-resposta pode ser observado, o aumento em 10 vezes na concentração de todos os substratos de dicer aumentou o efeito do silenciamento. Contudo, a imersão a 10  $\mu$ M levou a efeitos inespecíficos (dados não mostrados).

A eficiência da RNAi também foi avaliada no nível fenotípico, ambos *ifb-1* e *actina* influenciam na mobilidade dos vermes e, como esperado, quase

85% dos vermes de *P. superbus* imersos em um mix de substratos de dicer para ifb-1 (1  $\mu$ M) por 24 horas apresentaram redução dos movimentos. Do mesmo modo, quase 54% e 38% daqueles imersos em mix de actina (1  $\mu$ M) mostraram redução ou ausência de movimentos, respectivamente (dados não mostrados). Por outro lado, cerca de 90% dos vermes do grupo controle (GFP, 1  $\mu$ M) apresentaram movimentação normal. Estes resultados claramente confirmam os dados moleculares anteriores, mostrando o sucesso em desencadear RNAi por imersão em substratos de dicer.

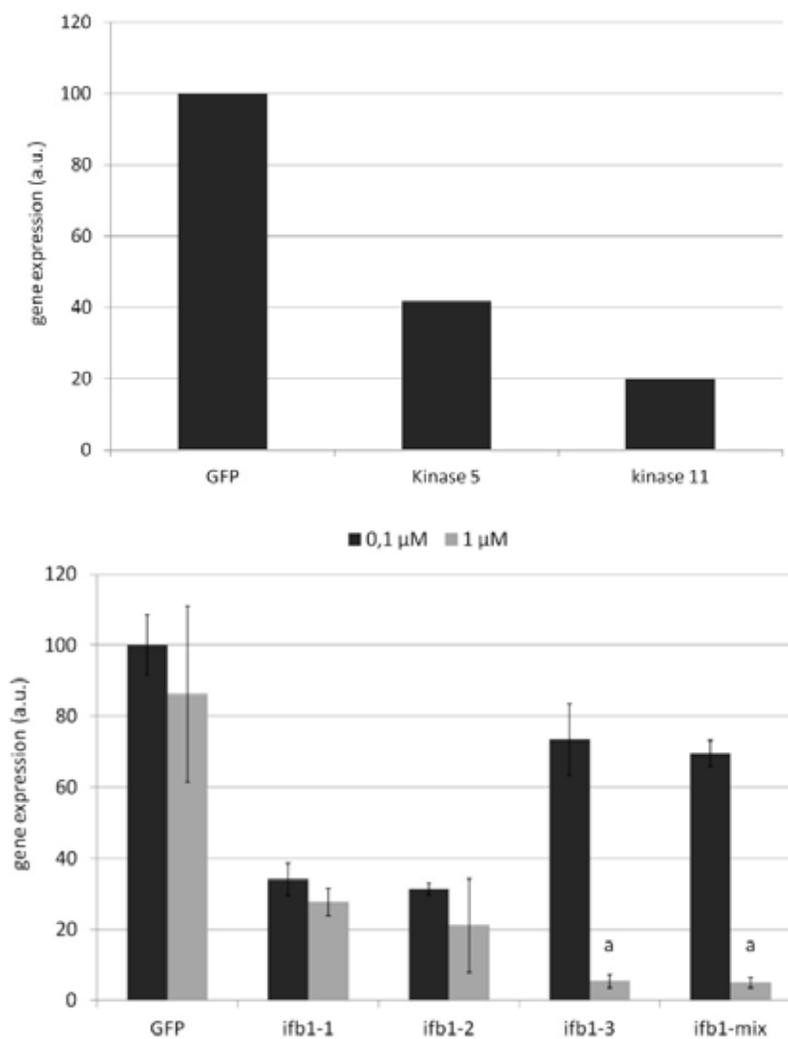


Figura 4. Desencadeamento bem-sucedido RNAi por imersão em *P. superbus*. Imergir vermes em soluções com dsRNAs longos (superior) ou substratos de dicer (inferior) são formas eficazes para desencadear o silenciamento gênico, como comprovado por RT-PCR ("a"  $p < 0,05$  One-way ANOVA on Ranks, Tukey pós-teste).

## 4.2 Identificação de genes relacionados à anidrobiose em *P. superbus*

Com o intuito de identificar genes associados ao processo de resistência à dessecação extrema em *P. superbus*, realizamos uma análise em média escala via RNAi (por imersão). Selecionamos um painel de ~100 genes, a maioria deles com base em estudos de transcriptoma e proteoma de espécies anidrobióticas. Deste painel, quase um terço (35 genes) apresentou alterações na porcentagem de sobrevivência após silenciamento e desafio de dessecação. A maioria destes genes (34) apresentou reduções significativas na viabilidade (de 24% a 64%) (fig. 5), evidenciando o seu envolvimento no processo de anidrobiose. Curiosamente, o silenciamento de um alvo (heat shock protein 70) levou a um ligeiro aumento na sobrevivência (12%) comparado ao controle. Estas reduções na sobrevivência não são devido à letalidade, uma vez que a sobrevivência pós-silenciamento permanece inalterada (dados não mostrados). A imersão dos vermes tanto em dsRNA quanto em siRNA foi efetiva em promover silenciamento gênico.

A maioria dos alvos (25 genes) com diminuição da viabilidade está relacionada com a sinalização celular (quinases), sendo que três são proteínas ribossomais e outros sete não estão diretamente relacionados (enovelamento de proteínas, degradação de proteínas, transporte de água e outros).

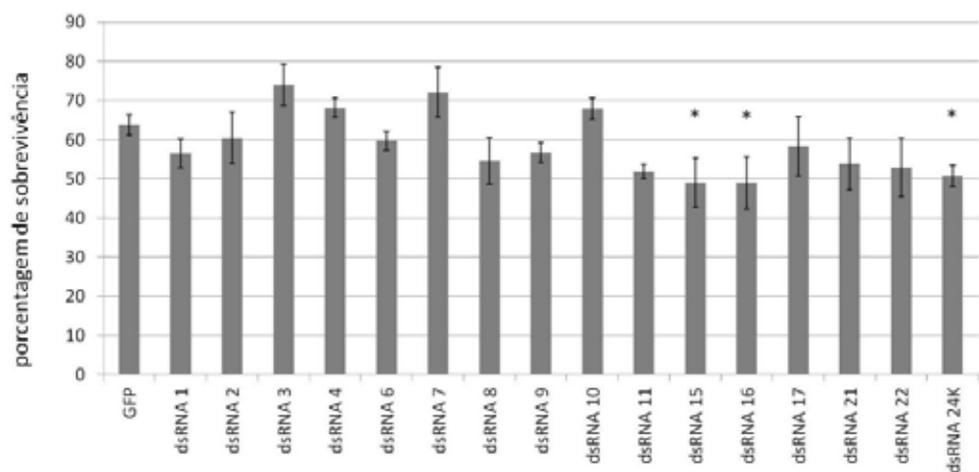


Figura 5A.

A legenda das figuras 5 (A-F) se encontra abaixo da última imagem (F). Os nomes de cada gene alvo estão listados na tabela do anexo 1.

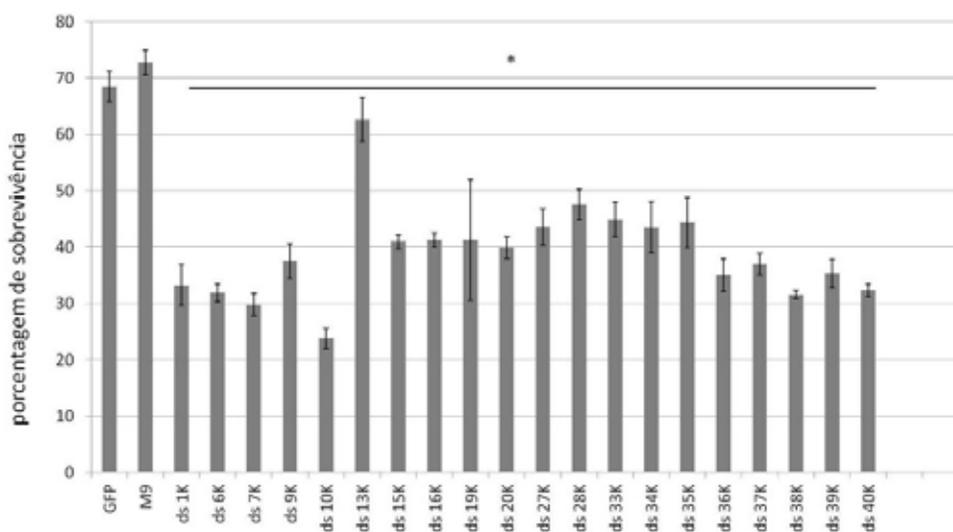


Figura 5B.

A legenda das figuras 5 (A-F) se encontra abaixo da última imagem (F). Os nomes de cada gene alvo estão listados na tabela do anexo 1.

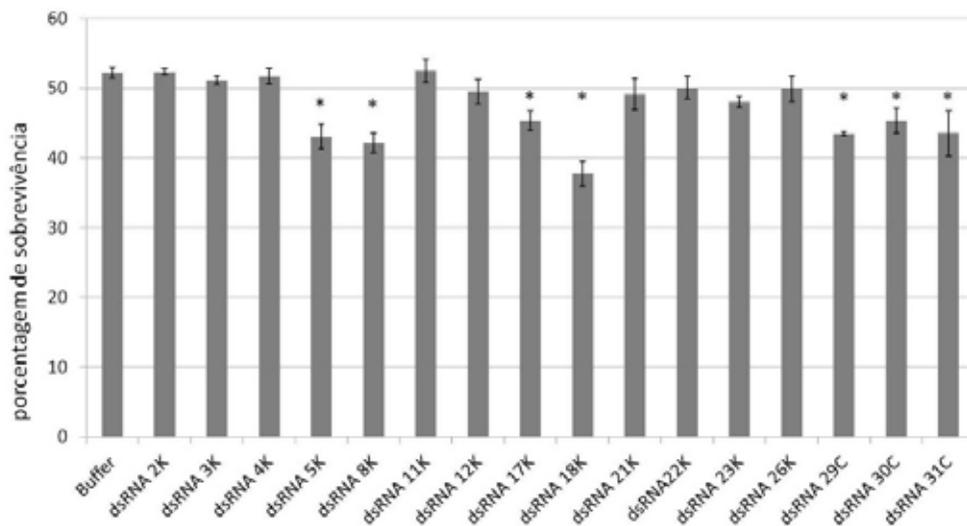


Figura 5C.

A legenda das figuras 5 (A-F) se encontra abaixo da última imagem (F). Os nomes de cada gene alvo estão listados na tabela do anexo 1.

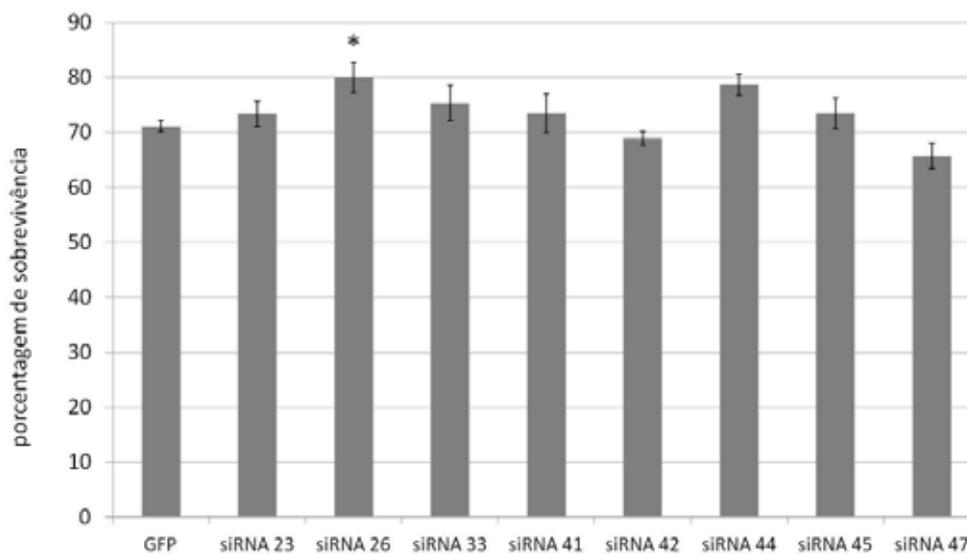


Figura 5D.

A legenda das figuras 5 (A-F) se encontra abaixo da última imagem (F). Os nomes de cada gene alvo estão listados na tabela do anexo 1.

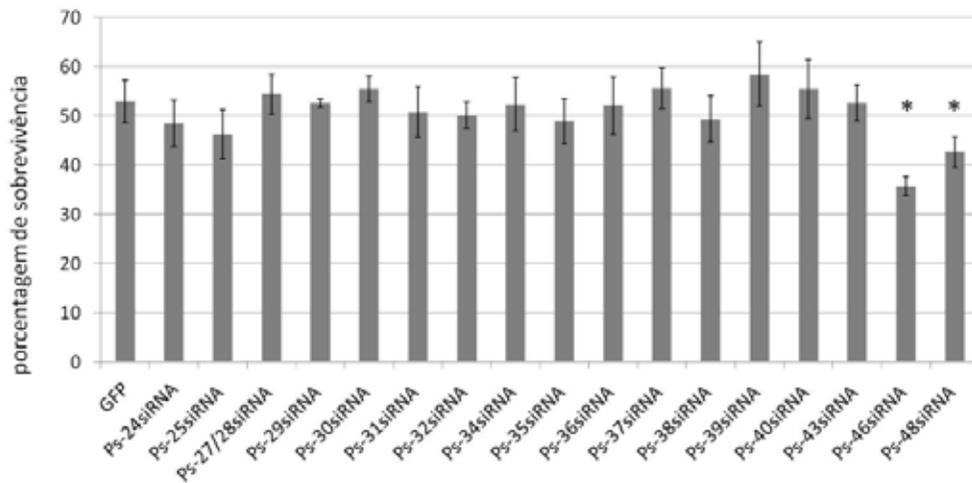


Figura 5E.

A legenda das figuras 5 (A-F) se encontra abaixo da última imagem (F). Os nomes de cada gene alvo estão listados na tabela do anexo 1.

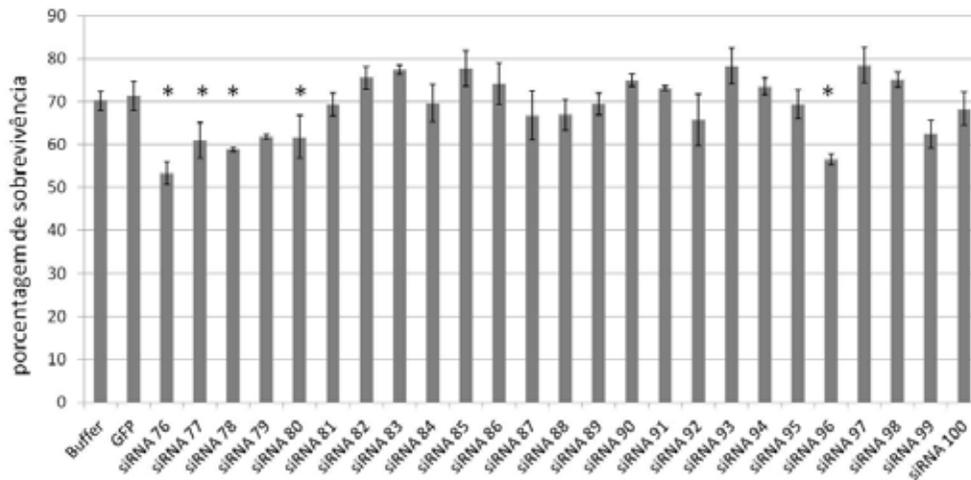


Figura 5F.

Figura 5. Identificação de genes relacionados à anidrobiose em *P. superbus* via RNAi seguido por dessecação. A-F) Seis conjuntos distintos de experimentos foram conduzidos; 35 genes apresentaram mudanças nas porcentagens de sobrevivência após silenciamento e dessecação, além dos três controles positivos (dsRNA 29C, 30C e 31C). Quase todos (34) demonstraram ser importantes para o processo de anidrobiose, tal como avaliado pela diminuição na sobrevivência. (\*  $p < 0,05$ ). Os nomes de cada gene alvo estão listados na tabela do anexo 1.

### 4.3 Confirmação do envolvimento do gene da peroxiredoxina na anidrobiose

O silenciamento gênico via RNAi (por alimentação) foi confirmado por RT-PCR, revelando uma média de redução de 71% dos transcritos para GP41, comparado ao grupo controle (GFP; fig. 6). Antes da dessecação, o silenciamento gênico não teve efeito na viabilidade dos nematoides, evidenciando que GP41 não é um gene essencial (dado não mostrado). Após a dessecação, todos os grupos mostraram um aumento na mortalidade (fig. 7), mas o grupo experimental foi significativamente mais sensível: 66% de redução da viabilidade quando comparado ao controle. Estes dados demonstram, pela primeira vez, a participação da peroxiredoxina (GP41) na anidrobiose do nematoide. Isto é consistente com o estresse oxidativo como sendo um componente significativo de vários vetores de estresse sentidos por nematoides dessecados, como indicado em outros organismos.

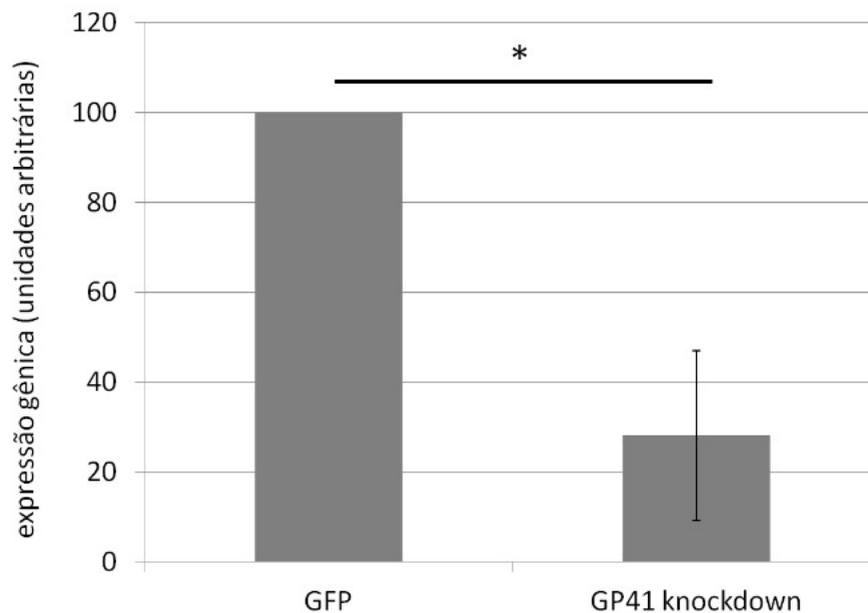


Figura 6. Peroxiredoxina está envolvida com anidrobiose em *P. superbus*. A análise molecular por RT-PCR revelou uma redução média de 71% nos transcritos de GP41 dos vermes submetidos a RNAi por alimentação em relação ao grupo controle (\*  $p \leq 0,05$ ). Grupo "GP41 knockdown" é constituído por vermes cujo gene GP41 foi silenciado.

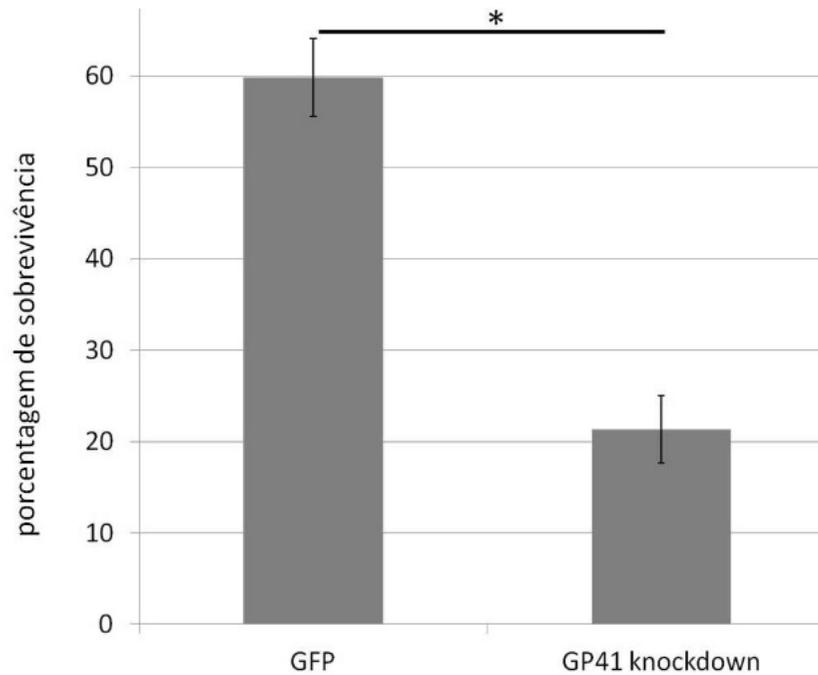


Figura 7. Testes de sobrevivência após a dessecação extrema. GP41 silenciado promoveu uma redução de 66% na porcentagem de sobrevivência quando comparado ao grupo controle (\*  $p \leq 0,05$ ) (N = 200, para cada tratamento). Grupo “GP41 knockdown” é constituído por vermes cujo gene GP41 foi silenciado.

#### 4.4 GP41 atua como um antioxidante

Uma vez que GP41 codifica uma enzima relacionada ao combate ao estresse oxidativo, decidimos investigar se seu envolvimento na anidrobiose estava ligado a uma função específica. Grupos controle e experimental foram expostos a diferentes concentrações crescentes de peróxido de hidrogênio por 24 horas. Para o grupo silenciado para GP41, uma clara redução na sobrevivência (comparada ao controle) pode ser observada a 10 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e foi mais intensa em concentrações maiores (20 mM e 40 mM) (fig. 8). Estes resultados evidenciam claramente que GP41 é importante no controle de danos mediados por espécies reativas de oxigênio (ROS), uma situação esperada durante a desidratação.

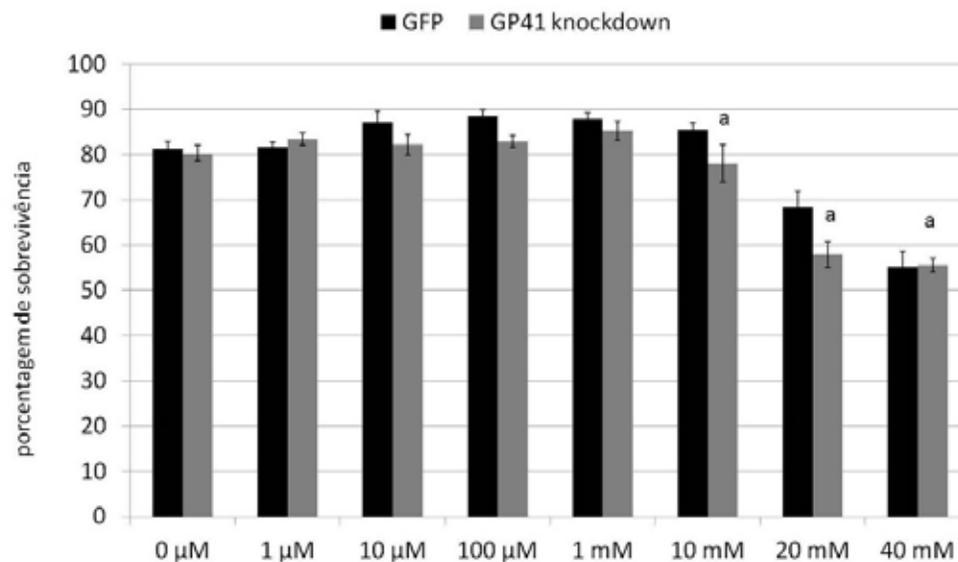


Figura 8. Enzima GP41 combate estresse oxidativo. O silenciamento deste gene reduz o limiar de sensibilidade ao peróxido de hidrogênio. Reduções estatisticamente significativas são encontradas em vermes silenciados para GP41 em 10 mM (“a”  $p < 0,05$ ). Grupo “GP41 knockdown” é constituído por vermes cujo gene GP41 foi silenciado.

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 Identificação de genes associados à anidrobiose

A identificação de genes relacionados à anidrobiose é a peça central no desenvolvimento da engenharia anidrobiótica: a conversão de amostras biológicas (células, tecidos, órgãos e plantas) sensíveis a desidratação em resistentes à dessecação extrema. Isto traria imensos avanços em vários aspectos da agricultura (preservação de plantações diante de períodos de seca), assim como na medicina (transporte de vacinas em temperatura ambiente; preservação de células, tecidos e órgãos para transplante etc.). *P. superbus* é uma espécie anidrobiótica bem estudada, e a validação de genes supostamente relacionados à anidrobiose é possível pela utilização de RNAi.

O recente transcriptoma de *P. superbus* permite agora a investigação e identificação funcional de genes relacionados à anidrobiose. Isto pode ser feito através da utilização de RNAi por alimentação. Embora seja uma estratégia eficaz, esta abordagem requer a clonagem de genes alvo em vetores adequados. Assim, as análises de maior escala podem tirar vantagem de outra abordagem: a RNAi por imersão, que é mais rápida (24 h, em vez

de dias em placas de alimentação), utiliza menos espaço (tubos de 0,2 - 1,5 mL, em vez de placas de 60 - 90 milímetros) e exige menos consumíveis. Por isso, decidimos testar se *P. superbus* também é passível de RNAi por imersão com dsRNAs longos (300-800 pb). Os nossos resultados mostram claramente que é, de fato, possível silenciar genes nesta espécie modelo utilizando este método alternativo.

Decidimos então investigar se substratos de dicer (dsRNAs de 27 pb) também são capazes de desencadear RNAi por imersão. Esta abordagem seria muito mais interessante, uma vez que tais moléculas podem ser adquiridas comercialmente, evitando assim os passos de laboratório (PCR seguida por transcrição *in vitro*). Estudos anteriores haviam mostrado que Sid-1, uma proteína transmembrana expressa na faringe de *C. elegans*, é responsável pela absorção de dsRNAs longos (FEINBERG et al., 2003) e de siRNAs curtos em concentrações elevadas (ISSA et al., 2005.; SHIH et al., 2009). Portanto, também testamos esta abordagem e as nossas análises moleculares revelaram que os substratos de dicer também são capazes de promover o silenciamento de genes em *P. superbus* por imersão em soluções de duplexes de RNA a 0,1  $\mu$ M. Esta estratégia apresenta um efeito dose-resposta, uma vez que as soluções a 1  $\mu$ M são mais eficientes. E, como esperado, se a quantidade de duplexes de RNA é demasiadamente elevada (10  $\mu$ M), efeitos inespecíficos começam a surgir (GRIMM et al., 2006). Neste último cenário, a maioria dos grupos apresentou aumentos inadvertidos na expressão gênica (inclusive no grupo controle). Além disso, o sucesso da RNAi por imersão com substratos de dicer também foi confirmado por meio de análises fenotípicas, que mostraram uma mudança completa na movimentação normal (grupo GFP) para movimentação reduzida (*ifb-1 mix*) ou redução/ausência de movimentos (*act-mix*).

Em seguida, começamos a avaliar a participação de ~100 genes no processo de anidrobiose em *P. superbus* via RNAi por imersão (com dsRNAs ou RNAs de 27 pb). Estes dados revelaram que o nosso processo de seleção, focando em genes previamente identificados em outras espécies anidrobióticas, foi satisfatório, pois obtivemos um número elevado de resultados positivos (cerca de 1/3) nesta seleção de alvos totalmente aleatórios.

Um desses genes codifica uma aquaporina (AQP), que é uma classe de proteínas que permitem o transporte de água através da bicamada fosfolipídica. Duas AQPs já haviam sido clonadas a partir de *P. vanderplanki* (CAMPBELL et al., 2008). PvAQP1 demonstrou ser expressa por todo o corpo de *P. vanderplanki* e é induzida durante a anidrobiose, evidenciando que pode ser responsável pelo controle da perda de água (durante a desidratação), assim como no processo de rápida reidratação. Nossos dados evidenciam

que tais processos mediados pela aquaporina são também importantes em *P. superbus*.

Três alvos (proteína ribossômica 40S S12, proteína ribossômica 60S L4 e proteína ribossômica 60S L7a) estão envolvidos na tradução, evidenciando um papel da síntese de proteínas durante a dessecação e/ou reidratação. Este achado é esperado uma vez que se observa uma acumulação intensa de proteínas, tais como LEA, durante a dessecação em muitas espécies anidrobióticas distintas (BROWNE et al., 2002). É importante notar que, embora a tradução seja um processo básico e geral, o silenciamento de cada alvo individualmente não afeta a sobrevivência, provavelmente indicando um papel especial para estas proteínas durante a anidrobiose.

Aldoceto redutases (AKRs) são enzimas metabolizadoras da fase I que catalisam reduções dependentes de NAD(P)H em grupos carbonil, para produzir álcoois primários e secundários com uma grande variedade de substratos, incluindo os aldeídos alifáticos e aromáticos, cetonas e xenobióticos (MINDNICH; PENNING, 2009). AKRs humanas podem alterar uma vasta gama de substratos, incluindo medicamentos, substâncias cancerígenas e desintoxicar aldeídos reativos formadas a partir de substâncias tóxicas exógenas, por exemplo, aflatoxinas, substâncias tóxicas endógenas, e aquelas formadas a partir da quebra de peróxidos lipídicos (JIN; PENNING, 2007). Portanto, uma vez que as AKRs são enzimas reguladoras de estresse (osmótico, eletrofílico e oxidativo), elas provavelmente desempenham um papel na anidrobiose por desintoxicar o meio celular durante a dessecação/desidratação.

As ciclofilinas exibem uma atividade de isomerase peptidil-prolil cis-trans que reduz a barreira de energia de rotação em torno da ligação peptidil-prolil. Esta atividade catalítica demonstrou aumentar a taxa de enovelamento de proteínas, bem como o processamento de proteínas (PICKEN et al., 2002), eventos que podem ser relevantes na anidrobiose devido a alterações estruturais causadas nas proteínas pela perda de água e de alteração de pH.

O envolvimento da subunidade alfa do proteassoma no processo de anidrobiose revela um aspecto interessante do processo. O proteassoma é responsável pela degradação de quaisquer proteínas erroneamente dobradas (GROLL; POTTS, 2011) e, como a água é perdida durante a desidratação, alterações estruturais nos polipeptídeos podem ser eventos comuns. Portanto, o proteassoma desempenha um importante papel de limpeza do ambiente celular das proteínas mal enoveladas (não funcionais ou tóxicas), permitindo a recuperação a partir do estado seco.

Da mesma forma, a autofagia, um processo lisossomo-associado de descarte de partes danificadas das células, mostra-se relevante em *P. superbus*. A

identificação de uma “proteína relacionada à autofagia 2B” sugere que a desidratação e a dessecação promovem danos consideráveis aos constituintes celulares.

AN1 zinc finger é um domínio normalmente presente nas proteínas de resposta ao estresse abiótico em plantas (frio, dessecação, salinidade, submersão, metais pesados e ferimento), bem como em proteínas que regulam a resposta imune em animais (VJ; TYAGI, 2008). Conseqüentemente, a identificação de uma proteína com domínio AN1 zinc finger no nematoide anidrobiótico era esperada. No entanto, é interessante notar que A20/AN1 também estão envolvidas na ubiquitinação para degradação proteossômica (WERTZ et al., 2004; HEYNINCK; BEYAERT, 2005; HISHIYA et al., 2006).

Tomados em conjunto, peroxiredoxina, subunidade alfa do proteassoma, domínio AN1 zinc finger (AN1-like zinc finger protein), aldoceto redutase, ciclofilina e “proteína relacionada à autofagia 2B” sugerem um papel importante dos sistemas de reparação/limpeza celulares durante a anidrobiose.

No entanto, o maior subconjunto funcional de alvos associados ao processo de anidrobiose em *P. superbus* identificado em nossa triagem pertence à classe de quinases. Vinte e cinco proteínas quinases relacionadas foram identificadas em nossa análise, entre as quais: a tirosina-quinase, a caseína quinase I, a isoenzima adenilato-quinase 1 e a serina/treonina-proteína-quinase Nek7. Este achado indica que os rápidos processos de entrada/saída anidrobiose dependem extremamente da sinalização mediada por quinases. Considerando-se que *P. superbus* é um estrategista rápido, isto é, não exige condicionamento para entrar em anidrobiose (SHANNON et al., 2005), o elevado número de quinases identificadas pode sugerir que o proteoma do nematoide permanece em um estado “quase pronto” para responder estresse hídrico extremo. Quando começa a desidratação, as proteínas ainda necessárias são sintetizadas e as quinases simplesmente ativam os polipeptídeos que já estavam presentes no ambiente celular. Esta estratégia é, sem dúvida, muito eficiente, promovendo uma resposta mais rápida e reduzindo a dependência da tradução.

Nossa triagem identificou algumas das principais etapas no processo de anidrobiose em *P. superbus*: transporte controlado de água, reparação de danos oxidativos, controle do enovelamento de proteínas e ativação de sinalização celular/proteica. Estes resultados ajudam a compreender a base molecular da anidrobiose e podem ser utilizados para melhorar a tolerância à desidratação em plantas, isto é, os passos iniciais do uso da engenharia anidrobiótica na agricultura.

## 5.2 Compreendendo as bases fisiológicas da anidrobiose: investigação do papel

### biológico de um gene associado à anidrobiose

Organismos anidrobióticos enfrentam condições drásticas de estresse hídrico, que causam efeitos deletérios na célula, devido principalmente aos danos oxidativos (FRANÇA et al., 2007). O estresse oxidativo refere-se a uma condição biológica em que há um desequilíbrio na concentração de espécies oxidantes sobre os antioxidantes (SIES, 2000). Por causa disto, os organismos desenvolveram mecanismos adaptativos responsáveis pela desintoxicação celular, envolvendo sistemas que reparam os danos causados por estes compostos pró-oxidantes (MICHIELS et al., 1994). Inserida neste grupo de agentes de defesa contra os radicais livres está a enzima peroxiredoxina (GP41), cujo envolvimento na anidrobiose decidimos avaliar e melhor caracterizar.

Testes de viabilidade foram realizados em vermes após 15 dias de alimentação com bactérias expressando dsGP41. Uma vez que não foram observadas diferenças entre o grupo experimental e o grupo controle (todos eles exibidos perto de 100% de sobrevivência), concluímos que a GP41 não é um gene essencial. Mais importante ainda, qualquer redução na porcentagem de sobrevivência após a dessecação seria, por consequência, devido ao envolvimento de GP41 anidrobiose, ao invés de funções celulares básicas.

Conseqüentemente, as reduções estatísticas significativas detectadas na viabilidade pós-dessecação do grupo silenciado para GP41, quando comparado ao grupo controle, mostraram pela primeira vez que a peroxiredoxina está associada com anidrobiose em *P. superbus*. Este resultado é consistente com a hipótese de proteção necessária contra o dano oxidativo causado pela perda de água. Estes efeitos deletérios provavelmente resultam do ataque por radicais aos componentes celulares, causando a peroxidação lipídica, oxidação de proteínas e mutações no DNA, o que pode alterar todo o metabolismo celular, eventualmente culminando na morte das células (HANSEN et al., 2006).

A diminuição na viabilidade (66%, comparado com o grupo controle) revela que se trata de um gene relativamente importante no processo. No entanto, apesar da importância atribuída a agentes antioxidantes na anidrobiose, a complexidade deste fenômeno provavelmente sugere o envolvimento de muitos outros mecanismos, como a acumulação de dissacáridos não redutores, proteínas LEA, as proteínas de choque térmico, entre outros, que atuam em combinação quando a proteção é necessária.

Apesar da ausência de efeitos deletérios nos vermes silenciados em condições

normais de umidade, vermes silenciados para GP41 são mais suscetíveis ao estresse oxidativo (exposição ao H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), revelado por uma redução da viabilidade. Estes resultados, portanto, confirmam que a peroxiredoxina está envolvida na proteção contra radicais livres e suportam a hipótese de que esta é importante na anidrobiose devido à sua atividade antioxidante (ARTHUR, 2000).

### 5.3 A gestão inovadora de recursos hídricos e a engenharia anidrobiótica: uma nova revolução na agricultura

A história humana registrou grandes marcos no uso da terra como fonte de recursos. O primeiro grande salto foi a Revolução Agrícola ocorrida no neolítico, marcada pela substituição dos hábitos nômades de caça e coleta para o estabelecimento de populações fixas e desenvolvimento de técnicas de agricultura.

Um segundo grande momento foi a Revolução Verde ocorrida durante as décadas de 1960 e 70, marcada pela mecanização, uso intensivo de insumos industriais e melhoramento genético. Estas estratégias combinadas promoveram um aumento sem igual na produção agrícola mundial.

Uma terceira fase, a Revolução Transgênica, com início no final do século XX, registra a transição para o uso de sementes geneticamente modificadas portando características de interesse: resistência a herbicidas e patógenos, mais produtivas, com maior conteúdo nutricional etc.

Nossa proposta visa uma gestão inovadora dos recursos hídricos na agricultura durante a seca através de uma estratégia sem precedentes: a anidrobiose. Objetivamos identificar as bases moleculares da anidrobiose, conhecer os fundamentos deste processo de resistência à dessecação extrema de tal forma que possamos aplicá-lo na produção agrícola.

Conseguimos identificar e validar de maneira funcional 35 genes associados à animação suspensa no verme *P. superbus*, algo sem precedentes na comunidade científica. Nenhum grupo de pesquisa no mundo realizou uma triagem funcional sobre a anidrobiose tão ampla quanto a descrita neste trabalho.

Esta primeira etapa é fundamental para o passo seguinte: a aplicação deste conhecimento para o desenvolvimento de estratégias de preservação de lavouras baseadas em anidrobiose, seja por transgênese ou pulverização.

Vislumbramos um novo cenário na agricultura mundial, na qual a seca não

será mais um desafio intransponível e avassalador, mas simplesmente um evento temporário e não letal.

Como plantações protegidas por estratégias de anidrobiose estariam associadas a uma gestão inovadora de recursos hídricos? Nossa estratégia é exatamente administrar este recurso tão precioso – a água – quando ela for mais necessária: durante as secas.

Em períodos de estiagem, não apenas o solo (e as plantações) perdem água, mas também os próprios grandes reservatórios hídricos e barragens. Isto se torna um problema extremamente sério e complexo, pois estas águas armazenadas devem suprir a produção de energia (hidrelétricas), as demandas urbanas (consumo humano – hidratação e higiene), pecuárias (consumo do gado e produção animal) assim como a agricultura (evitar a perda da lavoura). Portanto, a gestão das águas em condições de seca gera paradoxos e situações extremamente conflitantes.

Propomos neste trabalho uma gestão inteligente e inovadora dos recursos hídricos aplicados ao solo em períodos de seca, que seriam redirecionados, i.e., preferencialmente investidos no consumo humano, animal e energético. Não haveria a necessidade de se utilizar volumes incalculáveis de água para irrigar as grandes extensões de terra em uso agrícola, uma vez que estas plantas poderiam ser reversivelmente preservadas a seco pelo processo de anidrobiose.

É importante lembrar que este estado de animação suspensa é estável por longos períodos (anos e décadas; TUNNACLIFFE; LAPINSKI, 2003), não havendo o risco das plantações se perderem por falta de água. Adicionalmente, a própria natureza - i.e., a chuva - se encarrega de reverter o quadro, promovendo a reidratação das plantas e trazendo-as de volta à vida sem nenhum dano estrutural ou fisiológico e sem acúmulo de compostos químicos no solo. Uma vez que os compostos de vitrificação são naturais, não há impacto ambiental algum – trata-se de um processo que ocorre na natureza a milhões de anos.

Por fim, esta gestão inovadora das águas aplicada ao uso do solo traz um ganho de acordo com a extensão em que a estratégia for utilizada. A engenharia anidrobiótica poderia ser usada apenas por um pequeno setor da lavoura de um pequeno agricultor, em apenas algumas regiões agrícolas, em estados inteiros ou utilizada mundialmente. Trata-se de uma abordagem nova, revolucionária, promissora, de origem natural, reversível, protetora e que permitirá um uso ainda mais inteligente das águas durante os desafios do tempo e do clima. Quanto maior for sua utilização, maior será a economia de água, a qual poderá ser aproveitada de uma maneira ainda melhor.

## 6. CONCLUSÕES

Aqui demonstramos pela primeira vez que a RNAi pode ser desencadeada de forma eficaz em *P. superbus* por imersão em soluções de dsRNA ou de RNA com 27 pb por 24 horas. Estas novas abordagens foram utilizadas com sucesso para a análise de ~100 genes potencialmente envolvidos com a tolerância à dessecação. Nossos resultados revelaram que 35 deles são relacionados com o processo, sendo muitos destes quinases, evidenciando um papel importante da sinalização celular/ativação de proteínas durante anidrobiose.

Também demonstramos que a peroxiredoxina está envolvida com a anidrobiose nesta espécie e que combate o estresse oxidativo, fornecendo um papel funcional para ela durante a dessecação nos vermes.

Propomos neste ensaio a utilização do conhecimento aqui gerado (genes associados à anidrobiose) para o desenvolvimento da engenharia anidrobiótica em plantas, preservando-as em períodos de estiagem. Esta estratégia permitiria uma gestão inteligente e inovadora dos recursos hídricos em períodos de seca, que seriam redirecionados para o consumo humano e animal, e para a produção de energia.

## 7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil (Processo 2008/54236-7) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil (Processo 472427/2008-3). Cláudia Carolina Silva Evangelista é beneficiária de uma bolsa de estudo da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Tiago Campos Pereira foi beneficiário de uma bolsa da FAPESP (Processos 2009/01520-2). Agradecemos também a Gustavo Borges e Thais Fenz Araújo (Dpto. de Biologia, FFCLRP, USP), Prof. Dr. Alan Tunnacliffe (Universidade de Cambridge) e Profa. Dra. Ann Burnell (Universidade Nacional da Irlanda) pelo auxílio técnico e discussões.

Agradecemos à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, ao Departamento de Biologia e seus professores e funcionários, em especial à Profa. Dra. Maria Helena Goldman e ao Laboratório de Biologia Molecular de Plantas; à Profa. Tiana Kohlsdorf e à Profa. Maria de Lourdes Teixeira de Moraes Polizeli pelo auxílio técnico e estrutura. Por fim, agradecemos a Deus pela realização deste ensaio.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Reportagens na mídia

DILMA anuncia novo pacote de medidas para combater seca no Nordeste. **Folha de S. Paulo**, 2 abr. 2013. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/poder/1255973-dilma-anuncia-novo-pacote-de-medidas-para-combater-seca-no-nordeste.shtml>>. Acesso em: 28 ago. 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Pior seca dos últimos 50 anos no nordeste brasileiro confirma estatísticas da ONU sobre escassez. 8 abr. 2013. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/pior-seca-dos-ultimos-50-anos-no-nordeste-brasileiro-confirma-estatisticas-da-onu-sobre-escassez/>>. Acesso em: 28 ago. 2013.

PIOR seca em 50 anos fecha empregos e arruína lucros no Nordeste. **Folha de S. Paulo**, 5 mai. 2013. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/05/1273540-pior-seca-em-50-anos-fecha-empregos-e-arruina-lucros-no-nordeste.shtml>>. Acesso em: 28 ago. 2013.

### Literatura científica

ADHIKARI, B. N.; WALL, D. H.; ADAMS, B. J. Desiccation survival in an Antarctic nematode: molecular analysis using expressed sequenced tags. **BMC Genomics**, 10:69, 2009.

ALCOCK, R.; COTTINGHAM, M.G.; ROLLIER, C. S.; FURZE, J.; DE COSTA, S.D.; HANLON, M.; SPENCER, A. J.; HONEYCUTT, J. D.; WYLLIE, D. H.; GILBERT, S.C.; BREGU, M.; HILL, A. V. Long-term thermostabilization of live poxviral and adenoviral vaccine vectors at supraphysiological temperatures in carbohydrate glass. **Sci Transl Med**, 2(19), 19ra12, 2010.

ARTHUR, J. R. The glutathione peroxidases. **Cell Mol Life Sci**, v. 57, n. 13-14, p. 1.825-35, 2000.

BECQUEREL, P. La suspension de la vie audessous de 1/20°K absolu par demagnétisation adiabatique de l'alun de fer dans le vide le plus élevé. **Compt. Rend. Acad. Sci.**, Paris, 231:261, 1950a.

\_\_\_\_\_. La suspension de la vie des spores des bactéries et de moisissures desséchées dans le vide vers le zéro absolu. Leurs conséquences pour la dissémination et la conservation de la vie dans l'univers. **Compt. Rend. Acad. Sci.**, Paris, 231:1392, 1950b.

BOSCHETTI, C.; CARR, A.; CRISP, A.; EYRES, I.; WANG-KOH, Y.; LUBZENS, E.; BARRACLOUGH, T. G.; MICKLEM, G.; TUNNACLIFFE, A. Biochemical diversification through foreign gene expression in bdelloid rotifers. **PLoS Genet.**, v. 8, n. 11, e1003035, 2012.

BROWNE, J.; TUNNACLIFFE, A.; BURNELL, A. Anhydrobiosis: plant desiccation gene found in a nematode. **Nature**, 416(6876):38, 7 Mar. 2002.

CAMPBELL, E.M.; BALL, A.; HOPPLER, S.; BOWMAN, A. S. Invertebrate aquaporins: a review. **J Comp Physiol B.**, 178(8), p. 935-55, Nov. 2008.

CORNETTE, R.; KIKAWADA, T. The induction of anhydrobiosis in the sleeping chironomid: current status of our knowledge. **IUBMB Life**, 63(6), p. 419-29, Jun. 2011.

CROWE, J. H. Anhydrobiosis: an unsolved problem. **The American Naturalist**, v. 105, n. 946, 1971.

EYRES, I.; FRANGEDAKIS, E.; FONTANETO, D.; HERNIOU, E. A.; BOSCHETTI, C.; CARR, A.; MICKLEM, G.; TUNNACLIFFE, A.; BARRACLOUGH, T. G. Multiple functionally divergent and conserved copies of alpha tubulin in bdelloid rotifers. **BMC Evol Biol**, 12:148, 17 Aug. 2012.

FEINBERG, E. H.; HUNTER, C. P. Transport of dsRNA into cells by the transmembrane protein SID-1. **Science**, 301(5639), p. 1545-7, 2003.

FRANÇA, M. B.; PANEK, A. D.; ELEUTHERIO, E. C. Oxidative stress and its effects during dehydration. **Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol**, 146(4), p. 621-31, 2007.

GRIMM, D.; STREETZ, K. L.; JOPLING, C. L.; STORM, T. A.; PANDEY, K.; DAVIS, C. R.; MARION, P.; SALAZAR, F.; KAY, M. A. Fatality in mice due to oversaturation of cellular microRNA/short hairpin RNA pathways. **Nature**, 441(7092), p. 537-41, 2006.

GROLL, M.; POTTS, B. C. Proteasome structure, function, and lessons learned from beta-lactone inhibitors. **Curr Top Med Chem**, 11(23), p. 2.850-78, Dec. 2011.

HAEGEMAN, A.; JACOB, J.; VANHOLME, B.; KYNDT, T.; MITREVA, M.; GHEYSEN, G. Expressed sequence tags of the peanut pod nematode *Ditylenchus africanus*: the first transcriptome analysis of an Anguinid nematode. **Mol Biochem Parasitol**, 167(1), p. 32-40, Sep. 2009.

HANSEN, J. M.; GO, Y. M.; JONES, D. P. Nuclear and mitochondrial compartmentation of oxidative stress and redox signaling. **Annu Rev Pharmacol Toxicol**, 46, p. 215-34, 2006.

HEYNINCK, K.; BEYAERT, R. A20 inhibits NF-kappaB activation by dual ubiquitin-editing functions. **Trends Biochem Sci**, 30(1), p. 1-4, Jan. 2005.

HISHIYA, A.; IEMURA, S.; NATSUME, T.; TAKAYAMA, S.; IKEDA, K.; WATANABE, K. A novel ubiquitin-binding protein ZNF216 functioning in muscle atrophy. **EMBO J.**, 25(3), p. 554-64, 8 Feb. 2006.

HOLEN, T.; AMARZGUIOUI, M.; WIIGER, M. T.; BABAIE, E.; PRYDZ, H. Positional effects of short interfering RNAs targeting the human coagulation trigger Tissue Factor. **Nucleic Acids Res**, 30(8), p. 1.757-66, 2002.

ISSA, Z. GRANT, W. N.; STASIUK, S.; SHOEMAKER, C. B. Development of methods for RNA interference in the sheep gastrointestinal parasite, *Trichostrongylus colubriformis*. **Int J Parasitol**, 35(9), p. 935-40, Aug. 2005.

JIN, Y.; PENNING, T. M. Aldo-keto reductases and bioactivation/detoxication. **Annu Rev Pharmacol Toxicol**, 47, p. 263-92, 2007.

KEILIN, D. The leeuwenhoek lecture: the problem of anabiosis or latent life: history and current concept. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, **Biological Sciences**, 1959, v. 150, n. 939.

LARSEN, P. L. Aging and resistance to oxidative damage in *Caenorhabditis elegans*. **Proc Natl Acad Sci USA**, 90(19), p. 8905-9, 1993.

MALI, B.; GROHME, M. A.; FÖRSTER, F.; DANDEKAR, T.; SCHNÖLZER, M.; REUTER, D.; WEINICZ, W.; SCHILL, R. O.; FROHME, M. Transcriptome survey of the anhydrobiotic tardigrade *Milnesium tardigradum* in comparison with *Hypsibius dujardini* and *Richtersius coronifer*. **BMC Genomics**, 11:168, 2010.

MICHIELS, C.; RAES, M.; TOUSSAINT, O.; REMACLE, J. Importance of S-glutathione peroxidase, catalase, and Cu/Zn-SOD for cell survival against oxidative stress. **Free Radic Biol Med**, 17(3), p. 235-48, 1994.

MINDNICH, R. D.; PENNING, T. M. Aldo-keto reductase (AKR) superfamily: genomics and annotation. **Hum Genomics**, 3(4), p. 362-70, Jul. 2009.

PEREIRA, T. C.; PASCOAL, V. D. B.; SECOLIN, R.; ROCHA, C. S.; MAIA, I. G.; LOPES-CENDES, I. Strand analysis, a free online program for the computational identification of the best RNA interference (RNAi) targets based on Gibbs free energy. **Genetics and Molecular Biology**, 30 (4), p. 1.206-1.208, 2007.

PICKEN, N. C.; ESCHENLAUER, S.; TAYLOR, P.; PAGE, A. P.; WALKINSHAW, M. D. Structural and biological characterisation of the gut-associated cyclophilin B isoforms from *Caenorhabditis elegans*. **J Mol Biol**, 322(1), p. 15-25, 6 Sep 2002.

REARDON, W.; CHAKRABORTEE, S.; PEREIRA, T. C.; TYSON, T.; BANTON, M. C.; DOLAN, K. M.; CULLETON, B. A.; WISE, M. J.; BURNELL, A. M.; TUNNACLIFFE, A. Expression profiling and cross-species RNA interference (RNAi) of desiccation-induced transcripts in the anhydrobiotic nematode *Aphelenchus avenae*. **BMC Mol Biol**, 11:6. doi: 10.1186/1471-2199-11-6, 19 Jan. 2010.

SAKURAI, M.; FURUKI, T.; AKAO, K.; TANAKA, D.; NAKAHARA, Y.; KIKAWADA, T.; WATANABE, M.; OKUDA, T. Vitrification is essential for anhydrobiosis in an African chironomid, *Polypedilum vanderplanki*. **Proc Natl Acad Sci USA**, 105(13), p. 5.093-8, 1 Apr. 2008.

SCHOKRAIE, E.; HOTZ-WAGENBLATT, A.; WARNKEN, U.; MALI, B.; FROHME, M.; FÖRSTER, F.; DANDEKAR, T.; HENGHERR, S.; SCHILL, R. O.; SCHNÖLZER, M. Proteomic analysis of tardigrades: towards a better understanding of molecular mechanisms by anhydrobiotic organisms. **PLoS One**, 5(3):e9502, 3 Mar. 2010.

SCHOKRAIE, E.; WARNKEN, U.; HOTZ-WAGENBLATT, A.; GROHME, M. A.; HENGHERR, S.; FÖRSTER, F.; SCHILL, R. O.; FROHME, M.; DANDEKAR, T.; SCHNÖLZER, M. Comparative proteome analysis of *Milnesium tardigradum* in early embryonic state versus adults in active and anhydrobiotic state. **PLoS One**, 7(9): e45682, 2012.

SEKI, K.; TOYOSHIMA, M. Preserving tardigrades under pressure. **Nature**, 395, p. 853-854, 1998.

SHANNON, A. J.; BROWNE, J. A.; BOYD, J.; FITZPATRICK, D. A.; BURNELL, A. M. The anhydrobiotic potential and molecular phylogenetics of species and strains of *Panagrolaimus* (Nematoda, Panagrolaimidae). **J Exp Biol.**, 208(Pt 12), p. 2.433-45, 2005.

SHIH, J. D.; FITZGERALD, M. C.; SUTHERLIN, M.; HUNTER, C. P. The SID-1 double-stranded RNA transporter is not selective for dsRNA length. **RNA**, 15(3), p. 384-90, Mar. 2009.

SIES, H. What is oxidative stress? (ed. J. F. Keaney). **Oxidative Stress and Vascular Disease**. Kluwer Academic Publishers Boston, MA. 1-8, 2000.

TUNNACLIFFE, A.; LAPINSKI, J. Resurrecting Van Leeuwenhoek's rotifers: a reappraisal of the role of disaccharides in anhydrobiosis. **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.**, 358(1438), p. 1.755-71, 29 Oct 2003.

TYSON, T.; O'MAHONY ZAMORA, G.; WONG, S.; SKELTON, M.;

DALY, B.; JONES, J. T.; MULVIHILL, E. D.; ELSWORTH, B.; PHILLIPS, M.; BLAXTER, M.; BURNELL, A. M. A molecular analysis of desiccation tolerance mechanisms in the anhydrobiotic nematode *Panagrolaimus superbus* using expressed sequenced tags. **BMC Res Notes**, 5:68, 2012.

VIJ, S.; TYAGI, A. K. A20/AN1 zinc-finger domain-containing proteins in plants and animals represent common elements in stress response. **Funct Integr Genomics**, 8(3), p. 301-7, Aug. 2008. doi: 10.1007/s10142-008-0078-7. Epub 2008 Mar 5.

WATANABE, M.; SAKASHITA, T.; FUJITA, A.; KIKAWADA, T.; HORIKAWA, D. D. NAKAHARA, Y.; WADA, S.; FUNAYAMA, T.; HAMADA, N.; KOBAYASHI, Y.; OKUDA, T. Biological effects of anhydrobiosis in an African chironomid, *Polypedilum vanderplanki* on radiation tolerance. **Int J Radiat Biol**, (8), p. 587-92, 2006.

WERTZ, I. E.; O'ROURKE, K. M.; ZHOU, H.; EBY, M.; ARAVIND, L.; SESHAGIRI, S.; WU, P.; WIESMANN, C.; BAKER, R.; BOONE, D. L.; MA, A.; KOONIN, E. V.; DIXIT, V. M. De-ubiquitination and ubiquitin ligase domains of A20 downregulate NF-kappaB signalling. **Nature**, 430(7000), p. 694-9, 5 Aug. 2004.

YAMAGUCHI, A.; TANAKA, S.; YAMAGUCHI, S.; KUWAHARA, H.; TAKAMURA, C.; IMAJOH-OHMI, S.; HORIKAWA, D. D.; TOYODA, A.; KATAYAMA, T.; ARAKAWA, K.; FUJIYAMA, A.; KUBO, T.; KUNIEDA, T. Two novel heat-soluble protein families abundantly expressed in an anhydrobiotic tardigrade. **PLoS One**, 7(8):e44209, 2012.

YU, J. Y.; DeRUITER, S. L.; TURNER, D. L. RNA interference by expression of short-interfering RNAs and hairpin RNAs in mammalian cells. **Proc Natl Acad Sci USA**, 99(9), p. 6047-52, 2002.

ZAHRADKA, K.; SLADE, D.; BAILONE, A.; SOMMER, S.; AVERBECK, D.; PETRANOVIC, M.; LINDNER, A. B.; RADMAN, M. Reassembly of shattered chromosomes in *Deinococcus radiodurans*. **Nature**, 443(7111), p. 569-73, 5 Oct. 2006.

## 9. ANEXOS

### ANEXO 1.

Tabela 1. Lista dos genes selecionados para triagem. Legenda: \*: genes com pequena redução na viabilidade após silenciamento sem dessecação. Sublinhado: silenciamento gênico aumentou a porcentagem de sobrevivência após dessecação (apenas 1 alvo). Em cinza: 35 alvos cujo silenciamento diminuiu a porcentagem de sobrevivência após dessecação. Em itálico: controles positivos.

ESPÉCIE	GENE ALVO	MOLÉCULA	CÓDIGO
Plectus murrayi	(PREDICTED: 1,2-dihydroxy-3-keto-5-methylthiopentene dioxygenase-like)	dsRNA	1
Plectus murrayi	(Lamin Receptor / Ribosomal Protein AS)	dsRNA	2
Plectus murrayi	(Large Ribosomal Protein)	dsRNA	3
Plectus murrayi	CRE-RPT-2 protein (Proteasome)	dsRNA	4
Plectus murrayi	Lipid Transfer protein family member	dsRNA	6
Plectus murrayi	Aspartyl protease protein 6	dsRNA	7
Plectus murrayi	Thymidylate synthase	dsRNA	8
Plectus murrayi	ATP synthase subunit family member	dsRNA	9
Plectus murrayi	ADP/ATP translocase	dsRNA	10
Plectus murrayi	Bi-functional glyoxylate cycle protein	dsRNA	11
Milnesium tardigradum	40S ribosomal protein S12	dsRNA	15
P. vanderplanki	Proteasome subunit alpha	dsRNA	16
H. dujardini	glutathione s-transferase	dsRNA	17
H. dujardini	heat shock protein	dsRNA	21
M. tardigradum	water and ammonia transporting aquaporin	dsRNA	22
Plectus murrayi	pinin/SDK/memA/ protein conserved region containing protein	siRNA	23

Plectus murrayi	Putative glutamate dehydrogenase	siRNA	24
Plectus murrayi	cathepsin L-like cysteine proteinase	siRNA	25
Plectus murrayi	A - heat shock protein 70	siRNA	26
Plectus murrayi	B/C - Heat shock 70 kDa protein	siRNA	27/28
Plectus murrayi	Ras-related protein Rab-1A	siRNA	29
Plectus murrayi	Ras-related protein Rab-11B	siRNA	30
Plectus murrayi	cuticle collagen protein LON-3	siRNA	31
Plectus murrayi	CBR-RPS-0 protein	siRNA	32
Plectus murrayi	Immunodominant antigen Ov33-3 / Pepsin inhibitor Dit33	siRNA	33
Plectus murrayi	ubiquitin-conjugating enzyme H1	siRNA	34
Plectus murrayi	Histone H2B 2	siRNA	35
Plectus murrayi	cytochrome P450 like_TBP	siRNA	36
Plectus murrayi	CRE-RPL-9 protein	SiRNA	37
Plectus murrayi	CRE-RPL-41 protein	SiRNA	38
Plectus murrayi	A - euk. Transl. Elong. factor 1A	SiRNA	39
Plectus murrayi	B - euk. Transl. Elong. factor 1A	SiRNA	40
Plectus murrayi	elongation factor 1 beta	SiRNA	41
P. vanderplanki	Rad51	SiRNA	42
P. vanderplanki	Pv-hsp60	SiRNA	43
P. vanderplanki	Pv-p23	SiRNA	44
P. vanderplanki	Pv-hsp90	SiRNA	45
Plectus murrayi	60S ribosomal protein L4	SiRNA	46
Plectus murrayi	40S ribosomal protein S8	SiRNA	47
Plectus murrayi	60S ribosomal protein L7a	SiRNA	48
P. superbus	Aldoketo reductase PSC00896	SiRNA	76
P. superbus	AN1-like Zinc finger family PSC02113	SiRNA	77
P. superbus	AQuaPorin related family member CBR-AQP-2 PSC01029	SiRNA	78
P. superbus	Autophagy-related protein 2 B (ATG2) PSC02921	SiRNA	79
P. superbus	Cyclophilin type peptidyl prolyl cis trans isomerase (cyp5) PSC01131	SiRNA	80

P. superbis	Cytosolic T-complex protein 1 (chaperonin), theta subunit PSC02644	SiRNA	81
P. superbis	Derlin-2 PSC00535	SiRNA	82
P. superbis	DJ-1 PSC02304	SiRNA	83
P. superbis	Ezrin Radixin Moesin family member (erm-1) PSC02097	SiRNA	84
P. superbis	HSP70 cochaperone BAG1 PSC02470	SiRNA	85
P. superbis	LC3, GABARAP and GATE-16 family member (lgg-1) PSC00068	SiRNA	86
P. superbis	Lon protease homolog, mitochondrial precursor PSC03263	SiRNA	87
P. superbis	NADP Isocitrate dehydrogenase PSC03704	SiRNA	88
P. superbis	Prefoldin subunit 2 (pfd-2) PSC03146	SiRNA	89
P. superbis	Probable E3 ubiquitin-protein ligase PSC04282	SiRNA	90
P. superbis	Proteasome subunit alpha type 4 PSC04237	SiRNA	91
P. superbis	Proteasome subunit beta type-6 PSC04388	SiRNA	92
P. superbis	Protein disulfide isomerase PSC02251	SiRNA	93
P. superbis	RIC1 Putative stress responsive protein PSC01468	SiRNA	94
P. superbis	Small heat shock protein alpha crystallin family PSC01018	SiRNA	95
P. superbis	Tetratricopeptide repeat containing protein PSC00168	SiRNA	96
P. superbis	THaumatin family member PSC03641	SiRNA	97
P. superbis	Ubiquitin conjugating enzyme (E2) family member (ubc-3) PSC00530	SiRNA	98

P. superbus	Ubiquitin family protein (ubq-1) PSC01689	SiRNA	99
P. superbus	Ubiquitin-activating enzyme E1 PSC03681	SiRNA	100
P. superbus	Protein kinase domain containing protein *	DsRNA	1K
P. superbus	Cyclic AMP-dependent protein kinase	DsRNA	2K
P. superbus	Casein kinase II regulatory subunit	DsRNA	3K
P. superbus	Protein kinase	DsRNA	4K
P. superbus	Casein kinase I	DsRNA	5K
P. superbus	Protein kinase C2 domain containing protein	DsRNA	6K
P. superbus	Src homology domain 2, protein tyrosine kinase	DsRNA	7K
P. superbus	Diacylglycerol kinase dgk-5	DsRNA	8K
P. superbus	Serine/threonine-protein kinase Nek7 *	DsRNA	9K
P. superbus	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	10K
P. superbus	SH3-domain kinase binding protein	DsRNA	11K
P. superbus	Serine/threonine-protein kinase	DsRNA	12K
P. superbus	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	13K
P. superbus	Phosphofructokinase/ Glucokinase conserved region family protein	DsRNA	15K
P. superbus	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	16K
P. superbus	Tyrosine kinase	DsRNA	17K
P. superbus	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	18K
P. superbus	Adenylate kinase isoenzyme 1, putative	DsRNA	19K
P. superbus	Pelle/IL-1 receptor associated Kinase (IRAK)	DsRNA	20K

P. superbis	er (fms/fps related) protein kinase	DsRNA	21K
P. superbis	Cyclin-dependent kinases regulatory subunit	DsRNA	22K
P. superbis	Guanylate kinase family protein	DsRNA	23K
P. superbis	MAP kinase-activated protein kinase 2	DsRNA	24K
P. superbis	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	26K
P. superbis	Serine-threonine protein kinase	DsRNA	27K
P. superbis	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	28K
P. superbis	let-75 (positive control)	DsRNA	29C
P. superbis	sma-1 (positive control)	DsRNA	30C
P. superbis	ama-1 (positive control)	DsRNA	31C
P. superbis	Tyrosine-protein kinase	DsRNA	33K
P. superbis	(Protein kinase domain containing protein)	DsRNA	34K
P. superbis	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	35K
P. superbis	Protein KINase family member (kin-26) *	DsRNA	36K
P. superbis	Similar to protein tyrosine kinase *	DsRNA	37K
P. superbis	Protein kinase domain containing protein	DsRNA	38K
P. superbis	STE20-like kinase	DsRNA	39K
P. superbis	Serine/threonine-protein kinase plk-2, putative	DsRNA	40K



3º

LUGAR

CATEGORIA  
MESTRE E DOUTOR



**Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, 29 anos**

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Porto Alegre - RS**

**HIDROLOGIA DA BACIA AMAZÔNICA:  
COMPREENSÃO E PREVISÃO COM BASE  
EM MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRODINÂMICA  
E SENSORIAMENTO REMOTO**

## RESUMO

A bacia Amazônica destaca-se como o principal sistema hidrológico do mundo e pelo seu importante papel no sistema terrestre, influenciando o ciclo de carbono e o clima global. Recentes pressões antrópicas, como o desflorestamento, mudanças climáticas e a construção de barragens hidrelétricas, somadas às crescentes cheias e secas extremas ocorridas nesta região, motivam o estudo da hidrologia da bacia Amazônica. Ao mesmo tempo, têm se desenvolvido métodos hidrológicos de modelagem e monitoramento via sensoriamento remoto que podem fornecer as bases técnicas para este fim. Este trabalho objetivou a compreensão e previsão da hidrologia da bacia Amazônica. Foram desenvolvidas e avaliadas diversas técnicas, incluindo de modelagem hidrológica-hidrodinâmica de larga escala, de assimilação de dados in situ e sensoriamento remoto, e de previsão hidrológica. Este conjunto de técnicas foi utilizado para compreender o funcionamento da bacia Amazônica em termos de seus processos hidrológicos e sua previsibilidade hidrológica. O modelo hidrológico-hidrodinâmico de larga escala MGB-IPH foi utilizado para simular a bacia, sendo forçado com dados de chuva estimados por satélite. O modelo mostrou bom desempenho em uma validação detalhada contra observações de vazões e cotas in situ, além de dados oriundos de sensoriamento remoto, incluindo níveis d'água de altimetria por radar, armazenamento d'água de gravimetria espacial e extensão de áreas alagadas. Mostrou-se a dominância das águas superficiais nas variações do armazenamento de água, a influência dos grandes corpos

d'água sobre a variabilidade espacial da precipitação, além da importância das várzeas da inundação e efeitos de remanso sobre a propagação das ondas de cheia. As condições hidrológicas iniciais mostraram dominar a previsibilidade hidrológica nos grandes rios amazônicos, tendo assim a precipitação no futuro um papel secundário. Assim, de forma pioneira, foi desenvolvido um esquema de assimilação de dados para um modelo hidrológico-hidrodinâmico de larga escala para assimilar informações in situ e de altimetria por radar, cujo desempenho se mostrou satisfatório. Desenvolveu-se também um protótipo de sistema de previsão de vazões para a bacia Amazônica, baseado no modelo inicializado com condições iniciais ótimas do esquema de assimilação de dados e utilizando precipitação estimada por satélite disponível em tempo real. Os resultados foram promissores e o modelo foi capaz de prever vazões nos principais rios amazônicos com grande antecedência (~1 a 3 meses), antecipando, por exemplo, a grande seca de 2005. Estes resultados mostram o potencial da modelagem hidrológica de larga escala apoiada por informação de sensoriamento remoto na previsão de vazões com alta antecedência nas grandes bacias hidrográficas do mundo.

Palavras-chave: hidrologia da bacia amazônica, previsão hidrológica, modelagem hidrológica-hidrodinâmica, sensoriamento remoto, assimilação de dados.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Bacia Amazônica

A bacia Amazônica (Figura 1) destaca-se como a maior do mundo e pelo seu importante papel no sistema terrestre, influenciando o clima global e o ciclo de carbono, em particular as emissões de metano e dióxido de carbono (RICHEY et al., 2002; MELACK et al., 2004). Paralelamente, recentes pressões antrópicas, como desflorestamentos (LEITE et al., 2012), mudanças climáticas (IPCC, 2007) e a construção de barragens hidrelétricas (BRASIL, 2007), ameaçam este sistema e motivam o seu estudo. Somam-se a isto as recentes cheias (e.g. 2009 e 2012) e secas (e.g. 1996, 2005 e 2010) extremas (CHEN et al., 2010; TOMASELLA et al., 2010; MARENGO et al., 2008), que causaram importantes impactos sobre a população amazônica, que é altamente dependente dos rios para transporte, energia, alimentos além de ser muito vulnerável a inundações.



Figura 1. Bacia Amazônica.

Somadas a isto, algumas características hidrológicas particulares também motivam a pesquisa sobre a bacia Amazônica (Figura 2), como: precipitações intensas com alta variabilidade espacial e regime hidroclimático contrastante em diferentes regiões (ESPINOZA et al., 2009); efeitos de remanso que controlam o escoamento fluvial (MEADE et al., 1991; KOSUTH et al., 2009); além de extensas várzeas alagáveis (HESS et al., 2003) com escoamento d'água complexo (ALSDORF et al., 2007a) e exercendo função importante no ciclo de carbono (e.g. RICHEY et al., 2002; MELACK et al., 2004), dinâmica de sedimentos (e.g. BOURGOIN et al., 2007) e condições ecológicas dos rios amazônicos (JUNK, 1997).

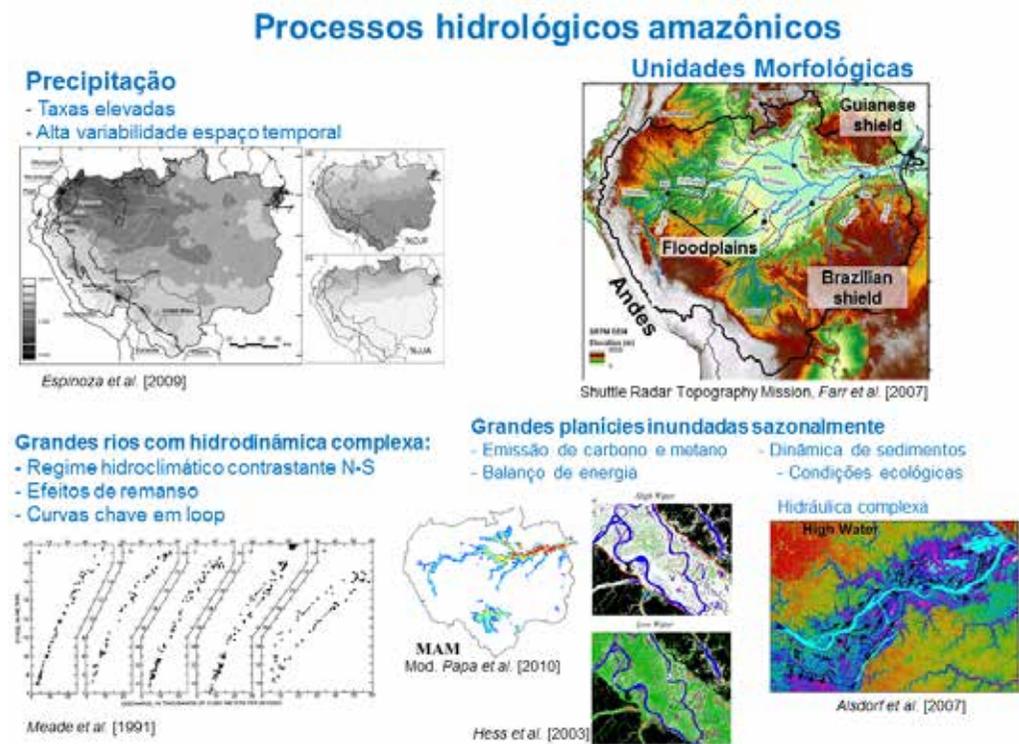


Figura 2. Processos hidrológicos amazônicos.

## 1.2. Modelagem hidrológica da bacia Amazônica

Os modelos hidrológicos de base física (Figura 3) apresentam-se como uma ferramenta útil para (i) a compreensão acerca de processos hidrológicos e impactos de atividades antrópicas e para (ii) o desenvolvimento de sistemas de previsão visando a redução da vulnerabilidade da população local. Entretanto, aspectos como rios muito planos e grandes áreas alagáveis dificultam a aplicação de modelos hidrológicos convencionais na Amazônia. Particularmente nesta bacia, diversos esforços de modelagem hidrológica têm sido desenvolvidos (PAIVA et al., 2013; YAMAZAKI et al., 2011; GETIRANA et al., 2010; COE et al., 2008; TRIGG et al., 2009), utilizando diferentes abordagens e buscando a representação ótima dos processos físicos, mas limitados pelos dados disponíveis e capacidade computacional. Neste sentido, o aperfeiçoamento destes modelos passa pela sua validação com dados observados e investigação de suas fontes de erros, como a incompleta representação de processos físicos ou limitações nos dados de entrada.

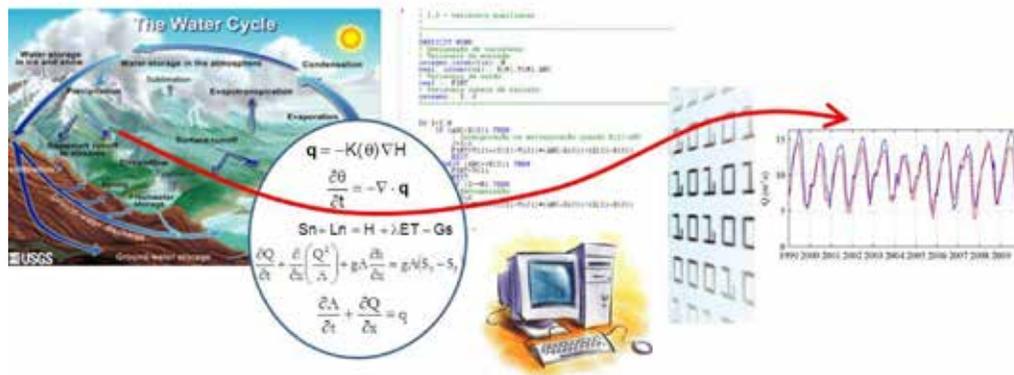


Figura 3. Representação esquemática do processo de modelagem hidrológica.

### 1.3. Sistemas de previsão hidrológica em grandes bacias

Apesar de suas limitações, os modelos hidrológicos de base física recentemente passaram a ser utilizados em sistemas regionais e mesmo globais de monitoramento e previsão hidrológica em tempo real. Por exemplo, Thielen et al. (2009) apresentam a concepção do “European Flood Awareness System - EFAS”, sistema de alerta contra cheias para a Europa baseado em um modelo hidrológico distribuído forçado com previsões meteorológicas e utilizando a técnica de previsão probabilística. Wood et al. (2002) mostram um sistema de previsão hidrológica sazonal para os Estados Unidos. Alguns estudos e protótipos de sistemas de previsão de vazões também foram desenvolvidos em algumas bacias brasileiras (TUCCI et al., 2003; COLLISCHONN et al., 2007; MELLER, 2012). E, por fim, Alfieri et al. (2012) apresentam a concepção e validações preliminares do “Global Flood Awareness System - GloFAS”, que é uma extensão do sistema EFAS para a escala global.

Entretanto, sistemas de previsão hidrológica baseados em modelos físicos ainda não foram testados na região Amazônica, e os estudos de previsão existentes na bacia são todos baseados em modelos estatísticos (UVO; GRAHAN, 1998; UVO et al., 2000; SCHONGART; JUNK, 2007; CAPPALAERE et al., 1995).

### 1.4. Sensoriamento remoto de variáveis hidrológicas

Paralelamente às ferramentas de modelagem hidrológica, tem se desenvolvido nos últimos anos um grande número de técnicas de sensoriamento remoto (Figura 4) para observação de variáveis hidrológicas, que permitem o monitoramento de grandes áreas remotas, como a Amazônia, com uma

cobertura espaço-temporal muito superior à de observações in situ. Os produtos de sensoriamento remoto voltados para hidrologia desenvolvidos recentemente incluem:

- métodos de estimativa dos níveis d'água através de altimetria espacial por radar (FRAPPART et al., 2006; ALSDORF et al., 2007b; SANTOS DA SILVA et al., 2010) com satélites como o TOPEX, Jason-2, ERS-2, ENVISAT, entre outros;
- variação no armazenamento de água terrestre ("Terrestrial Water Storage") relativo a volumes estocados em águas subterrâneas, solo e planícies de inundação estimados pela missão de gravimetria GRACE "Gravity Recovery and Climate Experiment" (TAPLEY et al., 2004);
- umidade do solo com técnicas de micro-ondas da missão SMOS "Soil Moisture and Ocean Salinity" (KERR et al., 2001);
- extensão de áreas alagadas (HESS et al., 2003; PAPA et al., 2010);
- estimativas da precipitação com sensores de infravermelho e micro-ondas, como da missão TRMM "Tropical Rainfall Measurement Mission" (HUFFMAN et al., 2007);
- dados topográficos de modelos digitais de elevação (DEMs) como da missão SRTM "Shuttle Radar Topography Mission" (FARR et al., 2007), com cobertura quase global na escala de ~100m; e
- áreas alagadas e níveis d'água da futura missão SWOT "Surface Waters and Ocean Topography" (DURAND et al., 2010).

Estes produtos de sensoriamento remoto têm grande potencial para estudos visando a compreensão dos processos hidrológicos na bacia Amazônica, a validação de modelos hidrológicos ou ainda serem integrados a estes modelos via técnicas de assimilação de dados.



Figura 4. Produtos de sensoriamento remoto de variáveis hidrológicas.

## 1.5. Assimilação de dados

Neste sentido, métodos de assimilação de dados (Figura 5) apresentam-se como uma opção atraente para combinar de forma ótima a informação de modelos hidrológicos, que são inerentemente imperfeitos, com observações também incertas de estações in situ e/ou oriundas de sensoriamento remoto, obtendo-se assim estimativas fisicamente consistentes com redução e quantificação das incertezas (LIU; GUPTA, 2007). Utilizam-se normalmente métodos bayesianos, em sua maioria baseados no filtro de Kalman (KALMAN, 1960) como o "Ensemble Kalman Filter" (EVENSEN, 2003). Tais técnicas podem ser utilizadas para criar reanálises hidrológicas para estudos retrospectivos ou para estimar condições iniciais de modelos hidrológicos utilizados em sistemas de previsão em tempo real buscando uma melhora em sua precisão. Neste sentido, a pesquisa em assimilação de dados para hidrologia tem crescido nos últimos anos (BIANCAMARIA et al., 2011; CLARK et al., 2008; NEAL et al., 2007, KUMAR et al., 2008; LIU et al., 2012). Entretanto, a assimilação de vazões ou níveis d'água tanto de observações in situ como de sensoriamento remoto em modelos hidrológicos de grande escala ainda é incomum.

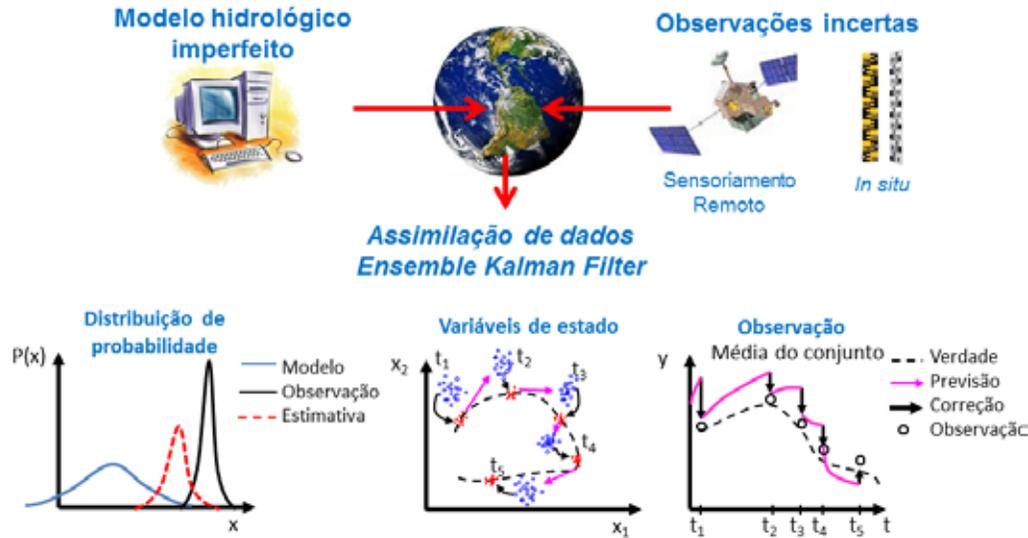


Figura 5. Representação esquemática da técnica de assimilação de dados com a técnica “Ensemble Kalman Filter”.

## 2. OBJETIVOS

Na breve introdução apresentada, argumentou-se sobre a importância da compreensão e previsão da hidrologia da bacia Amazônica, mas alertando para o atual desconhecimento sobre o funcionamento destes sistemas. Também foram apresentados os mais recentes tipos de técnicas que poderiam ser utilizadas para estes fins – incluindo modelagem hidrológica, sensoriamento remoto, assimilação de dados e previsão hidrológica –, mas que também ainda são temas de pesquisa em aberto.

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa foi compreender e prever o funcionamento hidrológico de grandes bacias hidrográficas, mais especificamente a bacia Amazônica, com o suporte de modelos de simulação hidrológica-hidrodinâmica e monitoramento de variáveis hidrológicas por sensoriamento remoto. Mais especificamente, esta pesquisa visou:

- desenvolver técnicas de modelagem hidrológica-hidrodinâmica de grande escala, de assimilação de dados in situ e de sensoriamento remoto e de previsão de vazões na bacia Amazônica;
- avaliar o desempenho, os pontos fortes e as limitações de técnicas de modelagem hidrológica-hidrodinâmica de grande escala, de assimilação de dados in situ e de sensoriamento remoto e de previsão de vazões na bacia Amazônica; e
- compreender, com o suporte de modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto, como funciona a bacia Amazônica em termos de seus processos hidrológicos dominantes e que fatores influenciam na sua previsibilidade hidrológica.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Modelo hidrológico-hidrodinâmico

Este trabalho se inicia com um estudo de modelagem hidrológica-hidrodinâmica da bacia Amazônica. Através do uso complementar de informações de sensoriamento remoto, investiga-se acerca das fontes dos erros da modelagem e sobre o funcionamento da bacia Amazônica, incluindo aspectos como o papel das águas superficiais, no solo e subterrâneas, a função da hidráulica dos rios e várzeas inundáveis sobre a propagação de ondas de cheia, e variabilidade espacial da precipitação.

A bacia Amazônica foi simulada utilizando-se o modelo MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007), que se trata de um modelo hidrológico de grande escala baseado em processos (Figura 6). A bacia é dividida em minibacias e trechos de rio, e utiliza-se a abordagem de unidades de respostas hidrológicas (HRUs). Os processos hidrológicos verticais simulados incluem: balanço d'água no solo, balanço de energia e evapotranspiração, interceptação, infiltração no solo e escoamento superficial, escoamento e percolação ao aquífero. Os volumes gerados nos HRUs são propagados em cada minibacia através de reservatórios lineares representando o escoamento subterrâneo, subsuperficial e superficial. O escoamento na rede de rios é simulado com o modelo Muskingum Cunge (MC) ou com um modelo hidrodinâmico 1 D (HD).

Paiva et al. (2011) desenvolveu um modelo hidrodinâmico de grande escala para o modelo MGB-IPH (Figura 6), que se diferencia do MC pela capacidade de representar a inundação nas várzeas e efeitos de remanso. O modelo resolve as equações completas de Saint-Venant (Figura 6) para uma rede de rios utilizando um esquema de diferenças finitas implícito baseado em Tucci (1978). A inundação das várzeas é representada com um modelo do tipo armazenamento, que assume que (i) a velocidade do escoamento paralelo ao rio é nula na planície de inundação, (ii) as várzeas atuam somente como áreas de armazenamento e (iii) o nível d'água é igual ao do rio principal. Conseqüentemente, a troca d'água entre o rio e a planície é dada por  $q_{fl} = (dz/dt)A_{fl}(z)/dx$ , sendo  $x$  e  $t$  as dimensões espacial e temporal,  $z$  o nível d'água, e  $A_{fl}(z)$  a área alagada. Algoritmos de geoprocessamento são utilizados para extrair parâmetros relacionados à geometria dos rios e várzeas de inundação principalmente de modelos digitais de elevação (DEM).

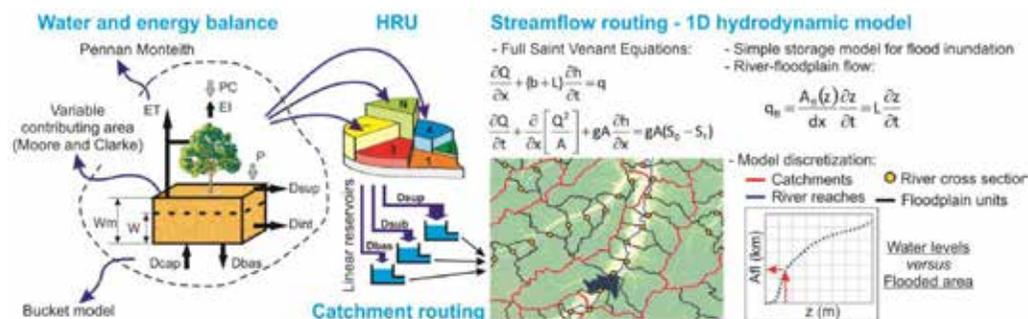


Figura 6. Representação esquemática do modelo hidrológico MGB-IPH acoplado ao modelo hidrodinâmico 1D.

### 3.2. Modelagem da bacia Amazônica

A discretização da bacia Amazônica em trechos de rio, minibacias e seções transversais para o modelo hidrodinâmico, além da estimativa de parâmetros topográficos, foi realizada a partir do modelo digital de elevação SRTM DEM (FARR et al., 2007) com resolução espacial de ~ 500 m (Figura 7). Dados meteorológicos foram obtidos da base de dados CRU CL 2.0 (NEW et al., 2002). Utilizaram-se estimativas diárias de precipitação por satélite do produto TRMM 3B42 (HUFFMAN et al., 2007), com resolução espacial de 0.25o x 0.25o. Os parâmetros do modelo relacionados ao balanço hídrico foram calibrados baseados em dados de vazão de alguns postos fluviométricos seguindo os métodos de Collischonn et al. (2007). Mais detalhes são descritos em Paiva et al. (2013a).

### 3.3. Bases de dados para validação da modelagem hidrológica

As vazões simuladas pelo modelo foram comparadas com dados diários de 111 estações fluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA), dos Serviços Nacionais de Meteorologia e Hidrologia do Peru e Bolívia (SENAMHI) e do projeto HYBAM. Utilizaram-se também dados de cotas de 69 estações da ANA. Além disso, os níveis d'água simulados foram confrontados com estimativas de altimetria espacial por radar desenvolvidas por Santos da Silva et al. (2010) com dados do satélite ENVISAT em 212 estações virtuais, com resolução temporal de ~35 dias e precisão de 10 a 40 cm. Simulações de extensão de áreas alagadas foram comparadas com estimativas desenvolvidas a partir de múltiplos satélites por Papa et al. (2010), com resolução espacial ~25 x 25 km e na escala mensal. A variação no armazenamento d'água terrestre (TWS), incluindo rios, várzeas de inundação, solo e aquíferos, foi verificada com dados da missão de gravimetria espacial

GRACE (TAPLEY et al., 2004; FRAPPART et al., 2010), que fornece estimativas de variações no tempo e espaço do campo gravitacional da Terra. Estas anomalias de gravidade são posteriormente relacionadas a variações no armazenamento de água terrestre, com precisão de 15-20 mm sobre áreas de ~333 km e na escala mensal. Mais detalhes encontram-se em Paiva et al. (2013a).

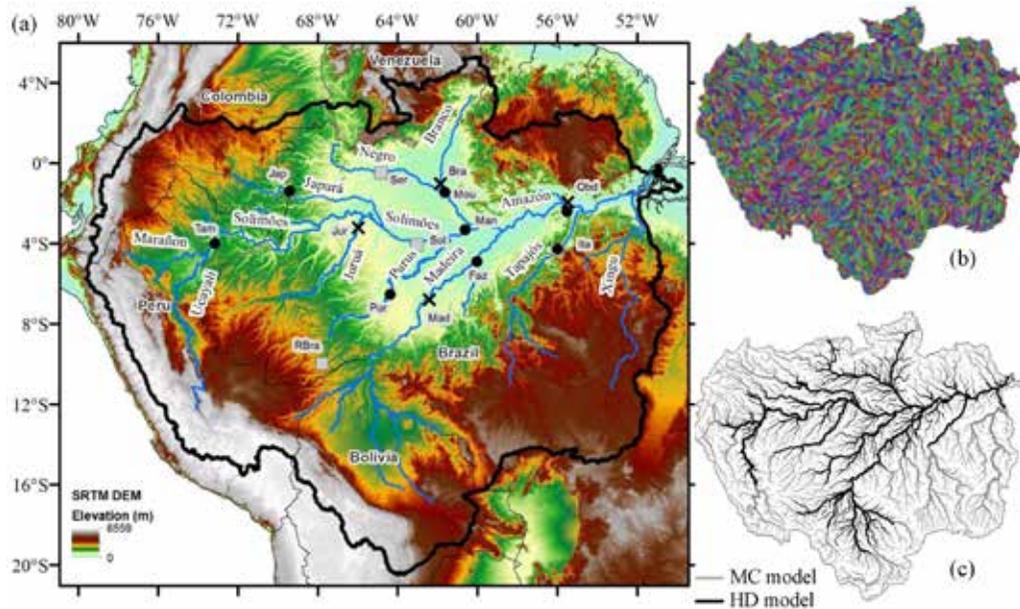


Figura 7. (a) Bacia Amazônica com principais rios, limites internacionais, relevo do SRTM DEM e alguns sítios de validação, além da discretização em (b) minibacias e (c) trechos de rio.

### 3.4. Método de análise de previsibilidade hidrológica

Visando futuros desenvolvimentos em previsão de vazões, foram avaliadas as fontes de incertezas na previsibilidade hidrológica da bacia Amazônica. O conhecimento das fontes de erros de previsões hidrológicas pode guiar a escolha entre (i) aperfeiçoar a estrutura do modelo hidrológico, (ii) aprimorar os forçantes meteorológicas, seja precipitação observada no passado ou previsões atmosféricas, ou (iii) desenvolver técnicas de assimilação de dados para a melhor estimativa de condições hidrológicas iniciais (umidade do solo, volume d'água em rios e várzeas alagáveis, entre outros). Foi avaliada a importância relativa entre erros nas condições iniciais e forçantes de precipitação como fontes de incerteza na previsão de vazões na bacia Amazônica. Utilizou-se uma técnica que compara previsões do tipo "Ensemble Streamflow Prediction" (ESP) e "reverse Ensemble Streamflow Prediction" (reverse-ESP), desenvolvida por Wood e Lettenmaier (2008) (Figura 8).

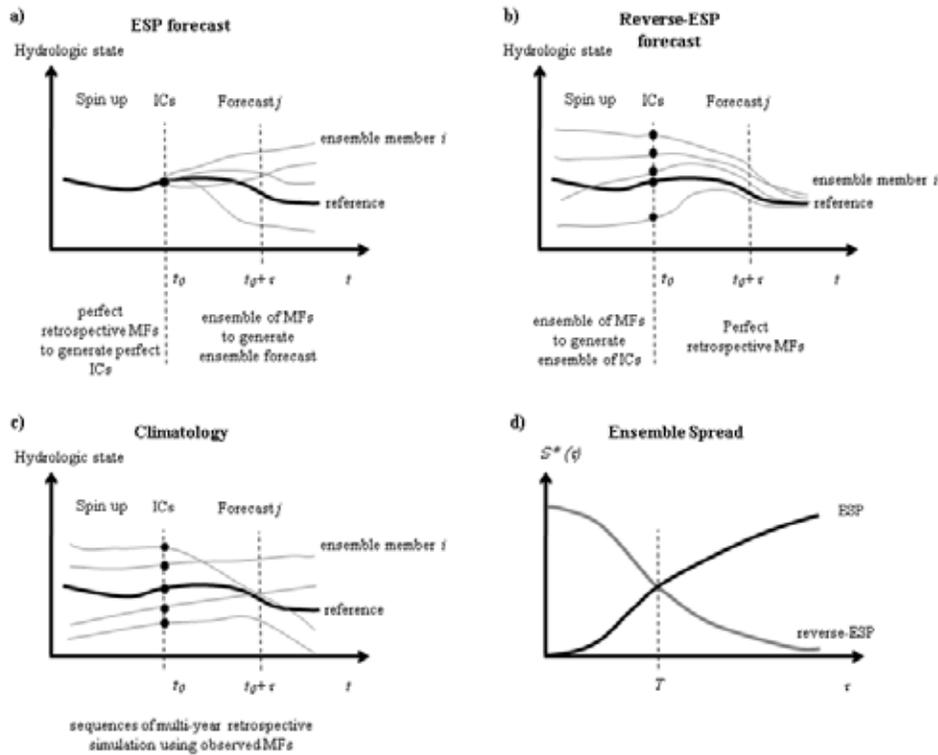


Figura 8. Representação esquemática da avaliação de previsibilidade hidrológica. (a) Previsão ESP, (b) previsão reverse-ESP, (c) climatologia e (d) espalhamento do conjunto de previsões  $S^*$  em função da antecedência. Modificado de Wood e Lettenmaier (2008).

Na previsão ESP (DAY, 1985), o modelo hidrológico utiliza condições iniciais “perfeitas”, e a bacia é simulada utilizando um conjunto de dados de precipitação observada dos anos passados. Por outro lado, na previsão reverse-ESP o modelo é iniciado com um conjunto de condições iniciais simuladas de anos passados e é então forçado com precipitação “perfeita”, ou seja, observada no mesmo ano analisado. Conseqüentemente, as previsões ESP e reverse-ESP apresentam indicativos da incerteza nas vazões previstas devido a erros na precipitação e nas condições iniciais, respectivamente. Em ambos os casos, é possível calcular-se o espalhamento  $S$  do conjunto de vazões previstas (desvio padrão) como uma medida de incerteza. Além disso, baseado nesta medida de incerteza, é possível avaliar-se a relativa importância de erros nas condições iniciais ou precipitação em função da antecedência da previsão  $\tau$  (dias). A partir desta análise, avaliou-se um indicativo da memória da bacia, definido como a antecedência  $T$  a partir do qual os erros na precipitação se tornam mais importantes do que erros nas condições iniciais. Mais detalhes são encontrados em Paiva et al. (2012).

### 3.5. Assimilação de dados in situ de altimetria espacial

Foi desenvolvida e avaliada uma abordagem de assimilação de dados de vazões e níveis d'água in situ e de altimetria espacial no modelo hidrológico-hidrodinâmico da bacia Amazônica.

Utilizou-se a técnica de assimilação de dados Ensemble Kalman Filter - EnKF (EVENSEN, 2003), que é baseada no filtro de Kalman – KF desenvolvido por Kalman (1960). Neste método, o modelo representando a dinâmica do sistema estudado (MGB-IPH) é representado pela seguinte equação:

$$CE_{af} = \frac{(CE_{a1} \cdot V_{a1})}{(V_{a1})} + \frac{(CE_{a2} \cdot V_{a2})}{(V_{a2})},$$

onde  $x$  é o vetor com todas as variáveis de estado do modelo, e  $u$  e  $\theta$  representam os forçantes (precipitação) e parâmetros do modelo, respectivamente,  $M$  representa as equações do modelo que relacionam os estados entre os tempos  $t_k$  e  $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ , e  $q_k$  representa os erros em  $M$ ,  $x_k$ ,  $u_k$  e  $\theta$ . Neste estudo,  $x$  é composto por todas as variáveis de estado do MGB-IPH: umidade do solo, vazão e níveis d'água nos rios. A equação das observações é definida como:

$$AF = \sum ((C.L). 0,75)$$

sendo  $y$  o vetor de observações (vazões ou níveis d'água em alguns pontos),  $\epsilon$  o vetor dos erros nas observações, e  $H$  o operador que relaciona as variáveis de estado  $x$  com as observações  $y$ .

Para a assimilação de dados com o filtro de Kalman, a cada intervalo de tempo  $k$ , o modelo é integrado utilizando a primeira equação, fornecendo uma estimativa das variáveis de estado  $x_{k+1}$ ; e, quando uma observação é disponível, o erro desta previsão é computado como  $[y_{k+1} - H(x'_{k+1})]$ . Assim, o objetivo da assimilação de dados é obter uma estimativa ótima  $x_{k+1}$  das variáveis de estado, considerando os erros do modelo e das observações. Consideram-se também premissas como: (i) linearidade, (ii) inexistência de viés e correlação espaço-temporal nos erros das observações, (iii) inexistência de viés e correlação temporal nos erros do modelo e (iv) inexistência de correlação entre os erros das observações e do modelo.

Consequentemente, a estimativa ótima, não tendenciosa e de mínima variância das variáveis de estado é dada por:

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}^f)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T [\mathbf{H}\mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}$$

onde  $\mathbf{K}$  é o ganho de Kalman,  $\mathbf{P}$  é a matriz de variância-covariância dos erros do modelo  $q$ , e  $\mathbf{R}$  é a matriz de variância-covariância dos erros das observações  $\varepsilon$ . A aplicabilidade do filtro de Kalman é limitada, já que os sistemas hidrológicos normalmente são não lineares (LIU; GUPTA, 2007) e as premissas acima mencionadas não são sempre válidas. Neste sentido, Evensen (2003) desenvolveu uma versão não linear do KF, o Ensemble Kalman Filter (EnKF). No EnKF, utiliza-se o método Monte Carlo para gerar um conjunto de trajetórias do modelo onde a evolução dos seus erros, a matriz de variância-covariância pode ser estimada (Figura 5), cada membro do conjunto é atualizado com as mesmas equações do KF (Equações 3 e 4).

Utilizou-se o modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-IPH implementado na bacia Amazônica. Tendo em vista o enfoque em previsão hidrológica, o modelo MGB-IPH foi forçado com dados de precipitação estimada por satélite. Utilizaram-se os produtos TRMM 3B42 (HUFFMAN et al., 2007) e TRMM Merge (ROZANTE et al., 2010).

Avaliou-se a assimilação de dados de vazões observadas em estações fluviométricas e de níveis d'água estimadas por altimetria espacial. Foram utilizados dados de vazões diárias de 111 estações fluviométricas das agências ANA, SENAMHI e HYBAM. As estimativas de altimetria espacial foram desenvolvidas por Santos da Silva et al. (2010) com dados do satélite ENVISAT, em 212 estações virtuais, com resolução temporal de ~35 dias e precisão de 10 a 40 cm.

Para a aplicação do EnKF com a técnica de Monte Carlo, utilizou-se um conjunto de simulações com 200 membros. Consideram-se os erros do modelo hidrológico sendo oriundos de erros na precipitação, caracterizados por uma distribuição log-normal e correlacionados no tempo e espaço. Baseado em trabalhos anteriores e em uma análise de sensibilidade (PAIVA et al., 2013b), foram assumidos erros com desvio padrão de 50% e comprimentos de correlação temporal e espacial de 10 dias e  $1.5^\circ$ , respectivamente. Os erros padrões das observações de vazões e níveis d'água foram considerados

iguais a 10% e 20 cm, respectivamente, baseados em comparações entre vazões estimadas por curva chave e medidas in situ e em Santos da Silva et al. (2010).

### 3.6. Previsões de vazões

A partir do modelo hidrológico-hidrodinâmico e do esquema de assimilação de dados desenvolvidos neste trabalho, avaliou-se um protótipo de sistema de previsão de vazões para a bacia Amazônica. Foram avaliadas previsões de vazões produzidas com a técnica “Ensemble Streamflow Prediction” (ESP) (DAY, 1985), onde se utilizaram condições iniciais ótimas estimadas pelo esquema de assimilação de dados e o modelo foi forçado com um conjunto de dados de precipitação dos anos passados. As previsões foram geradas a cada 10 dias, com horizonte de 90 dias para o período de 1/1/2004 a 31/12/2005. Mais informações são encontradas em Paiva et al. (2013b).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Validação da modelagem hidrológica-hidrodinâmica

A validação dos resultados de simulação versus vazões observadas mostra o bom desempenho do modelo MGB-IPH acoplado ao módulo hidrodinâmico na bacia Amazônica. Conforme a Figura 9, em 70% dos postos fluviométricos o índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (ENS) é maior que 0,6, o que é relativamente alto considerando todas as limitações de dados em uma grande bacia como a Amazônia. Em geral, o desempenho é melhor nos grandes rios (como o rio Amazonas, Figura 9), mas os resultados também são satisfatórios em rios menores que apresentam cheias mais rápidas. Grande parte dos erros encontrados se concentra em áreas da Bolívia, Peru e Colômbia, onde o modelo subestima vazões, provavelmente como consequência da baixa qualidade do produto de precipitação TRMM 3B42 nestas regiões, que são montanhosas e com baixo monitoramento pluviométrico in situ, como discutido em Paiva et al. (2013a).

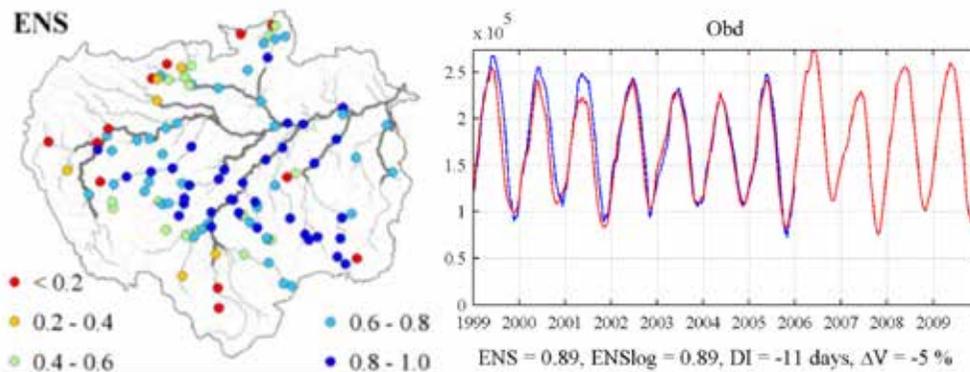


Figura 9. Validação dos resultados de vazões diárias: distribuição espacial do índice ENS nas estações fluviométricas e vazões simuladas (vermelho) e observadas (azul) no rio Amazonas em Óbidos (Obd – ver Fig. 7).

Os resultados de simulação concordam com observações de níveis d'água (Figura 10). O ENS é maior que 0.60 em 55% dos postos fluviométricos e em 60% das estações virtuais. Os resultados são satisfatórios principalmente nos grandes rios (como o rio Juruá, Figura 10). Entretanto, erros são encontrados em alguns locais, parte deles relacionada aos erros na vazão discutidos anteriormente. Em outras áreas (como o baixo Amazonas), os erros podem ser decorrentes das incertezas no SRTM DEM e consequentemente em alguns parâmetros do modelo, conforme Paiva et al. (2013a).

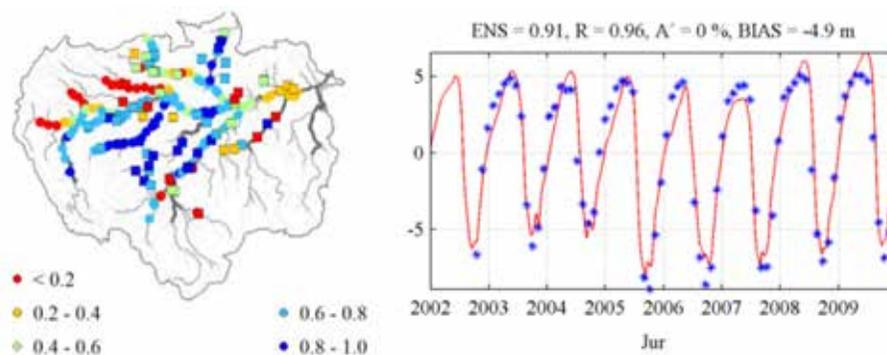


Figura 10. Validação dos resultados de níveis d'água: Distribuição espacial do índice ENS nas estações fluviométricas (quadrados) e de altimetria espacial (círculos). Níveis d'água simulados (vermelho) e estimados por altimetria espacial (pontos azuis) no rio Juruá (Jur – ver Fig. 7).

Em geral, as estimativas de extensão de áreas alagadas do modelo são semelhantes às de sensoriamento remoto, apresentando a mesma distribuição espacial (Figura 11). O modelo também representa variação temporal da área total alagada da bacia, com  $ENS = 0.71$ , erro na amplitude de -26% e um pequeno viés de -7%. Entretanto, uma análise em diferentes regiões mostra a existência de alguns erros relacionados a incertezas no SRTM DEM, como discutido por Paiva et al. (2013a).

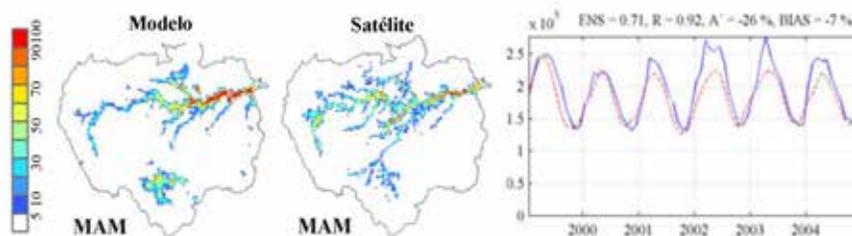


Figura 11. Distribuição espacial das áreas alagadas no período Março-Abril-Maio (1999 a 2004) simuladas e estimadas por sensoriamento remoto e variação temporal da área alagada total na Amazônia modelada (vermelho) e de sensoriamento remoto (azul).

Por fim, mostra-se que o modelo é capaz de representar a variabilidade espaço-temporal do armazenamento d'água terrestre, se comparado a estimativas da missão GRACE (Figura 12). Os valores de TWS simulados médios em toda a bacia são semelhantes ao GRACE, sendo o valor ENS alto (0.93) e o erro na amplitude baixo (12%). Além disso, eventos extremos como a seca de 2005 e a cheia de 2009 são representados pelo modelo. Avaliaram-se também 21 subregiões de  $4^\circ \times 4^\circ$ , onde  $ENS < 0.8$  em somente 5 delas, mostrando o bom desempenho do modelo. Estas são as mesmas regiões que apresentaram erros nas vazões, como discutido anteriormente.

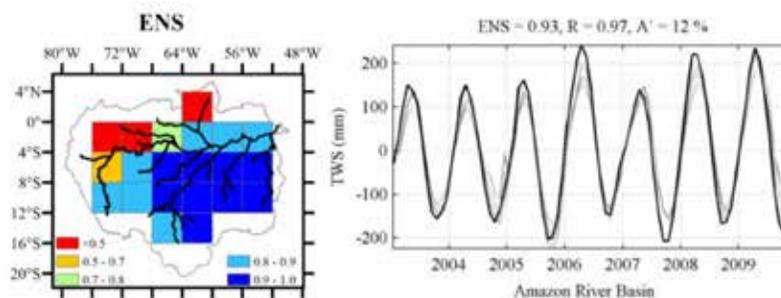


Figura 12. Validação dos resultados de armazenamento d'água (TWS) calculados pelo MGB-IPH versus estimativas da missão GRACE: distribuição espacial do índice ENS e variação temporal de TWS na bacia Amazônica do MGB-IPH (preto) e 6 soluções do GRACE (cinza).

## 4.2. Análise de processos hidrológicos amazônicos

A partir dos resultados de simulação do modelo MGB-IPH, alguns aspectos do funcionamento físico da bacia Amazônica foram explorados. A Figura 13 apresenta resultados acerca da variabilidade na água armazenada (TWS) na bacia e o papel das águas superficiais, do solo e subterrâneas neste processo. A variação temporal de TWS apresenta uma forte sazonalidade e uma elevada amplitude (~325 mm em toda a bacia), sendo maior na Amazônia central (>750 mm) e menor na região andina (< 300 mm). Foram computados os armazenamentos d'água e sua amplitude de variação nos três principais compartimentos hidrológicos: águas superficiais (rios, várzeas inundáveis e escoamento superficial), água no solo e águas subterrâneas (Figura 13). As águas superficiais são as maiores responsáveis pela variabilidade de TWS na bacia Amazônica (56%), seguidas pela água no solo (36%) e águas subterrâneas (8%) com menor importância. As águas superficiais apresentam um papel dominante na variação de TWS principalmente na Amazônia central, onde existem vastas planícies de inundação (Figuras 11 e 13), enquanto a água no solo é mais importante no sudoeste da bacia. Estes resultados são coerentes com estudos anteriores, como discutido em Paiva et al. (2013a).

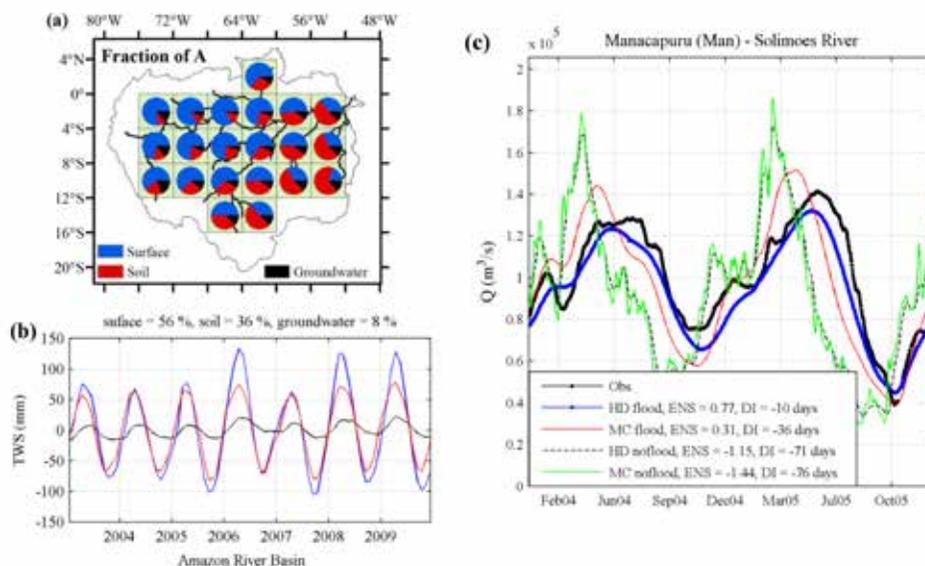


Figura 13. Análise de processos hidrológicos amazônicos. (a) Distribuição espacial da contribuição das águas superficiais (azul), água no solo (vermelho) e águas subterrâneas (preto) na variação do armazenamento de água terrestre estimado pelo MGB-IPH e (b) variação temporal do TWS em cada compartimento hidrológico.

(c) Vazão observada (preto) e simulada em Manacapuru usando os modelos hidrodinâmico (azul) e Muskingum Cunge (vermelho) com planície de inundação e hidrodinâmico (preto pontilhado) e Muskingum Cunge (verde) sem planície de inundação.

Avaliou-se também o papel das várzeas de inundação e efeitos de remanso na propagação de ondas de cheia nos rios amazônicos. Foram comparados resultados de simulações com diferentes níveis de simplificação na representação destes processos: (i) modelo hidrodinâmico ou modelo Muskingum Cunge, para representar ou não forças de pressão no escoamento e efeitos de remanso; (ii) simulação ou não do armazenamento d'água nas várzeas e trocas com o rio. Observa-se na Figura 13 o melhor desempenho do modelo hidrodinâmico com planície de inundação. Incluindo efeitos de remanso e planícies de inundação, tem-se um atraso e atenuação das ondas de cheia, e as simulações concordam com as observações. Sem estes dois efeitos, o hidrograma fica adiantado e menos suavizado. Por outro lado, incluir apenas o efeito das várzeas não é suficiente, e a cheia segue adiantada. Estes resultados mostram o importante papel das várzeas no atraso e na atenuação das ondas de cheia, mas que os efeitos de remanso também têm uma influência significativa.

Por fim, avaliou-se também a variabilidade especial da precipitação na Amazônia brasileira utilizando dados de sensoriamento remoto da missão TRMM ("Tropical Rainfall Measurement Mission") (HUFFMAN et al., 2007). Em resumo, os resultados (Figura 14) mostram uma clara redução na precipitação média anual e número de dias chuvosos do TRMM 3B42 sobre os grandes corpos d'água amazônicos, como os rios Solimões, Amazonas, Tapajós e Negro e o reservatório de Balbina, confirmados por testes estatísticos. Este comportamento é variável ao longo do dia, sendo mais marcado durante a tarde, quando grande parte da precipitação é de origem convectiva e se invertendo à noite e pela manhã. Estas características não estão de acordo com problemas técnicos das estimativas de precipitação por sensoriamento remoto relatados em estudos anteriores. Por outro lado, os padrões aqui identificados estão de acordo com o fenômeno chamado de brisa fluvial, causado por diferenças no balanço de energia na água e na floresta, que poderia causar uma maior formação de nuvens e precipitação sobre a floresta durante o dia e o contrário à noite, descrito em outros trabalhos na região. Os resultados sugerem que a precipitação média da bacia Amazônica pode estar sendo sistematicamente subestimada, já que grande parte dos postos pluviométricos da região se localiza em cidades situadas junto aos maiores rios. Tal resultado tem importantes implicações em estudos hidrológicos, nas validações das estimativas de precipitação de sensoriamento remoto, e em aplicações de modelagem hidrológica. Mais detalhes são encontrados em Paiva et al. (2011).

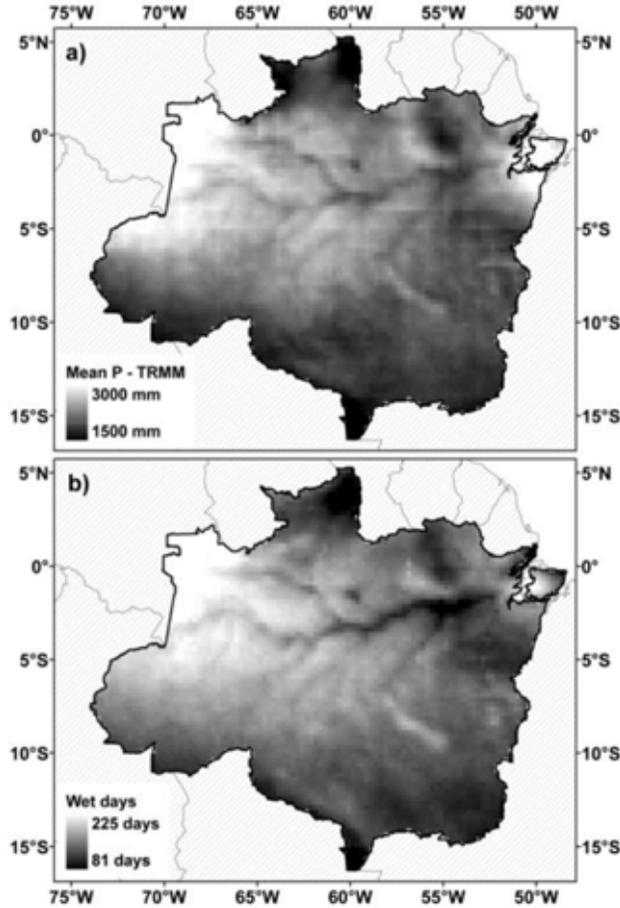


Figura 14. (a) Precipitação media anual e (b) número de dias chuvosos anual oriundos dos dados TRMM 3B42 data (1998-2009).

### 4.3. Análise da previsibilidade hidrológica

A Figura 15 apresenta resultados acerca da análise de previsibilidade hidrológica na bacia Amazônica usando os métodos do item 3.4. Apresentam-se resultados no rio Amazonas em Óbidos de previsões começando em 15-dez-2003, 15-mar-2004, 15-jul-2004 e 15-set-2004. O espalhamento do conjunto reverse-ESP é muito maior que o do conjunto ESP em todos os períodos do ano. A incerteza devido a erros na precipitação se torna maior do que devido a erros nas condições iniciais somente após 72 dias de antecedência. Este resultado sugere que a previsibilidade hidrológica no rio Amazonas é muito mais influenciada por estados hidrológicos iniciais do que pela precipitação, especialmente considerando os longos tempos de propagação das ondas de cheia amazônicas. Os resultados também foram

avaliados espacialmente, computando-se a antecedência  $T$  a partir da qual a precipitação desempenha um papel mais importante que as condições iniciais do modelo. Valores elevados de  $T$  foram encontrados na maior parte dos rios amazônicos. Valores pequenos de  $T$  são presentes principalmente nas regiões de cabeceiras, enquanto  $T$  é maior que 30 dias nos principais rios amazônicos e se encontra entre 2 e 3 meses no curso principal do rio Solimões/Amazonas. Tal comportamento deve estar relacionado aos altos tempos de viagem das ondas de cheia nos rios amazônicos, que são atrasadas pela presença de grandes áreas alagáveis, conforme discutido em Paiva et al. (2012) e Paiva et al. (2013a).

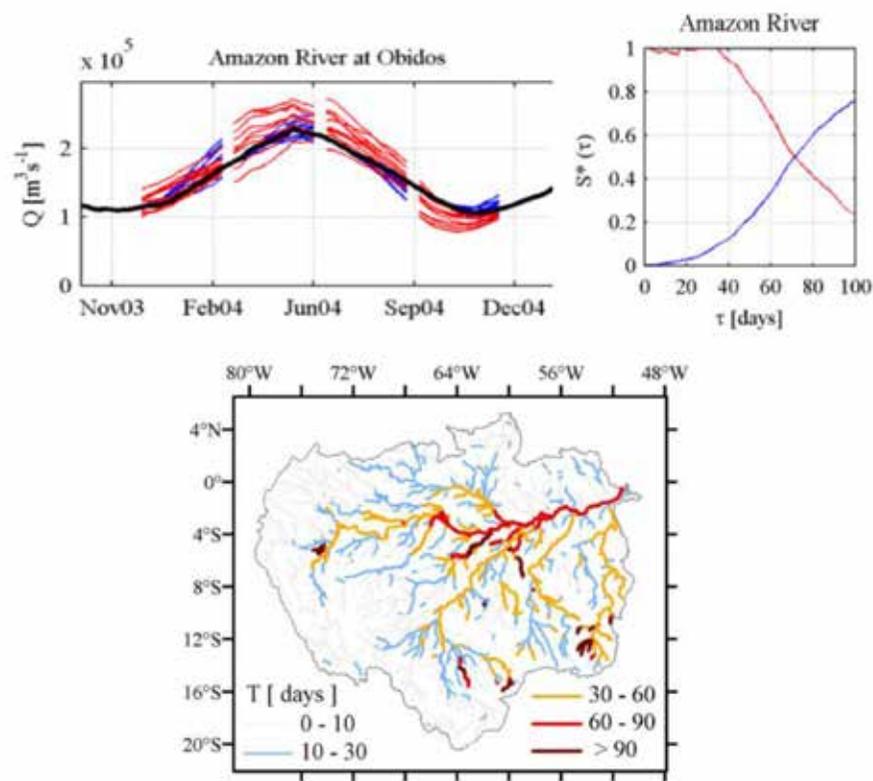


Figura 15. Simulação retrospectiva (preto), previsões ESP (azul) e reverse-ESP (vermelho) de vazões e espalhamento dos conjuntos de previsão  $S^*(\tau)$  em função da antecedência da previsão no rio Amazonas em Óbidos. Distribuição espacial dos valores  $T$  mostrando a antecedência a partir da qual a incerteza da precipitação se torna mais importante que a das condições hidrológicas iniciais.

Estes resultados indicam que as incertezas nas condições iniciais desempenham um importante papel na previsibilidade de vazões mesmo para altas antecedências de previsão (~ 1 a 3 meses). Os resultados sugerem a potencialidade de um sistema baseado em um modelo hidrológico forçado com dados meteorológicos históricos e usando condições iniciais ótimas para previsão de vazões em tempo real na bacia Amazônica. Além disso, mostra-se a importância do desenvolvimento de técnicas de assimilação de dados em modelos hidrológicos para estimar os estados hidrológicos a serem utilizados no início de cada previsão, o que motivou o desenvolvimento das pesquisas apresentadas nos itens a seguir.

#### 4.4. Assimilação de dados in situ e de altimetria espacial

Neste item, avaliou-se primeiramente a assimilação de dados de vazões in situ. Os resultados de vazão de simulações usando ou não assimilação de dados foram comparados com observações nas estações fluviométricas. Foram utilizadas as métricas: índice de Nash e Sutcliffe (ENS) e alteração na raiz do erro médio quadrático ( $\Delta rms$ ) entre valores observados e simulados com ou sem assimilação de dados.

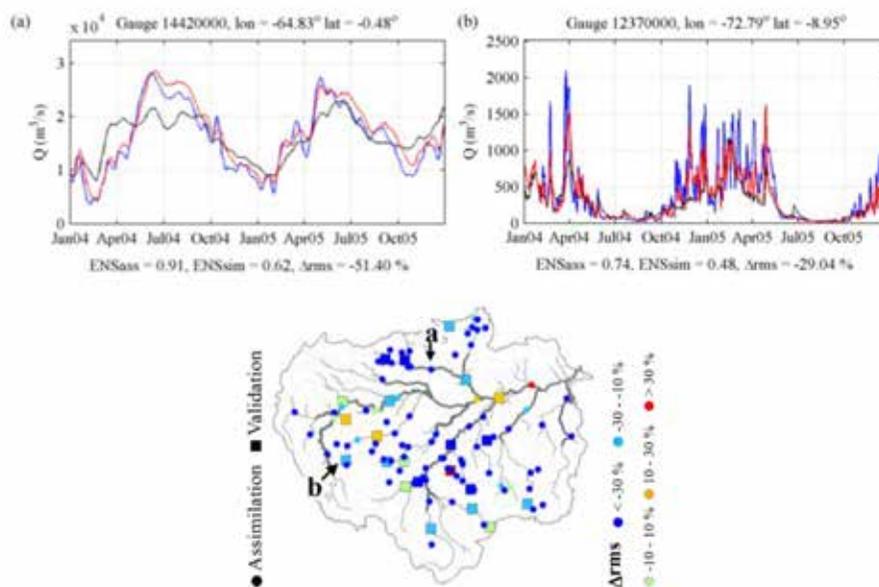


Figura 16. Avaliação da assimilação de vazões in situ. Distribuição espacial da mudança na raiz do erro médio quadrático (rms) em postos fluviométricos utilizados na assimilação (círculos) e validação (quadrados) e vazões diárias observadas (azul), simuladas sem (preto) e com (vermelho) assimilação de dados em um ponto de assimilação no rio Negro (ponto a) e outro de validação no rio Jurúá (ponto b).

Observa-se, na Figura 16, que as estimativas do modelo melhoram com a assimilação de dados na maioria dos postos, inclusive naqueles utilizados somente para validação. Em média, os valores de ENS aumentam de 0,71 para 0,94, e o erro rms diminui em 49%, fazendo com que as vazões simuladas fiquem muito mais próximas das observadas, como ilustrado em um posto utilizado para a assimilação no rio Negro (ponto a). O modelo também melhora nos postos fluviométricos utilizados para validação (Figura 16, ponto b), onde o ENS aumentou de 0,62 para 0,91 e  $\Delta rms = -16\%$ . Estes resultados mostram que a assimilação de dados melhora as estimativas do modelo não somente nos locais dos postos utilizados, mas possivelmente também em locais não monitorados.

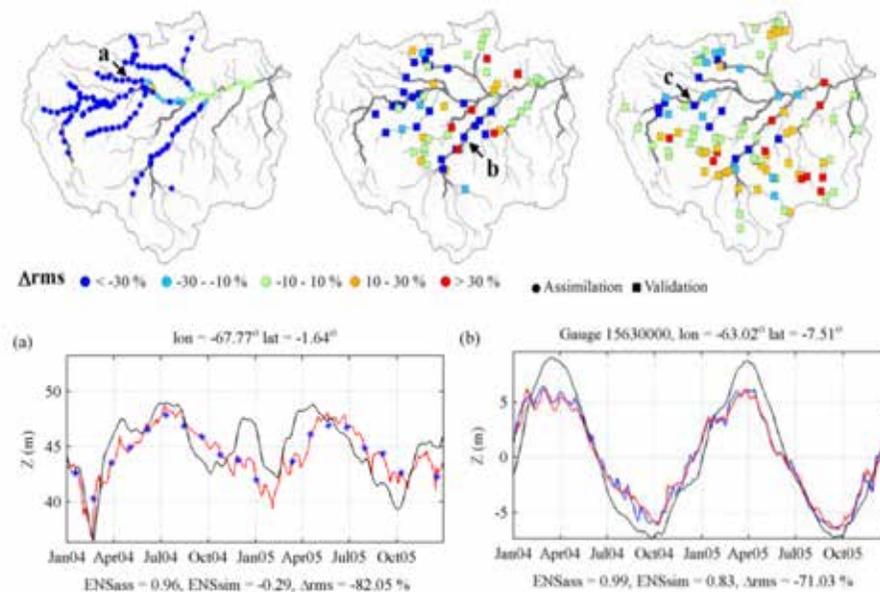


Figura 17. Avaliação da assimilação de altimetria espacial. Distribuição espacial da mudança na raiz do erro médio quadrático (rms) nas estações virtuais usadas na assimilação (a) e nos postos fluviométricos com dados de cotas (b) e vazão (c) usados na validação. Níveis d'água observados (azul) e simulados sem (preto) e com (vermelho) assimilação de dados em uma estação virtual no rio Japurá (ponto a) e em um posto fluviométrico no rio Madeira (ponto b).

Em um segundo experimento, pode-se observar como a assimilação de níveis d'água em estações de altimetria espacial melhora as estimativas do modelo nestes pontos (Figura 17), como ilustrado no rio Japurá (ponto a). Os valores de ENS aumentam de 0,66 para 0,96 e os erros diminuem significativamente ( $\Delta rms = -56\%$ ). Esta melhora também é observada em estações fluviométricas utilizadas para a validação dos resultados (ponto b). Se os resultados forem

comparados somente nas estações fluviométricas localizadas em rios onde existem dados de altimetria espacial, observa-se uma melhora nas estimativas de níveis d'água do modelo, com  $\Delta_{rms} = -43\%$  e ENS aumentando de 0,75 para 0,94. No caso de vazões, a assimilação de dados de altimetria causa uma melhora de  $\Delta_{rms} = -15\%$  nos postos localizados em rios com estações virtuais. Entretanto, a assimilação pode piorar os resultados em alguns outros trechos de rio. Entre os motivos para este tipo de problema, pode-se citar uma possível má caracterização das fontes de incerteza do modelo, conforme discutido em Paiva et al. (2013b). Por outro lado, destaca-se o fato de a assimilação de dados de altimetria espacial melhorar as estimativas do modelo em termos de níveis d'água e também de vazões. Além disso, embora os dados de altimetria do satélite ENVISAT possuam baixa resolução temporal (~35 dias), a sua assimilação melhora os resultados a nível diário. Provavelmente, a baixa resolução temporal é compensada pela alta resolução espacial e pelo fato das medições em diferentes pontos não serem simultâneas.

#### 4.5. Previsão de vazões

Neste item, apresenta-se a avaliação de previsões de vazões na bacia Amazônica utilizando o sistema desenvolvido neste estudo. As previsões foram comparadas com observações (Qobs) utilizando o índice SScli, que compara o desempenho de vazões previstas (Qfor) com o de uma previsão de referência baseada na climatologia de vazões (Qclim) (Figura 18). Os valores de SScli variam entre  $-\infty$  e 1 (ótimo), indicando que a previsão é melhor que a referência quando positivos.

Conforme a Figura 18, as previsões para baixos horizontes de tempo (por exemplo, 5 dias) apresentam bom desempenho na maioria das estações. Entretanto, a qualidade das previsões diminui em função da antecedência (por exemplo, 30 e 90 dias), sendo pior em rios pequenos, mas informativa (SScli >0) principalmente nas estações localizadas nos grandes rios amazônicos. Por exemplo, para uma antecedência de 90 dias, SScli permanece positivo em quase todas as estações do rio Solimões/Amazonas e alguns tributários.

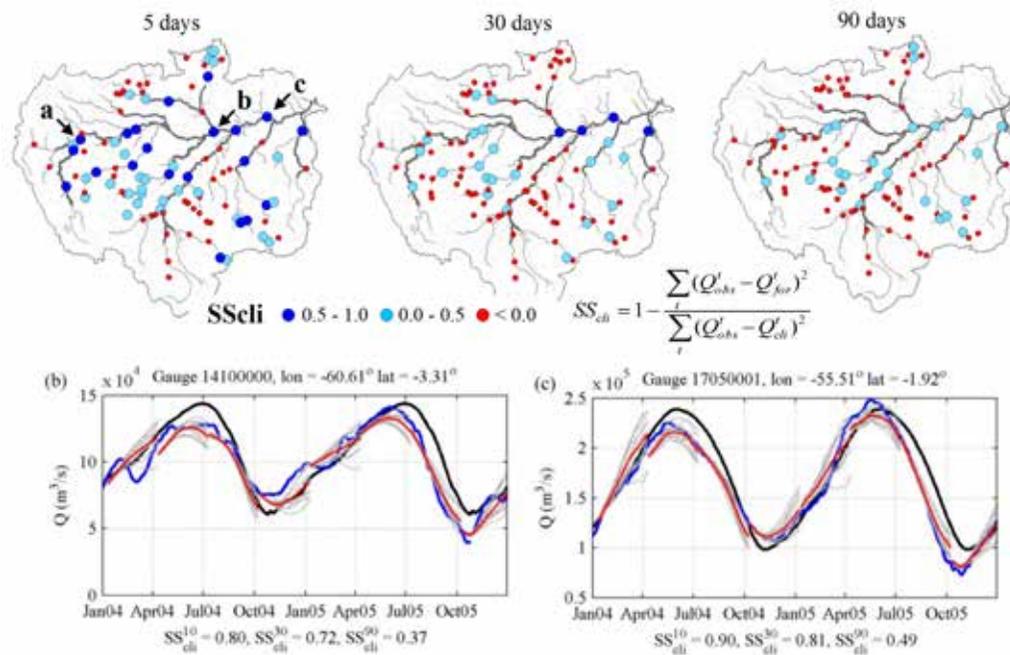


Figura 18. Avaliação das previsões de vazões. Distribuição espacial do índice de desempenho SScli para horizontes de previsão de 5, 30 e 90 dias. Vazões observadas (azul), climatológicas (preto), algumas previsões por conjunto (cinza) e média das previsões (vermelho) no rio Solimões em Manacapuru (ponto b) e no rio Amazonas em Óbidos (ponto c).

Tal comportamento é ilustrado na Figura 18 nos rios Solimões e Amazonas. As previsões são melhores do que simplesmente usar a climatologia das vazões observadas e os valores previstos concordam com as observações mesmo em elevados horizontes de previsão. Este comportamento pode ser explicado pela grande extensão e conseqüente elevada memória da bacia Amazônica, que, associada aos altos tempos de propagação das ondas de cheia, torna a previsibilidade hidrológica nos grandes rios muito mais dependente das condições iniciais, i.e., volumes d'água estocados, do que da precipitação no futuro, conforme discutido por Paiva et al. (2012). A análise da Figura 18 também mostra que o modelo previu com sucesso a seca de 2005. Neste ano, o período de águas baixas ocorreu ~1 mês antes do normal e os níveis d'água chegaram a valores historicamente baixos, causando a suspensão da navegação (MARENGO et al., 2005). Mesmo assim, o modelo foi capaz de prever este comportamento com cerca de 90 dias de antecedência.

## 5. CONCLUSÕES

A bacia Amazônica se destaca como o principal sistema hidrológico do mundo e pelo seu importante papel no sistema terrestre, influenciando o ciclo de carbono e o clima global. Recentes pressões antrópicas, como o desflorestamento, mudanças climáticas e a construção de barragens hidrelétricas, somadas às crescentes cheias e secas extremas ocorridas nesta região, motivam o estudo da hidrologia da bacia Amazônica. Ao mesmo tempo, têm se desenvolvido métodos hidrológicos de modelagem e monitoramento via sensoriamento remoto que podem fornecer as bases técnicas para este fim. Neste sentido, este trabalho buscou a compreensão e previsão da hidrologia da bacia Amazônica. Foram desenvolvidas e avaliadas diversas técnicas, incluindo de modelagem hidrológica-hidrodinâmica de larga escala, de assimilação de dados in situ e de sensoriamento remoto, e de previsão hidrológica. Este conjunto de técnicas foi utilizado para compreender o funcionamento da bacia Amazônica em termos de seus processos hidrológicos e sua previsibilidade hidrológica.

Apresentam-se resultados de um estudo de modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica usando o modelo hidrológico MGB-IPH acoplado a um modelo hidrodinâmico de rios e várzeas inundáveis. O modelo utilizado enquadra-se no estado da arte da modelagem física/conceitual de grandes bacias hidrográficas. Uma validação detalhada do modelo mostra a sua capacidade de representar vazões observadas em estações fluviométricas, além de níveis d'água de altimetria espacial, extensão de áreas alagadas obtidas de sensoriamento remoto e armazenamento de água terrestre estimada por gravimetria espacial. Parte dos erros encontrados deve estar relacionada a incertezas nos dados de entrada, como estimativas de precipitação por satélite e parâmetros geométricos de rios e várzeas inundáveis. Estes resultados também mostram o grande potencial de informações oriundas de sensoriamento remoto para a validação e aperfeiçoamento de modelos hidrológicos de grandes bacias.

O funcionamento hidrológico da bacia Amazônica foi estudado utilizando-se resultados de modelagem e observações de sensoriamento remoto. A Amazônia apresenta uma marcada variabilidade sazonal no armazenamento de água terrestre, com altas amplitudes de variação. Tal variabilidade é dominada pela dinâmica das águas superficiais (56%), principalmente na Amazônia central, que possui grandes várzeas de inundação. A água no solo também é responsável por parte (36%) da variabilidade no armazenamento d'água na bacia, e as águas subterrâneas não apresentam uma grande contribuição (8%) para este processo. Investigou-se também o papel das várzeas de inundação e efeitos de remanso na propagação das grandes

cheias amazônicas. Uma importante interação entre os níveis d'água, áreas alagadas e vazões ocorre durante a passagem das ondas de cheia, sendo este comportamento amplificado com os efeitos de remanso. As várzeas de inundação atuam armazenando volumes d'água extravasados pelo rio, atenuando e atrasando as ondas de cheia, atraso este de vários meses nos grandes rios amazônicos.

Através de estimativas de precipitação de sensoriamento remoto da missão TRMM, estudou-se a variabilidade espacial da precipitação na Amazônia brasileira. Em resumo, os resultados mostram uma clara redução na precipitação média anual e número de dias chuvosos sobre os grandes corpos d'água amazônicos. Como grande parte dos postos pluviométricos da bacia Amazônica localiza-se ao longo dos rios, as estimativas de precipitação baseadas em pluviômetros podem estar sendo sistematicamente subestimadas, tendo importantes implicações sobre estudos nesta região.

As características de previsibilidade hidrológica na bacia Amazônica foram inicialmente estudadas a fim de guiar o desenvolvimento de um protótipo de sistema de previsão hidrológica. Os resultados deste estudo inicial mostram que a incerteza nas condições hidrológicas iniciais domina a previsibilidade hidrológica nos grandes rios amazônicos, mesmo para altos horizontes de previsão (1 a 3 meses), sendo mais importante que a incerteza da precipitação no futuro. Tais resultados motivaram o desenvolvimento de técnicas de assimilação de dados para a melhor estimativa das condições hidrológicas iniciais a serem utilizadas em um sistema de previsão hidrológica para a Amazônia.

Apresenta-se o desenvolvimento e avaliação de um esquema de assimilação de dados de vazões e níveis d'água de estações fluviométricas e altimetria espacial em um modelo hidrológico-hidrodinâmico da bacia Amazônica. Em geral, observa-se o bom desempenho da técnica Ensemble Kalman Filter para a assimilação de dados. No caso da assimilação de vazões, as estimativas do modelo melhoram tanto em estações usadas na assimilação como em pontos de validação, mostrando ser possível transferir informação para locais não monitorados. A assimilação de dados de altimetria espacial melhora as estimativas do modelo, em termos de níveis d'água e também de vazões em um menor grau, e a nível diário, embora as observações assimiladas possuam uma baixa resolução temporal. Em alguns casos, ocorre uma degradação dos resultados de simulação, podendo ser explicada por uma caracterização incompleta das fontes de incerteza do modelo. Estas técnicas poderiam ser utilizadas para o desenvolvimento de reanálises hidrológicas que seriam utilizadas em estudos retrospectivos, a exemplo dos eventos hidrológicos extremos ocorridos recentemente na Amazônia, ou como base para sistemas

de previsão hidrológica em tempo real. Além disto, dados de outros sensores remotos também poderiam ser assimilados no futuro, como da futura missão Surface Water and Ocean Topography (SWOT) (DURAND et al., 2010) das agências espaciais NASA e CNES, projetada para fornecer imagens de alta resolução de níveis d'água de águas continentais, isto é, rios, várzeas e reservatórios, com alta amostragem temporal.

Por fim, desenvolveu-se pela primeira vez um protótipo de sistema de previsão de vazões para a bacia Amazônica, baseado no modelo hidrológico-hidrodinâmico da Amazônia, inicializado com condições iniciais ótimas estimadas pelo esquema de assimilação de dados utilizando precipitação estimada por sensoriamento remoto disponível em tempo real. Os resultados são promissores e o modelo foi capaz de prever vazões nos principais rios amazônicos com grande antecedência (~1 a 3 meses), antecipando, por exemplo, a grande seca de 2005.

No geral, os resultados deste trabalho mostram a grande potencialidade do uso combinado de modelos hidrológicos e sensoriamento remoto para estudos visando a compreensão da hidrologia de grandes bacias e o desenvolvimento de previsões hidrológicas visando minimizar efeitos de cheias e secas extremas. Além disto, tais técnicas também possuem grande utilidade para o estudo e a previsão de impactos antrópicos sobre o ciclo hidrológico, como os oriundos de desmatamentos e mudanças da cobertura da terra, mudanças climáticas e construção de reservatórios para geração de energia elétrica.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFIERI, L.; BUREK, P.; DUTRA, E.; KRZEMINSKI, B.; MURARO, D.; THIELEN, J.; PAPPENBERGER, F. GloFAS – global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, 9, 12293-12332, 2012.

ALSDORF, D.; BATES, P.; MELACK, J.; WILSON, M.; DUNNE, T. The spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. **Geophysical Research Ltrs**, 34, 2007a.

ALSDORF, D. E.; RODRIGUEZ, E.; LETTENMAIER, D. P. Measuring surface water from space. **Reviews of Geophysics**, 45, 2007b.

BIANCAMARIA, S.; DURAND, M.; ANDREADIS, K. M.; BATES, P. D.; BOONE, A.; MOGNARD, N. M.; RODRIGUEZ, E.; ALSDORF, D. E.; LETTENMAIER, D. P.; CLARK, E. A. Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Arctic river modeling. **Remote Sensing of Environment**, 115, 2, 373-381, 2011.

BOURGOIN, L. M.; BONNET, M. P.; MARTINEZ, J. M.; KOSUTH, P.; COCHONNEAU, G.; TURCQ, P. M.; GUYOT, J. L.; VAUCHEL, P.; FILIZOLA, N.; SEYLER, P. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. **Journal of Hydrology**, 335, 140-156, 2007.

BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030**. v.3. Geração hidrelétrica. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2007.

CAPPELAERE, B.; LUBÈS-NIEL, H.; BERKHOFF, C.; THÉPAUT, H.; GUYOT, J. L.; OLIVEIRA, E. de; RODRIGUES, M. Prévisions des crues de l'Amazone. In: **Hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement** (Actes de la conférence de Paris, mai 1995), 355-366, IAHS Publ, 238, 1996.

CHEN, J. L.; WILSON, C. R.; TAPLEY, B. D. The 2009 exceptional Amazon

flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. **Water Resour. Res.**, 46, 2010.

CLARK, M. P.; RUPP, D. E.; WOODS, R. A.; ZHENG, X.; IBBITT, R. P.; SLATER, A. G.; SCHMIDT, J.; UDDSTROM, M. J. Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model. **Adv. Water Res.**, 31, 1309-1324, 2008.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; HOWARD, E. A. Simulating the surface waters of the Amazon River basin: Impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. **Hydrological Processes**, 22, 14, 2542-2553, 2008.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, 52, 878-895, 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CHOU, S. C.; GHUILHON, L. G.; CATALDI, M.; ALLASIA, D. G. Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, 344, 112-122, 2007.

DAY, G. N. Extended streamflow forecasting using NWSRFS. **J. Water Resour. Plann. Manage.**, 111, 157-170, 1985.

DURAND, M.; FU, L. L.; LETTENMAIER, D. P.; ALSDORF, D. E.; RODRÍGUEZ, E.; FERNANDEZ, D. E. The surface water and ocean topography mission: observing terrestrial surface water and oceanic submesoscale eddies. **Proceedings of the IEEE**, 98, 5, 766-779, 2010.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J. L.; COCHENEAU, G.; FILIZOLA, N.; LAVADO, W.; OLIVEIRA, E. de; POMBOSA, R.; VAUCHEL, P. Spatio-Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). **International Journal of Climatology**, 29, 1574-1594, 2009.

EVENSEN, G. The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation. **Ocean Dynamics**, 53, 343-367, 2003.

FARR, T. G.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROSEN, P.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; BURBANK, D.; OSKIN, M.; ALSDORF, D. The shuttle radartopography mission. **Reviews of Geophysics**, 45, 2, 2007.

FRAPPART, F.; CALMANT, S.; CAUHOPÉ, M.; SEYLER, F.; CAZENAVE, A. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, 100, 252-264, 2006.

FRAPPART, F.; RAMILLIEN, G.; MAISONGRANDE, P.; BONNET, M-P. Denoising satellite gravity signals by Independent Component Analysis. **IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters**, 7, 3, 421-425, 2010.

GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M-P.; ROTUNNO FILHO, O. C.; COLLISCHONN, W.; GUYOT, J.-L.; SEYLER, F.; MANSUR, W. J. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. **Hydrological Processes**, 24, 22, 3219-3236, 2010.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, 87, 404-428, 2003.

HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D.; GU, G.; NELKIN, E.; BOWMAN, K.; HONG, Y.; STOCKER, E.; WOLFF, D. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TCMA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **J. Hydromet**, 8, 38-55, 2007.

IPCC. **Climate Change 2007**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

JUNK, W. J. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. In: JUNK, W. J. (Ed.). **The Central-Azonian Floodplain: Ecology of a Pulsing System**, Ecological Studies. Springer Verlag/Heidelberg, Berlin/New York, 3-22, 1997.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Transactions of the AMSE – Journal of Basic Engineering**, 82 D, 35-45, 1960.

KERR, Y.; WALDTEUFEL, P.; WIGNERON, J.-P.; MARTINUZZI, J.-M.; FONT, J.; BERGER, M. Soil moisture retrieval from space: The soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission. **IEEE T. Geosci. Remote Sens.**, 39, 1729-1736, 2001.

KOSUTH, P.; CALLÈDE, J.; LARAQUE, A.; FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; SEYLER, P.; FRITSCH, J. M.; GUIMARÃES, V. Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. **Hydrological Processes**, 23, 22, 3141-3150, 2009.

KUMAR, S. V.; REICHLER, R. H.; PETERS-LIDARD, C. D.; KOSTER, R. D.; ZHAN, X.; CROW, W. T.; EYLANDER, J. B.; HOUSER, P. R. A Land Surface Data Assimilation Framework using the Land Information System: Description and Applications. **Advances in Water Resources**, 31, 1419-1432, 2008.

LEITE, C. C.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S.; HISSA, L. de Barros Viana. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. **Global Biogeochem. Cycles**, 26, GB2011, 2012.

LIU, Y.; GUPTA, H. V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. **Water Resour. Res.**, 43, W07401, 2007.

LIU, Y.; WEERTS, A. H.; CLARK, M.; HENDRICKS FRANSSEN, H.J.; KUMAR, S.; MORADKHANI, H.; SEO, D.J.; SCHWANENBERG, D.; SMITH, P.; VAN DIJK, A. I. J. M.; VAN VELZEN, N.; HE, M.; LEE, H.; NOH, S. J.; RAKOVEC, O.; RESTREPO, P. Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 16, 3863-3887, 2012.

MARENGO, J.; NOBRE, C.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.; OLIVEIRA, G. de; OLIVEIRA, R. de; CAMARGO, H.; ALVES, L. The drought in Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, 21, 495-516, 2008.

MEADE, R. H.; RAYOL, J. M.; DA CONCEIÇÃO, S. C.; NATIVIDADE, J. R. G. Backwater effects in the Amazon River basin of Brazil. **Environmental Geology and Water Sciences**, 18, 2, 105-114, 1991.

MELACK, J. M.; HESS, L. L.; GASTIL, M.; FORSBERG, B. R.; HAMILTON, S. K.; LIMA, I. B. T.; NOVO, E. M. L. M. Regionalization of methane emissions in the Amazon basin with microwave remote sensing. **Global Change Biol.**, 10, 530-544, 2004.

MELLER, A. **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

NEAL, J. C.; ATKINSON, P. M.; HUTTON, C. W. Flood inundation model updating using ensemble Kalman filter and spatially distributed measurements. **Journal of Hydrology**, 336, 401-415, 2007.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Res.**, 21, 2002.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G. Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. **Geophys. Res. Lett.**, 38, L04406, 2011.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrol. Process.**, 2012a.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; GONÇALVES, L. G. G. de. On the sources of hydrological prediction uncertainty in the Amazon. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 16, 3127-3137, 2012b.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; BUARQUE, D. C.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. B. Large scale hydrologic and hydrodynamic modelling of the Amazon River basin. **Water Resour. Res.**, 49, 2013a.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; GONÇALVES, L. G. G. de; CALMANT, S.; GETIRANA, A.; SANTOS DA SILVA, J. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 17, 2929-2946, 2013b.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, 406, 170-181, 2011.

PAPA, F.; PRIGENT, C.; AIRES, F.; JIMENEZ, C.; ROSSOW, W. B.; MATTHEWS, E. Interannual variability of surface water extent at the global scale, 1993-2004. **J. Geophys. Res.**, 115, 2010.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, A. K.; BALLESTER, V. M.; HESS, L. L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub>. **Nature**, 416, 617-620, 2002.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G. de; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and

Validation over South America. **Wea. Forecasting**, 25, 885-894, 2010.

SANTOS DA SILVA, J.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; ROTUNNO FILHO, O. C.; COCHONNEAU, G.; MANSUR, W. J. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. **Remote Sensing of Environment**, 114, 10, 2160-2181, 2010.

SCHONGART, J.; JUNK, W. J. Forecasting the flood-pulse in Central Amazonia by ENSO-indices. **J. Hydrol.**, 335, 124-132, 2007.

TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; RIES, J. C.; THOMPSON, P. F.; WATKINS, M. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. **Science**, 305, 503-505, 2004.

THIELEN, J.; BARTHOLMES, J.; RAMOS, M.-H.; ROO, A. de. The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 13, 125-140, 2009.

TOMASELLA, J.; BORMA, L. S.; MARENGO, J. A.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; NOBRE, C. A.; PRADO, M. C. R.. The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem. **Hydrol. Process.**, 25, 8, 1228-1242, 2010.

TRIGG, M. A.; WILSON, M. D.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; ALSDORF, D. E.; FORSBERG, B. R.; VEGA, M. C. Amazon flood wave hydraulics. **Journal of Hydrology**, 374, 92-105, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Hydraulic and Water Quality Model for a River Network**. Dissertation (Ph.D.) – Colorado State University, Fort Collins, 1978.

\_\_\_\_\_; DIAS, P. L. S.; CLARKE, R. T.; SAMPAIO, G. O.; COLLISCHONN, W. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay river basin. **Water Resources Research**, 39, 7, 1-2, 2003.

UVO, C. B.; GRAHAM, N. E. Seasonal runoff forecast for northern South America: a statistical model. **Water Resour. Res.**, 34, 12, 3515-3524, 1998.

UVO, C. B.; TÖLLE, U.; BERNDTSSON, R. Forecasting discharge in Amazonia using artificial neural networks. **International Journal of Climatology**, 20, 1495-1507, 2000.

WOOD, A. W.; LETTENMAIER, D. P. An ensemble approach for attribution of hydrologic prediction uncertainty. **Geophys. Res. Lett.**, 35, L14401, 2008.

WOOD, A. W.; MAURER, E.; KUMAR, A.; LETTENMAIER, D. P. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. **Journal of Geophysical Research**, 107, D20, 4429, 2002.

YAMAZAKI, D.; KANAE, S.; KIM, H.; OKI, T. A physically n dynamics in a global river routing model. **Water Resour. Res.**, 47, W04501, 2011.





## CATEGORIA ENSINO SUPERIOR

### 1º Lugar

**JOSÉ LEÔNIO DE ALMEIDA SILVA**

**Universidade Federal Rural do Semiárido - Ufersa (RN)**

Mistura de águas salinas como alternativa para a irrigação e produção de forragem no semiárido nordestino

### 2º Lugar

**OSVALDO ASSUNÇÃO MENDONÇA**

**Universidade Federal do Ceará - UFC (CE)**

Desempenho do dessalinizador térmico com estágios de recuperação de calor, formado por uma unidade de produção, torre com canais metálicos e perfis termoplásticos, e uma unidade de aquecimento, com coletor solar de tubo evacuado

### 3º Lugar

**NÍCOLAS GUERRA RODRIGUES TÃO**

**Universidade Federal de São Carlos - UFSCar (SP)**

Estudo da viabilidade de implantação de um sistema de tratamento de First Flush nas áreas urbanas da Bacia Santa Maria do Leme, São Carlos, SP

1º  
LUGAR

CATEGORIA  
ENSINO SUPERIOR



**José Leôncio de Almeida Silva, 23 anos**

**Universidade Federal Rural do Semiárido (Ufersa)  
Mossoró - RN**

## **MISTURA DE ÁGUAS SALINAS COMO ALTERNATIVA PARA A IRRIGAÇÃO E PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO NORDESTINO**

### **RESUMO**

Em muitas áreas irrigadas do mundo, o suprimento de água de boa qualidade pode não ser suficiente para a manutenção da agricultura irrigada; entretanto, existem outras alternativas de água, como águas subterrâneas, como ocorre na região do semiárido nordestino, buscando-se alternativas com o uso de água do lençol freático ou mesmo de drenagem. Todavia, geralmente, essas águas não são de boa qualidade e uma das alternativas para viabilizar seu uso é misturá-las com água de baixa concentração de sais. Desta forma, tornou-se importante avaliar a alternativa de misturas de água salina com água doce para a irrigação de culturas destinadas para forragem no semiárido nordestino. Nesse contexto, foi desenvolvido um experimento na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), em Mossoró, RN. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial  $2 \times 3$ , com três repetições. Os tratamentos resultaram da combinação de dois tipos de solos, um Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (PVAe) e um Cambissolo Háptico Ta Eutrófico (CXve), com três níveis de salinidade da água de irrigação (A1 - 0,59; A2 - 2,75; e A3 - 5,00 dS m<sup>-1</sup>). A unidade experimental foi representada por uma coluna de PVC com capacidade para 12 L, contendo uma planta. As culturas utilizadas no experimento foram milho e sorgo, por serem as mais utilizadas pelos produtores rurais e apresentarem área de cultivo em expansão na região. As variáveis analisadas ao final do experimento foram: área foliar, matéria seca e teor de proteína bruta. Tecnicamente, é possível o uso de águas salinas como

estratégia de manejo da irrigação de forrageiras no semiárido brasileiro, apontando viabilidade e sustentabilidade no processo de produção agrícola. A mistura de águas salinas possibilita a produção satisfatória de forragem sem reduzir o teor proteico. A cultura do sorgo apresenta-se mais tolerante a níveis de água mais salina que a cultura do milho. A mistura de águas proporcionou uma economia na água de boa qualidade de 43,4% para a salinidade de 2,75 dS m<sup>-1</sup> na cultura do milho e 88,7% para a salinidade de 5,00 dS m<sup>-1</sup> na cultura do sorgo.

Palavras-chave: recursos hídricos, salinidade, qualidade de água para irrigação, sustentabilidade, gramíneas.

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez de água no mundo é agravada em virtude do crescimento populacional e da falta de manejo e usos sustentáveis dos recursos naturais. Segundo a Unicef (Fundo das Nações Unidas para a Infância), menos da metade da população mundial tem acesso a água potável, e as diferenças registradas entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento chocam e evidenciam que a crise mundial dos recursos hídricos está diretamente ligada às desigualdades sociais (SETESB, s.d.). As maiores destinações de águas são para irrigação, que corresponde a 73% do consumo de água; 21% vai para a indústria e apenas 6% destina-se ao consumo doméstico. De acordo com os números apresentados pela Organização das Nações Unidas (ONU), fica claro que controlar o uso da água significa deter poder.

As mudanças climáticas que vêm acontecendo nesses últimos anos trazem diversos problemas para o meio ambiente e, sobretudo, para os seres humanos e os animais. De acordo com um estudo realizado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), se essas mudanças continuarem a crescer, um novo grave problema será gerado, o da escassez de água destinada à produção de alimentos e, conseqüentemente, o comprometimento da produtividade mundial, sendo que quem sofre mais com esses impactos são os pequenos produtores.

No Brasil, a escassez desse recurso é bastante visível, sobretudo na região Nordeste, que corresponde a 58% do território da região. A água utilizada na irrigação nessa região apresenta em grande parte alto teor de sais, seja em águas superficiais ou subterrâneas, como nos açudes de pequeno e médio porte (superficiais) e poços (águas subterrâneas) (MEDEIROS et al., 2003). Além disso, a disponibilidade da água para consumo humano e para a prática agrícola vem sendo gradativamente reduzida tanto em qualidade como em quantidade, fazendo necessário o uso alternativo de água de qualidade inferior para atender a demanda da irrigação agrícola nessas regiões.

É crescente o interesse em aumentar a eficiência na utilização de águas salinas na irrigação. Podem ser usadas com sucesso no cultivo de determinadas plantas, sem maiores consequências em longo prazo para culturas e solo, desde que sejam aplicadas técnicas de manejo adequadas. Isso envolve o uso de fontes de águas salinas utilizando espécies ou cultivares mais tolerantes, bem como a utilização dessas fontes em diferentes estágios de desenvolvimento da cultura, sistemas de irrigação, mistura de águas de diferentes qualidades, além de diversas práticas de manejo do sistema solo-planta (MALASH et al., 2006; CHAUHAN; SINGH, 2008).

Uma das alternativas para o uso dessas águas de elevadas salinidades é a sua mistura com água de baixa concentração de sais, sendo este um manejo estratégico, para incentivar a inserção dessas águas na produção vegetal em regiões que sofrem com estiagens prolongadas. Esta pode ser mais uma alternativa para assegurar a exploração racional dos recursos hídricos e vegetais no semiárido, fixando o homem no campo e evitando o êxodo rural.

A técnica de mistura de águas pode permitir a irrigação de áreas maiores, mas não diminui o total dos sais nas águas de irrigação. Em muitas áreas irrigadas do mundo, o suprimento de água de boa qualidade pode não ser suficiente para a manutenção da agricultura irrigada, buscando-se alternativas com o uso de água do lençol freático ou mesmo de drenagem. Todavia, geralmente, essas águas não são de boa qualidade e uma das alternativas para viabilizar seu uso é misturá-las com água de baixa concentração de sais (MENDES et al., 2008).

A região do semiárido nordestino, apesar de apresentar irregularidades climáticas, destaca-se nacionalmente no setor pecuário, principalmente na ovinocaprinocultura. Entretanto, o êxito desse setor depende diretamente da disponibilidade de alimento de qualidade, que pode ser adquirido a partir do uso de irrigação na produção de forragem.

Outro fator importante que deve ser considerado é que essas forrageiras são bastante cultivadas na agricultura familiar, permitindo assim melhorar a perspectiva de vida desses agricultores com o uso de água de qualidade inferior, economia de recursos naturais escassos, possibilitando um melhor aproveitamento da distribuição de água potável, sendo que apenas uma pequena parte dessa água é utilizada para a irrigação e sua maior parte destinada para o abastecimento humano e a sobrevivência animal.

Algumas espécies forrageiras apresentam rendimentos favoráveis ainda que cultivadas sob condições de altos índices de salinidade, enquanto outras são mais sensíveis (AYERS; WESTCOT, 1999). No caso do sorgo e do milho, estes têm

ocupado lugar de destaque pelas suas elevadas produtividades mesmo quando irrigados com água de elevada salinidade, e podem se constituir em alternativas para cultivos que utilizem recursos (água e solo) salinos (MORAIS NETO, 2009).

O uso do sorgo se justifica, também, por suas características bromatológicas, que, à semelhança do milho, possibilitam fermentação adequada e consequente armazenamento sob forma de silagem, pelos teores elevados de proteína bruta, em algumas variedades, e por suas características agrônômicas, que, entre outras, incluem moderada resistência à seca e elevada produtividade (TABOSA et al., 2002).

Desta forma, torna-se importante estudar a mistura de águas salinas como alternativa para a irrigação e produção de forragem no semiárido nordestino. A abordagem é baseada na integração de estratégias, soluções e desafio para a utilização de misturas de águas para irrigação de culturas tradicionalmente utilizadas em regiões mais afetadas, tendo por base os princípios de sustentabilidade.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a mistura de águas salinas na produção irrigada das culturas forrageiras milho e sorgo na região do semiárido nordestino, como alternativa ao uso de águas de boa qualidade.

## 3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a sustentabilidade ambiental, o aproveitamento de águas de elevada salinidade e o potencial de uso agrícola com a mistura de águas.
- Identificar a tolerância das culturas às condições de irrigação com águas que apresentem alta concentração de sais.
- Identificar o nível de tolerância da água de irrigação para cada cultura.
- Avaliar o efeito da salinidade no crescimento e verificar a produção e a qualidade dessas forragens quando irrigadas com águas salinas.
- Avaliar a economia do uso de água de boa qualidade na irrigação dessas culturas.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no período de outubro a dezembro de 2010, em casa de vegetação do Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas (DCAT)

da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), localizada no município de Mossoró/RN, com as coordenadas geográficas de 5°11'31" de latitude sul e 37°20'40" de longitude oeste e altitude média de 18 m (Figura 1).



Figura 1. Localização do estado do Rio Grande do Norte e do município de Mossoró, onde foi realizada a pesquisa. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

O clima dominante da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo BSw<sup>h</sup>, ou seja, quente e seco, caracterizando-se como clima tropical Semiárido, com estação chuvosa bastante irregular, atrasando-se do verão para o outono, concentrando-se nos primeiros meses do ano. De acordo com Carmo Filho e Oliveira (1989), as características climáticas do local são: temperatura média de 27,4°C, precipitação pluviométrica média anual de 673,9 mm e umidade relativa do ar de 68,9%.

A casa de vegetação, onde foi desenvolvido o experimento, possui as seguintes características: estrutura metálica com pé-direito de 3 metros de altura, 7 metros de largura e 18 metros de comprimento com cobertura em arco e plástico transparente tratado contra a ação de raios ultravioleta, sendo fechada lateralmente com tela sombrite de 50% (Figura 2).



Figura 2. Casa de vegetação, onde foi desenvolvido o experimento. Mossoró/RN, 2010.

Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

As culturas utilizadas no experimento foram milho e sorgo, sendo escolhidas por serem as mais utilizadas pelos produtores rurais e apresentarem área de cultivo em expansão na região, como também pela falta de informações técnicas obtidas para a região, principalmente quanto à tolerância a salinidade, além de possuírem boa adaptação às condições climáticas da região.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial  $2 \times 3$ , com três repetições, sendo a unidade experimental representada por uma coluna de PVC com capacidade para 12 L, contendo uma planta em cada coluna (Figura 3).



Figura 3. Distribuição das colunas na casa de vegetação no respectivo experimento. Mossoró/RN. 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

A semeadura ocorreu de forma manual, colocando-se cinco sementes por coluna distribuídas de forma equidistante e realizando-se o desbaste cinco dias após a emergência, deixando em cada coluna a plântula mais vigorosa (Figura 4).



Figura 4. Esquema do sistema de semeadura nas colunas onde foi desenvolvido o experimento. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Os tratamentos resultaram da combinação de dois tipos de solo, Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (PVAe) e um Cambissolo Háptico Ta Eutrófico (CXve), com três níveis de salinidade da água de irrigação (A1 - 0,59; A2 - 2,75; e A3 - 5,00 dS m<sup>-1</sup>).

Os solos utilizados no experimento foram escolhidos por se tratar de solos representativos da região semiárida do Nordeste, e comumente cultivados com essas forrageiras, em Mossoró/RN.

A condutividade elétrica das águas foi obtida através de mistura de água com CE de 0,59 dS m<sup>-1</sup> e CE de 5,56 dS m<sup>-1</sup>. A escolha desses níveis de salinidade se deve às condutividades elétricas das águas disponíveis para irrigação, na região onde foi realizado o experimento (OLIVEIRA; MAIA, 1998; MEDEIROS et al., 2003). A água utilizada para irrigação de maior salinidade foi coletada em poço que explora o aquífero Jandaíra de origem calcária, com salinidade média de 5,56 dS m<sup>-1</sup>, e a outra água em abastecimento urbano, com salinidade em torno de 0,59 dS m<sup>-1</sup> (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química das águas, obtidas após a mistura, utilizadas no experimento.

Água	CE (dS m <sup>-1</sup> )	pH	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>
			(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )							
A1	0,59	8,30	0,90	0,70	3,92	0,22	0,00	4,50	3,00	Aus.
A2	2,75	7,26	8,10	7,70	14,75	0,58	0,60	3,30	13,20	Pres.
A3	5,00	8,40	19,80	22,20	24,96	1,01	0,00	3,90	22,40	Pres.

Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

As águas utilizadas para a misturas foram classificadas quanto ao risco de salinidade levando em consideração a condutividade elétrica segundo Richards (1954). A água de abastecimento urbano de condutividade elétrica (0,59 dS m<sup>-1</sup>) foi classificada como: C2, água de média salinidade, podendo ser usada sempre e quando houver uma lixiviação moderada de sais. Em quase todos os casos, permite o cultivo de plantas moderadamente tolerantes aos sais, sem necessidade de práticas especiais de controle de salinidade. Já a água coletada em poço que explora o aquífero com salinidade (5,56 dS m<sup>-1</sup>) foi classificada como: C4, água de muito alta salinidade, não apropriada para a irrigação sob condições normais, porém pode ser usada ocasionalmente, em circunstâncias muito especiais. Após as misturas das duas águas, obtiveram-se águas de qualidade melhorada, embora a classificação, segundo o risco de salinidade, tenha se mantido constante e igual a C4.

Podemos ver o esquema do sistema de mistura de água salina com água potável na Figura 5.

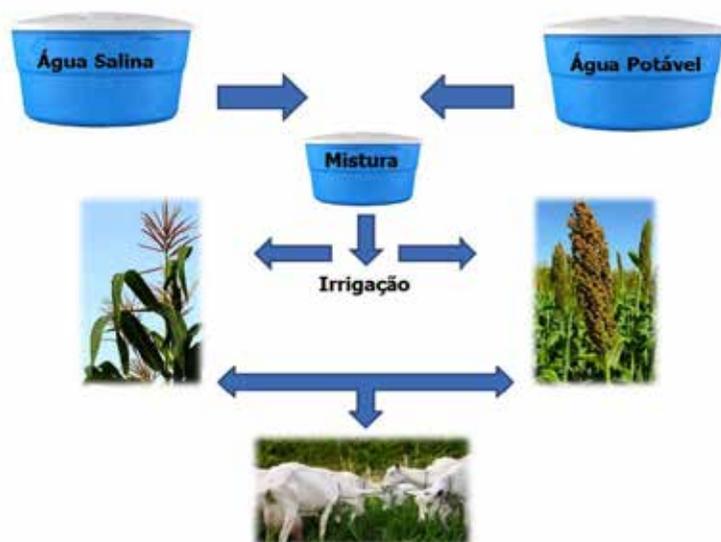


Figura 5. Esquema do sistema de mistura de água salina para irrigação e produção de forragem. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Para a determinação do volume de água de cada fonte para obtenção dos níveis salinos utilizados neste experimento, foi utilizada a Equação 1 (LACERDA, 2010).

$$CE_{af} = \frac{(CE_{a1} \cdot V_{a1})}{(V_{a1+a2})} + \frac{(CE_{a2} \cdot V_{a2})}{(V_{a1+a2})}$$

Equação (1)

em que:

$CE_{af}$  – CE final da mistura, dS m<sup>-1</sup>;

$CE_{a1}$  – CE da água de menor salinidade, dS m<sup>-1</sup>;

$CE_{a2}$  – CE da água de maior salinidade, dS m<sup>-1</sup>;

$V_{a1}$  – Volume da água de menor salinidade;

$V_{a2}$  – Volume da água de maior salinidade;

$V_{a1+a2}$  – Volume final da mistura;

$V_{a1}/V_{a1+a2}$  – representa a proporção da água de menor salinidade ( $P_{a1}$ ); e

$V_{a2}/V_{a1+a2}$  – representa a proporção da água de maior salinidade ( $P_{a2}$ ).

Os solos foram coletados nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, secos ao ar, peneirados com peneira de 2 mm e distribuídos em colunas de PVC com 50 cm de altura e 20 cm de diâmetro. Utilizou-se uma camada de brita de 3 cm e manta geotêxtil "Bidim", como dreno e uma torneira para drenagem da água (Figura 6). O acondicionamento das amostras do material de solo nas colunas foi feito de forma a representar as condições reais de campo em relação à densidade e respectivas profundidades.

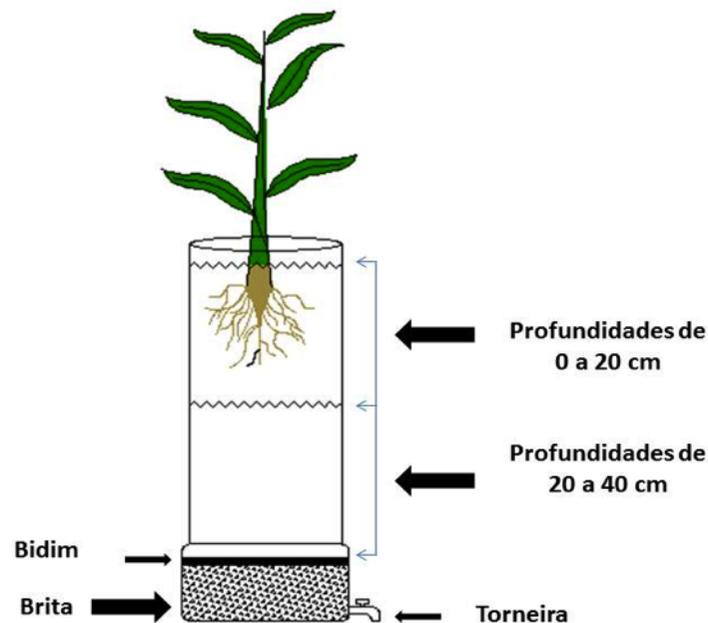


Figura 6. Esquema da coluna de PVC utilizado no experimento. Mossoró/RN, 2010.

Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Antes do plantio das culturas, realizou-se adubação, determinada de acordo com análise prévia dos solos e a exigência nutricional das culturas (Tabela 2). Durante o experimento, foram aplicadas as seguintes quantidades de nutrientes via fertirrigação: 5,0 g de N, 7,0 g de K<sub>2</sub>O e 4,15 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em fundação para cada coluna de PVC, com aplicação semanal de acordo com a necessidade das culturas.

Tabela 2. Características químicas dos solos utilizados no experimento.

Solos	pH	Mo	P	K	Ca	Al+Mg	H+Al	CTC	V(%)
PVAe (0 - 20)	6,6	0,19	9,0	40,6	1,8	0,4	0,17	2,73	94
PVAe (20 - 40)	6,5	0,27	3,7	286,2	1,8	1,3	0,17	4,05	96
CXve (0 - 20)	6,7	0,8	3,6	145,6	8,7	1,0	1,16	11,58	90
CXve (20 - 40)	6,6	0,4	3,7	51,5	6,3	1,4	1,32	9,19	86

Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (PVAe) e um Cambissolo Háptico Ta Eutrófico (CXve)

Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

A primeira irrigação foi realizada aplicando o volume de água suficiente para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, e as demais irrigações foram feitas diariamente de acordo com o monitoramento da umidade do solo. Os volumes de

água de irrigação foram determinados a partir de estimativas da evapotranspiração das culturas e ajustado com base no monitoramento da umidade do solo através do uso de tensiômetros. O potencial matricial da água do solo ( $\psi_m$ ), à profundidade de 0,15 m, foi utilizado como valor crítico para indicar o momento da irrigação. Semanalmente era aplicado um excesso de água para gerar uma fração de lixiviação de cerca de 10% (Figura 7).



Figura 7. Esquema de irrigação do experimento. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

As variáveis analisadas foram: área foliar, matéria seca e teor de proteína bruta. A área foliar foi obtida a partir de análise feita semanalmente, medindo-se comprimento e largura de todas as folhas de cada planta e estimada a partir de equação proposta para as culturas, Equação 2 (MONTGOMERY, 1911) (Figura 8).



Figura 8. Medições para a determinação de área foliar. Mossoró/RN. 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Na última coleta, a área foliar foi estimada pelo método do disco, que consiste na retirada de discos foliares de área conhecida em quatro posições do limbo foliar de um conjunto de folhas, distribuídas simetricamente, evitando-se a amostragem da nervura central, conforme estudos de Huerta (1962) e Gomide et al. (1977).

De acordo com Lucchesi (1984), a área foliar constitui-se em um complemento da análise quantitativa do crescimento vegetal, possibilitando a determinação dos efeitos da utilização de diferentes manejos da cultura.

$$AF = \sum ((C.L) \cdot 0,75))$$

Equação (2)

Em que:

AF= área foliar da cultura

C= comprimento da folha

L= largura da folha

As folhas das culturas foram secas em estufa de circulação forçada com temperatura entre 65 a 70°C até peso constante. Após a secagem, o material obtido foi pesado em balança de precisão (0,01g). A massa seca da parte aérea das plantas foi obtida a partir da soma da massa seca de folhas e hastes, sendo posteriormente moídas as folhas para as determinações de nitrogênio (Figura 9).



Figura 9.  
Procedimento do material, pesagem, acondicionamento em sacos de papel e estufa de circulação de ar forçado. Mossoró/RN. 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

O procedimento utilizado para a determinação de proteína foi realizado através da conversão de nitrogênio (CECCHI, 2003). O método mais utilizado para dosagem de proteínas foi proposto por Kjeldahl. Este método determina o N, e para converter o nitrogênio medido em proteína multiplica-se o conteúdo de nitrogênio por um fator geral que é obtido com base no fato de que, na maioria das proteínas, o teor de N é em torno de 16%. Então, multiplica-se por 6,25.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de médias com auxílio do software SAEG 9.0 (RIBEIRO JR., 2001) e ajustes de equações de regressão usando o Excel.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise de variância, verificou-se interação significativa apenas para as variáveis área foliar do milho e matéria seca do sorgo ( $p < 0,01$ ). Entretanto, houve efeito significativo dos tipos de solo para a matéria seca ( $p < 0,05$ ) e proteína do milho, bem como para área foliar e proteína do sorgo ( $p < 0,01$ ). Com relação à salinidade, observou-se efeito significativo para matéria seca do milho e área foliar do sorgo ( $p < 0,01$ ). Os teores de proteína não foram influenciados pela salinidade da água de irrigação ( $p > 0,05$ ), evidenciando que a utilização desse recurso não diminui a qualidade nutricional das forrageiras estudadas. Apesar da diminuição na matéria seca, pode ser viável para a agricultura familiar em regiões de baixa disponibilidade hídrica (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância: área foliar (AF), massa seca da planta (MS) e proteína bruta (PB) das culturas milho e sorgo sob estresse salino nos solos PVAe e CXve.

FV	GL	Quadrado Médio					
		Milho			Sorgo		
		AF	MS	PB	AF	MS	PB
Solo (S)	1	0,02**	4,763*	35,67**	24,1**	29,207**	18,74**
Salinidade (SAL)	2	45,29**	22,663**	1,042ns	3,26*	84,125**	2,15ns
S x SAL	2	9,48**	3,262ns	0,206ns	0,48ns	18,35**	2,56ns
CV (%)		4,1	9,790	6,81	18,4	5,789	4,82

\*\*Significativo a 1% de probabilidade; \*significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

O desdobramento da interação (S x SAL) para a área foliar do milho revela que, no solo Argissolo - Vermelho - Amarelo - PVAe, os maiores valores foram observados nos níveis de salinidade 0,59 e 2,75 dS m<sup>-1</sup> e os menores valores no nível de 5,00 dS m<sup>-1</sup>. Para o solo Cambissolo Háplico - CXve, observaram-se nos níveis de salinidade 2,75 e 5,00 dS m<sup>-1</sup>, valores estatisticamente semelhantes e inferiores a 0,59 dS m<sup>-1</sup> (Tabela 4).

Ainda na Tabela 4, verifica-se que o solo PVAe foi superior ao CXve na salinidade 2,75 dS m<sup>-1</sup>, enquanto, na maior salinidade (5,00 dS m<sup>-1</sup>), os maiores valores ocorreram no solo CXve.

Tabela 4. Valores médios de área foliar da cultura do milho sob estresse salino em solos PVAe e CXve. Mossoró/RN, 2010.

Solo	CE Água de irrigação (dS m <sup>-1</sup> )		
	0,59	2,75	5,00
PVAe	877,54 Aa	885,1 Aa	747,86 Bb
CXve	907,13 Aa	819,9 Bb	788,22 Ba

Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna e não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Para a área foliar analisada ao longo do tempo, observou-se que as plantas de milho apresentaram crescimento exponencial até os 40 dias após a emergência (DAE) independente do nível de salinidade (Figura 10). Pode-se verificar ainda que houve pouca influência da salinidade até aproximadamente 33 dias, e, a partir desta época, ocorreu maior variação, e os menores valores foram observados na salinidade de 5,00 dS m<sup>-1</sup> (Figura 10). Totawat e Mehta (1985), trabalhando com genótipos de milho e sorgo, verificaram que a AF de ambas as espécies foram influenciadas negativamente pelo estresse salino, verificando que, quando se analisou a condutividade elétrica de 12,0 dS m<sup>-1</sup>, as plantas de milho e sorgo tiveram sua AF reduzida em 46% e 60%, para as respectivas culturas.

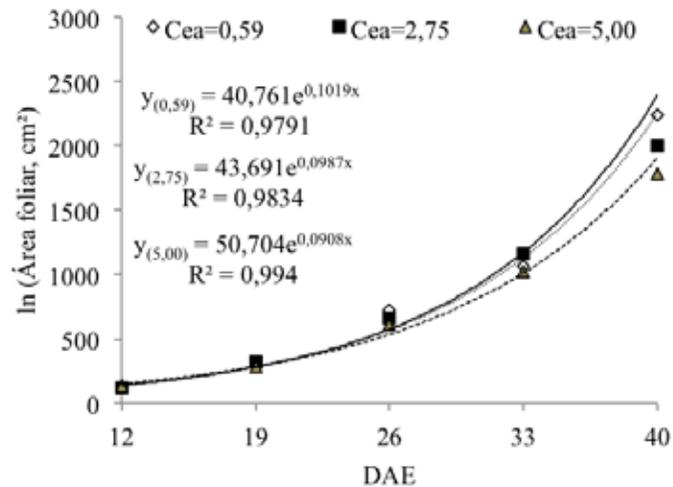


Figura 10. Área foliar do milho sob estresse salino em diferentes épocas de avaliação. Mossoró/RN, 2010.  
 Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Para a área foliar na cultura do sorgo, os maiores valores foram observados no solo CXve (1159,42 cm<sup>2</sup> vaso<sup>-1</sup>), sendo superior em aproximadamente 31,2% em relação no PVAc; obteve-se área foliar de 883,74 cm<sup>2</sup> vaso<sup>-1</sup> (Figura 11).

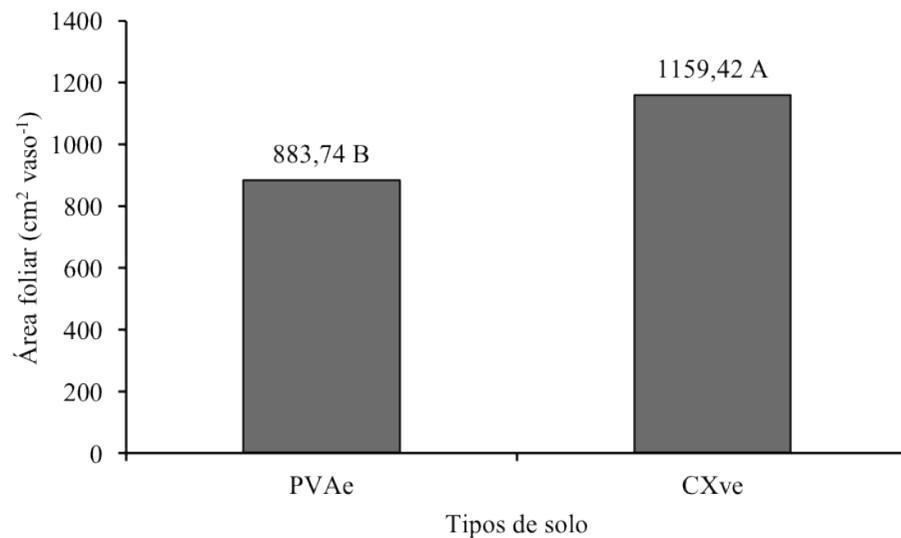


Figura 11. Área foliar do sorgo em função de dois tipos de solo. Mossoró/RN, 2010.  
 Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Com relação ao efeito da salinidade sobre a área foliar do sorgo, verificou-se que os maiores valores ocorreram nas plantas irrigadas com água de salinidade 0,59 dS

m<sup>-1</sup> (1108,1 cm<sup>2</sup> vaso<sup>-1</sup>), e que o aumento da condutividade elétrica da água acima de 2,75 provocou decréscimo significativo desta variável. Dentre as salinidades estudadas, os menores valores ocorreram para a maior salinidade (5,00 dS m<sup>-1</sup>), obtendo-se área foliar de 932,5 cm<sup>2</sup> vaso<sup>-1</sup>, apesar de não diferir estatisticamente das plantas irrigadas com água de salinidade 2,75 dS m<sup>-1</sup> (1024,2 cm<sup>2</sup> vaso<sup>-1</sup>), resultados esses que podem ser observados na Figura 12.

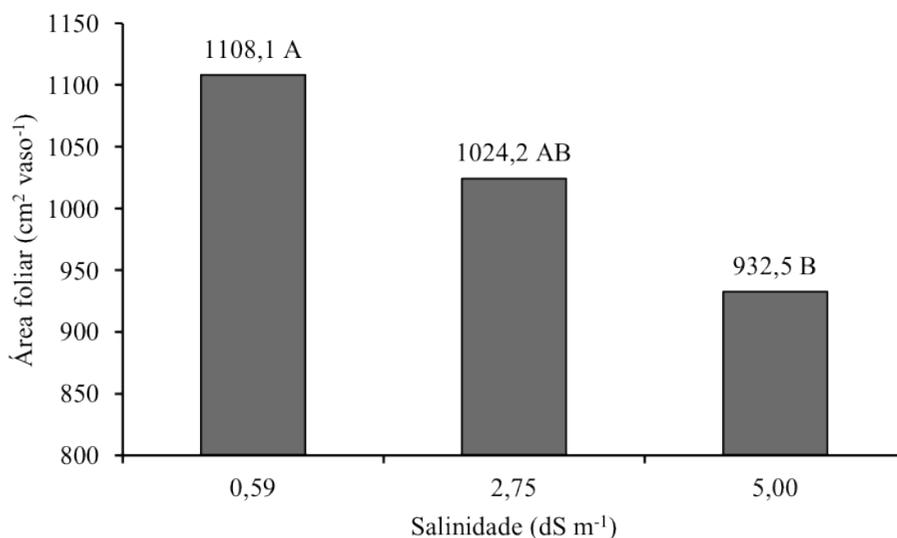


Figura 12. Área foliar do sorgo em função de diferentes salinidades da água de irrigação. Mossoró/RN, 2010.  
Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Em geral, a área foliar foi obtida para as plantas irrigadas com menor salinidade (0,56 dS m<sup>-1</sup>); portanto, quanto maior o nível de água salina, menor a área foliar, tornando-se evidente o decréscimo dessa variável à medida que aumenta o incremento da salinidade. Este comportamento pode ser atribuído ao potencial osmótico da solução do solo, diminuindo a disponibilidade da água para as plantas e fazendo com que as culturas sofram sempre que a concentração salina aumenta (MAAS; GRIEVE, 1987).

A cultura do sorgo apresentou crescimento de área foliar exponencial em função das épocas de avaliação, ocorrendo maior variação da área foliar a partir dos 26 dias após a emergência (Figura 13).

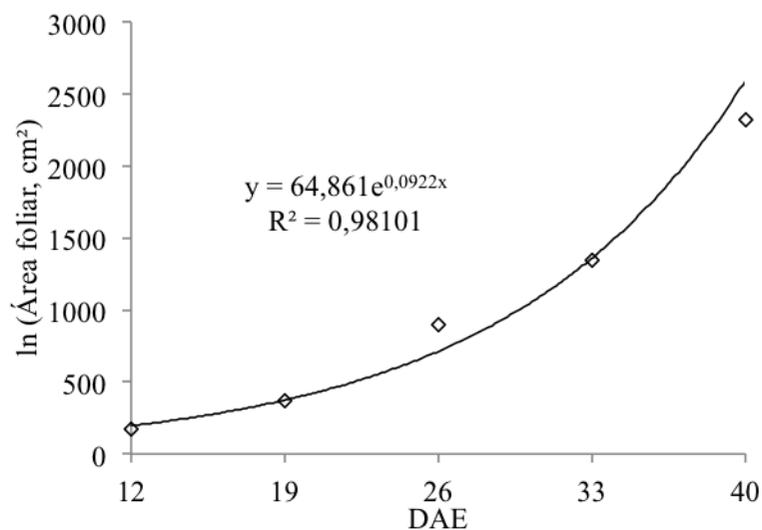


Figura 13. Área foliar da cultura do sorgo em função em cada época de análise do crescimento. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Com relação à massa seca da parte aérea na cultura do milho, verificou-se que os maiores valores foram obtidos para o solo PVAe (5,34 t ha<sup>-1</sup>), enquanto para as plantas cultivadas no solo CXve se obteve massa seca de 4,83 t ha (Figura 14).

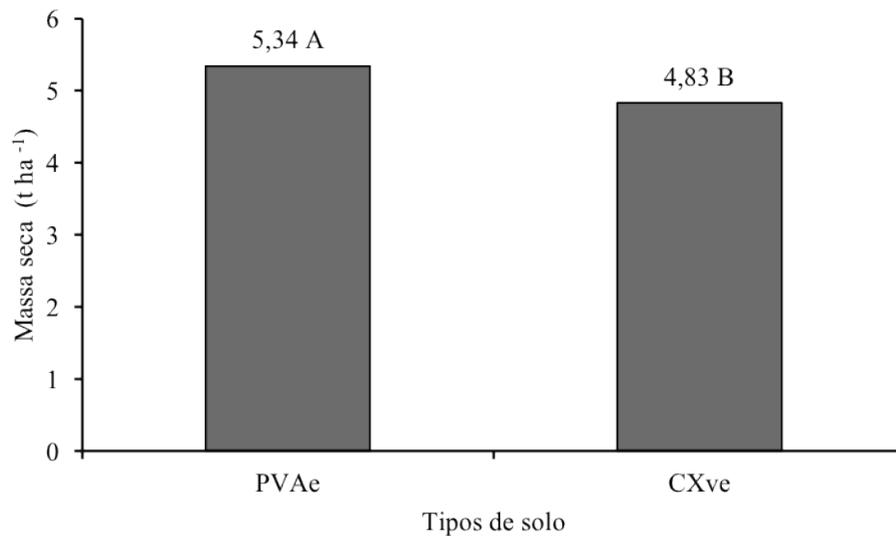


Figura 14. Massa seca da parte aérea do milho em função de dois tipos de solo, aos 40 dias após o plantio. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Quanto ao efeito da salinidade sobre a massa seca do milho, foi observado que os maiores valores ocorreram na salinidade de 0,59 dS m<sup>-1</sup> (6,15 t ha<sup>-1</sup>), e que a partir da salinidade de 2,75 dS m<sup>-1</sup> ocorreu redução significativa na massa seca (Figura 15). Os dados na Figura 9 apresentam uma relação entre a massa seca do milho e a salinidade da água de irrigação, em que foi observada uma redução na massa seca da parte aérea de 21,63% por incremento unitário a partir da menor salinidade de 0,59 dS m<sup>-1</sup>, obtendo-se uma economia de água de boa qualidade de 43,3% (Figura 16).

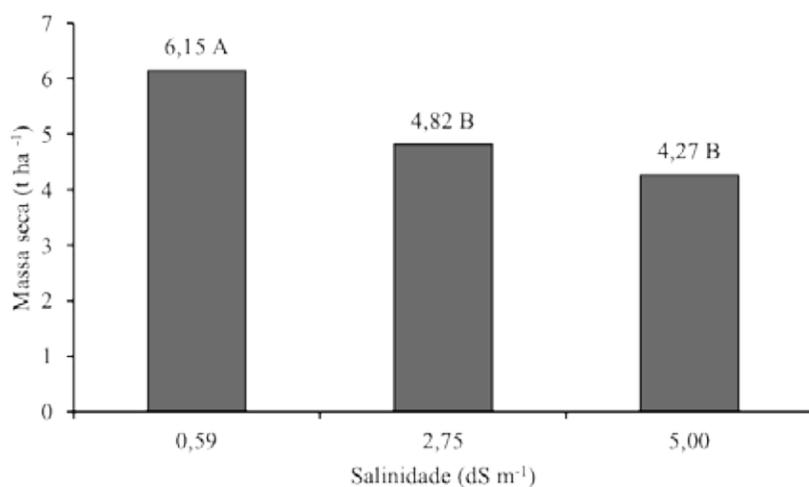


Figura 15. Massa seca da parte aérea do milho em função de diferentes salinidades da água de irrigação, aos 40 dias após o plantio. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.



Figura 16. Efeito da água de irrigação na cultura do milho em função dos diferentes níveis de salinidade. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Para a cultura do sorgo nos níveis mais salinos ( $CE = 2,75$  e  $5,00$   $dS\ m^{-1}$ ), os maiores valores de matéria seca ocorreram no solo PVAe, não ocorrendo diferença significativa entre os solos na salinidade de  $0,59$   $dS\ m^{-1}$  (Tabela 5).

Com relação ao efeito da salinidade, verificou-se que, nas plantas cultivadas no solo PVAe, houve redução apenas na maior salinidade ( $5,00$   $dS\ m^{-1}$ ), enquanto no solo CXve a redução da massa seca ocorreu a partir do segundo nível de salinidade ( $2,75$   $dS\ m^{-1}$ ), o qual foi estatisticamente semelhante ao nível mais salino (Tabela 6), ocorrendo uma economia na água salina de  $0,59$   $dS\ m^{-1}$ , de  $88,7\%$ , aumentando sua oferta para outros fins, como para o consumo humano, e economia com os gastos provenientes da alimentação de caprinos e ovinos, melhorando a qualidade de vida da população. Estes resultados demonstram que o solo PVAe possibilitou melhores condições de desenvolvimento das plantas, proporcionando maior tolerância à salinidade. Isso pode estar relacionado com a maior drenagem do solo e a maior eficiência de lixiviação.

Tabela 5. Valores médios de matéria seca da parte aérea da cultura do sorgo sob estresse salino em PVAe e CXve, aos 40 dias após o plantio. Mossoró/RN, 2010.

Solo	CE Água de irrigação ( $dS\ m^{-1}$ )		
	0,59	2,75	5,00
PVAe	5,49 aA	5,12 aA	4,18 aB
CXve	5,83 aA	3,68 bB	3,23 bB

Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Vários autores também verificaram redução na matéria seca de diferentes culturas em consequência do aumento da salinidade do meio, dos quais se citam Lima et al. (2007) e Oliveira et al. (2009).

Segundo Rhoades et al. (1992), o excesso de sais reduz o desenvolvimento da planta em razão do aumento de energia, que precisa ser despendida para absorver água do solo, e do ajustamento bioquímico necessário para sobreviver sob estresse.

Constata-se que a tolerância à água salina depende da cultura, embora as culturas estudadas tenham se desenvolvido satisfatoriamente, apesar das condições de alta salinidade, sendo que a cultura do sorgo apresentou-se mais tolerante a níveis de

água mais salino que a cultura do milho, apresentando maiores valores.

As plantas de sorgo e milho cultivadas no solo Argissolo Vermelho-Amarelo (PVAe) apresentaram maiores valores médios de proteína bruta (de 14,22%); já para o solo Cambissolo Háplico, CXve, os valores médios foram de 12,3%. Esses maiores valores encontrados no solo PVAe podem estar relacionados com o maior teor de areia, que permite uma maior fração de lixiviação dos sais, permitindo assim maiores teores de proteínas nas plantas. Apesar dos níveis salinos terem influenciado nas outras variáveis, para os teores de proteína nas plantas de sorgo e milho não teve variação em função do aumento da salinidade. Porém, para o solo CXve, a cultura do sorgo foi a que menos sofreu com o aumento da salinidade. Provavelmente isto ocorreu por se tratar de um solo mais argiloso e com maior quantidade de nutriente. Por outro lado, tem maior capacidade de acumular os sais (Figura 17).

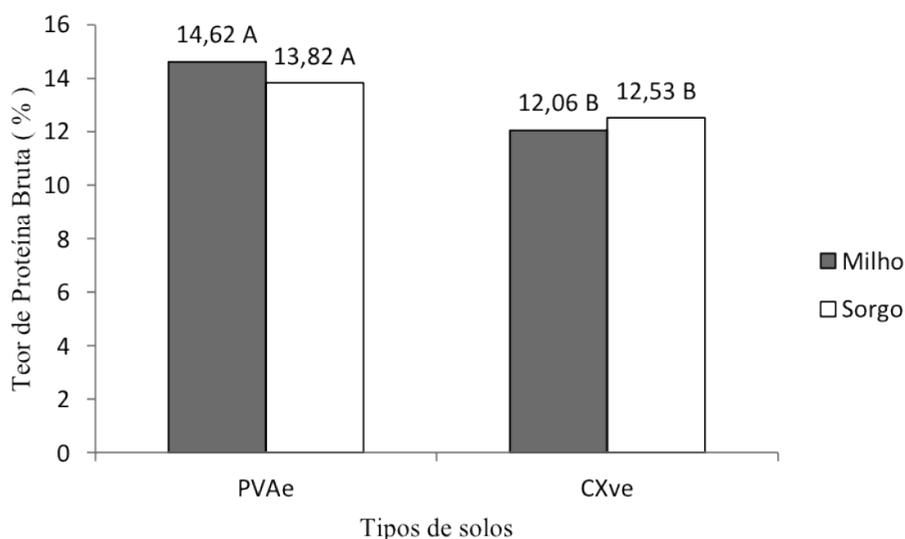


Figura 17. Teores de proteína bruta nas culturas de milho e sorgo em função do tipo de solo. Mossoró/RN, 2010. Fonte: Dados do acervo de pesquisa.

Portanto, conclui-se que o objetivo principal desta pesquisa foi atingido, evidenciando os benefícios do projeto, colaborando com a gestão participativa das águas salinas e com a potencialização da geração de renda, além de contribuir para a conservação ambiental de dois importantes recursos naturais: o solo e a água.

## 5. CONCLUSÕES

Tecnicamente, é possível o uso de águas salinas como estratégia de manejo da irrigação de forrageiras no semiárido nordestino, apontando viabilidade e sustentabilidade no processo de produção agrícola.

A mistura de águas salinas possibilita a produção satisfatória de forragem sem reduzir o teor proteico.

A cultura do sorgo apresenta-se mais tolerante a níveis de água mais salino que a cultura do milho.

A cultura do milho tolera salinidade da água de irrigação até 2,75 dS m<sup>-1</sup>, sem reduzir o potencial produtivo; já para a cultura do sorgo, a tolerância é de 5,00 dS m<sup>-1</sup>.

A mistura de águas proporcionou uma economia na água de boa qualidade de 43,4% para a salinidade de 2,75 dS m<sup>-1</sup> na cultura do milho e 88,7% para a salinidade de 5,00 dS m<sup>-1</sup> na cultura do sorgo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade de água na agricultura**. 2 ed. Campina Grande: UFPB, 1999.

CARMO FILHO, F. do; OLIVEIRA, O. F. de. **Mossoró**: um município do semiárido: caracterização climática e aspecto florístico. Mossoró: ESAM, 1989. (Coleção Mossoroense, 672, Série B).

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2003.

CHAUHAN, C. P. S.; SINGH, R. B. Supplemental irrigation of wheat with saline water. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 95, n. 3, p. 253-258, 2008.

GOMIDE, M. B.; LEMOS, O. V.; TOURINO, D.; CARVALHO, M. M.; CARVALHO, J. G.; DUARTE, C. S. Comparação entre métodos de determinação de área foliar

em cafeeiros mundo novo e catuaí. **Ciência Prática**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 118-123, 1977.

HUERTA, S. A. Comparación de métodos de laboratorio y de campo para medir el area del cafeto. **Cenicafé**, Chinchina, v. 13, n. 1, p. 33-42, 1962.

LACERDA, C. F. **Efeitos da salinidade no desenvolvimento e composição mineral do feijão-de-corda (*vigna unguiculata (l.) walp.*) e utilização do  $Ca^{2+}$  como meio para minorar tais efeitos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

LIMA, C. J. de; OLIVEIRA, F. de A. de; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, M. K. T.; ALMEIDA JÚNIOR, A. B. de. Resposta do feijão caupi à salinidade da água de irrigação. **Revista Verde de Agroecologia**. Mossoró, v. 2, n. 2, p. 79-86, 2007.

LUCCHESI, A. A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. In: **Anais... da E.S.A. "Luiz de Queiroz"**, n. 41, p. 181-202, 1984.

MAAS, E. V.; GRIEVE, C. M. Sodium-induced deficiency in saltstressed corn. **Plant, Cell and Environment**, v. 10, p. 559-564, 1987.

MALASH, N.; FLOWERS, T. J.; RAGAB R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 78, n. 1, p. 25-38, 2006.

MEDEIROS, J. F.; LISBOA, R. A.; OLIVEIRA, M. et al. Caracterização das águas subterrâneas usadas para irrigação na área produtora de melão da chapada do apodi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 469-472, set./dez. 2003.

MEDEIROS, J. F.; SILVA, M. C. C.; SARMENTO, D. H. A.; BARROS, A. D. Crescimento

do meloeiro cultivado sob diferentes níveis de salinidade, com e sem cobertura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 248-255, 2007.

MENDES, A. M. S.; SANTOS, E. E. F.; SILVA, D. J.; DOURADO, D. L.; MARTINEZ, E. A.; DOURADO, D. L.; OLIVEIRA, J. M.; SANTOS, N. T. Crescimento e acúmulo de nutrientes em plantas de Shorgum bicolor L Moench sob irrigação com águas de diferentes concentrações salinas. In: **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: SBCS, Embrapa Solos, Embrapa Agrobiologia, 2008.

MONTGOMERY, E. G. Correlation studies of com. Annual report. **Nebraska Agricultural Experiment Station**, v. 24, p. 108-159, 1911.

MORAIS NETO, L. B. **Avaliação temporal do acúmulo de fitomassa e trocas gasosas do capim-canarana em função da salinidade da água de irrigação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, M. K. T.; LIMA, C. J. G. S.; ALMEIDA JÚNIOR, A. B.; AMÂNCIO, M. G. Desenvolvimento inicial do milho pipoca com água de diferentes níveis de salinidade. **Agrária**, v. 4, p. 149-155, 2009.

OLIVEIRA, M.; MAIA, C. E. Qualidade físico-química da água para irrigação em diferentes aquíferos na área sedimentar do estado do rio grande do norte. **AGRIAMBI**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 17-21, 1998.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **The use saline water for cropproduction**. Rome: FAO, 1992. (Fao Irrigation and Drainage Paper, 48).

RIBEIRO JR., J. I. **Análises estatísticas no SAEG (Sistema para análises estatísticas)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

RICHARDS, L. A. (Ed.). **Diagnosis and improvement of saline and álcali soils**. Washington DC: U. S. Salinity Laboratory, 1954. (USDA. Agriculture Handbook, 60).

SETESB. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/37-O-Problema-da-Escassez-de-%C3%81gua-no-Mundo>>. Acesso em: 3 ago. 2013.

TABOSA, J. N.; REIS, O. V.; BRITO, A. R. M. B.; MONTEIRO, C. D. M.; SIMPLÍCIO, J. B.; OLIVEIRA, J. A. C.; SILVA, F. G.; AZEVEDO NETO, A. D.; DIAS, F. M.; LIRA, M. A.; TAVARES FILHO, J. J.; NASCIMENTO, M. M. A.; LIMA, L. E.; CARVALHO, H. W. L.; OLIVEIRA, L. R. Comportamento de cultivares de sorgo forrageiro em diferentes ambientes agroecológicos dos estados de Pernambuco e Alagoas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 1, n. 2, p. 47-58, 2002.

TOTAWAT, K. L.; MEHTA, A. K. Salt tolerance of maize and sorghum genotypes. **Annals of Arid Zone**, Jodhpur, v. 24, p. 229-236, 1985.

2º  
LUGAR

CATEGORIA  
ENSINO SUPERIOR



Oswaldo Assunção Mendonça, 20 anos

Universidade Federal do Ceará (UFC)  
Fortaleza - CE

**DESEMPENHO DO DESSALINIZADOR  
TÉRMICO COM ESTÁGIOS DE RECUPERAÇÃO  
DE CALOR, FORMADO POR UMA UNIDADE  
DE PRODUÇÃO, TORRE COM CANAIS  
METÁLICOS E PERFIS TERMOPLÁSTICOS,  
E UMA UNIDADE DE AQUECIMENTO, COM  
COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO.**

## RESUMO

O grande potencial solar do Brasil possibilita a utilização de sistemas solares térmicos para a produção de água potável. Grande parte das comunidades do semiárido do Nordeste do Brasil não tem acesso a água de qualidade e em quantidade suficiente para suas necessidades básicas. Uma mudança no panorama da escassez de água depende de inovações tecnológicas de baixo custo de implantação e fácil manutenção. O aprimoramento da tecnologia de dessalinização com energia solar vem sendo testado em protótipos que utilizam estágios de recuperação de calor para o aproveitamento mais eficiente da energia térmica e aumento da produção de água dessalinizada. Essa tecnologia foi concebida pelo Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN, na Universidade Federal do Ceará) em parceria com o Instituto Solar de Jülich (ISJ) da Alemanha em 1997 e aprimorada até os dias atuais.

Os protótipos são constituídos por duas unidades, uma de aquecimento, com coletores solares de placa plana ou coletores de tubo evacuado, que absorvem a radiação solar e a transforma em energia térmica útil, e uma unidade de dessalinização, formada por uma torre com múltiplos estágios de produção de água dessalinizada montados sobre um tanque de armazenamento de água proveniente do sistema de

aquecimento com princípio de termossifão. Um dos mais recentes protótipos testados no LESGN alcançou uma produção diária de 35 litros de água dessalinizada. Os perfis estruturais da torre desse protótipo foram especialmente desenvolvidos e tinham a função tanto de estruturação da torre como de sustentação das bandejas com água e também de coleta de água em canais no próprio perfil. No entanto, esses perfis eram fabricados e importados da Alemanha. O material empregado (poliuretano e resina) apresentou uma baixa resistência mecânica, além de desprendimento de resíduos que comprometiam a qualidade da água. No presente trabalho, foi desenvolvida e testada uma nova torre em que os perfis de aço inoxidável com geometria especial são totalmente desmontáveis e fixados a tubos retangulares de polietileno, moldura que constitui os estágios. Todos os materiais empregados são disponíveis no mercado nacional. Nos testes realizados, o protótipo apresentou desempenho satisfatório, alcançando uma produção média de 28,1 litros de água em um dia ensolarado, 18,7 litros em um dia parcialmente nublado e 11,9 litros em dia chuvoso. Tendo em vista que o semiárido é caracterizado por altos índices de radiação solar quase o ano inteiro, a precipitação pluviométrica é escassa e a água dos poços artesianos, açudes etc. são impróprias. Utilizar essa água no protótipo para produzir 28,1 L/dia de água potável permite suprir o consumo de água de até 13 pessoas e assim colaborar para a solução do problema de abastecimento das populações menos assistidas.

Palavras-chave: energia solar, dessalinizador, água potável.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um insumo fundamental para quase todos os segmentos da atividade industrial, indispensável na produção de alimentos, sendo um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico.

Primordialmente, o que faz da água um recurso de valor inestimável é a sua importância para a existência dos seres vivos. Em particular, para a espécie humana ela representa o nutriente mais importante, uma vez que o nosso corpo é constituído de 60% a 75% de água que precisa ser reposta continuamente. É necessária a ingestão de 2 a 3 litros de água diariamente para a manutenção de uma vida saudável. Entretanto, grande parte da população mundial ainda não tem acesso a esse bem tão essencial.

Apesar da abundância desse recurso natural (aproximadamente 1,36 bilhão de km<sup>3</sup>), apenas 2,5% de toda a água no planeta é doce, ou seja, possui um volume reduzido de sais que permite o seu consumo por seres humanos. Da quantidade total

de água doce, 79,16% estão nas geleiras, ou seja, indisponíveis para o consumo humano; 20,56% estão nos aquíferos; 0,04% na atmosfera e 0,24% nos rios e lagos, que são as fontes mais utilizadas. Ademais, esse volume não se encontra distribuído de forma a suprir toda a população mundial; existem regiões de intensa precipitação que dão suporte a densas florestas, e áreas com ocorrência de chuva praticamente nula, denominadas desertos.

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), 783 milhões de pessoas ainda estão sem acesso a uma quantidade mínima aceitável de água potável (ONU, 2012). Para o ano de 2050, a ONU estima que a população mundial atinja o patamar de 9,3 bilhões de pessoas, e o consumo de água potável, por sua vez, vem crescendo em um ritmo superior ao crescimento da população mundial. O aumento da poluição é outro fator que ocasiona uma maior demanda de água.

Uma das alternativas para solucionar o problema da escassez de água é a prática da dessalinização de água salobra ou salgada, para torná-la adequada ao consumo humano e também apropriada para o uso industrial e de irrigação.

Em junho de 2011, foram registradas cerca de 16 mil usinas de dessalinização pelo mundo, produzindo um volume de 66,5 milhões de m<sup>3</sup> por dia (IDA, 2013).

A Arábia Saudita é responsável por aproximadamente 27% da produção mundial de água dessalinizada. A maior parte de sua produção provém do processo de dessalinização, que tem como fonte de energia o petróleo e o gás, utilizando quase que exclusivamente a água do mar. Os Estados Unidos da América vêm em seguida com 12% do total produzido no mundo com usinas de Osmose Reversa (RO), tendo como matéria-prima a água salobra (Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, 2007). A Figura 1 mostra as capacidades instaladas de dessalinização em 2009.

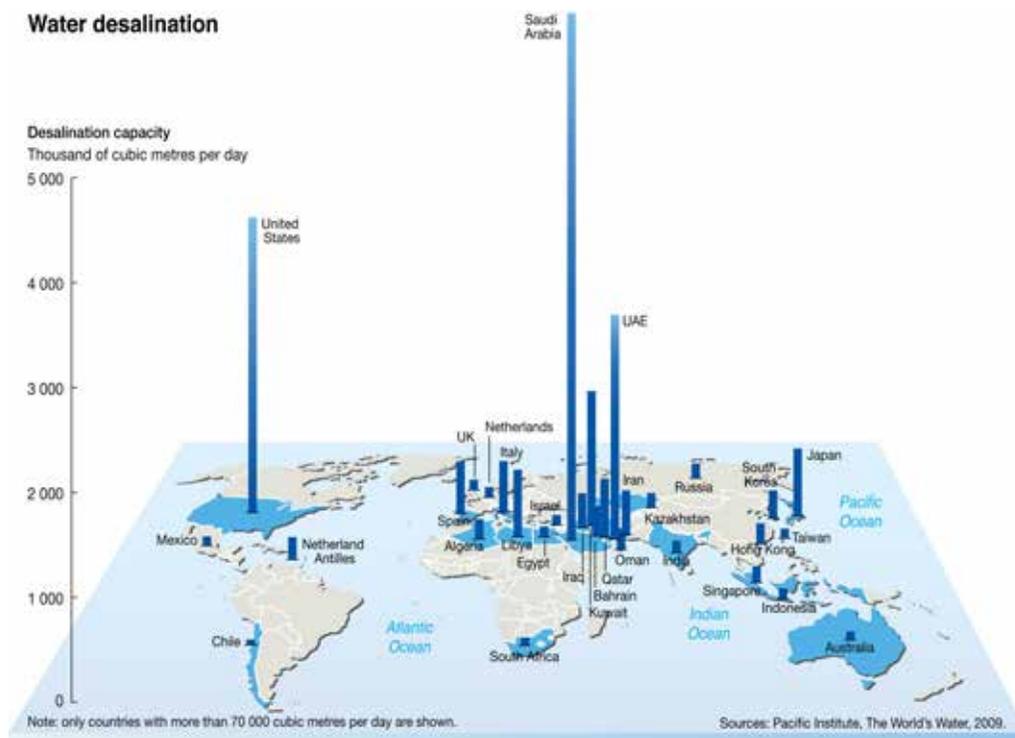


Figura 1. Capacidades instaladas de dessalinização. Fonte: UNEP/GRID-Arendal, 2009.

Como pode ser verificado na Figura 1, o Brasil não tem produção significativa de água dessalinizada. Apesar de possuir a maior disponibilidade hídrica do mundo (cerca de 12% das reservas mundiais), assim como ocorrem em outros locais do planeta, esse volume não é uniformemente distribuído pelo seu território. Cerca de 68% das nossas reservas estão localizadas na região Norte, onde habita somente 8% da população brasileira, enquanto a região Nordeste, com uma população de 28% dos brasileiros, possui apenas 3% dos recursos hídricos totais.

A região Nordeste é caracterizada por secas recorrentes, causadas principalmente pela barreira formada pelo planalto nordestino que impede a circulação das massas de ar ocasionando baixa pluviosidade e as altas temperaturas da região que provocam grande evapotranspiração. Esses dois fatores combinados produzem um déficit hídrico na região.

No semiárido, existe a predominância de um subsolo rico em rochas cristalinas (de baixa permeabilidade) e sal, que inibem a formação de aquíferos na maior parte do seu território. Os poucos aquíferos que se desenvolvem na região Nordeste se caracterizam pela forma descontínua de armazenamento. A água é armazenada em

fendas/fraturas na rocha (aquífero fissural) e, em regiões de solos aluviais (aluvião), forma pequenos reservatórios, de qualidade não muito boa. As águas exploradas em fendas de rochas cristalinas são, em sua maioria, de qualidade inferior, normalmente servindo apenas para o consumo animal; às vezes, atendem ao consumo humano e raramente para irrigação. As águas que têm contato com esse tipo de substrato se mineralizam com muita facilidade, tornando-se salinizadas (GRASSI, 2001).

A construção de açudes tem sido utilizada para solucionar o problema da falta de água no Nordeste. Entretanto, essa alternativa apresenta um problema referente ao índice de salinidade da água, uma vez que, com o passar dos anos, a salinidade dessa fonte aumenta devido ao processo de evaporação da água, e conseqüentemente há um possível acúmulo de sais.

Como as regiões áridas possuem elevada incidência de radiação solar, o uso de dessalinizadores que aproveitem essa energia representa uma alternativa vantajosa para a produção de água potável. Além disso, o dessalinizador solar térmico, em contraste com os sistemas que utilizam energia elétrica, é capaz de operar em locais isolados, podendo, portanto, ser instalado nas comunidades das regiões que sofrem com a seca no interior do Nordeste.

## 1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A dessalinização é o processo de retirar sal da água, com o intuito de torná-la potável. Um dos métodos de dessalinização é a destilação, que utiliza calor para provocar a evaporação das moléculas de água (salgada ou salobra) obtendo água doce pela condensação do vapor. Nesse processo, não é necessário chegar à temperatura de ebulição para que ocorra a evaporação da água. Existem dois modos de se utilizar a energia solar para o processo de destilação. O aquecimento direto, quando a radiação solar incide diretamente na água bruta, provocando seu aquecimento; e o aquecimento indireto, quando é empregado um meio de transporte, geralmente um fluido térmico para transportar o calor de uma unidade de absorção da radiação solar (coletores) para a água a ser dessalinizada. Os dessalinizadores de aquecimento direto possuem baixa produção de água destilada, entretanto possuem menores custos de instalação e manutenção. Já os dessalinizadores de aquecimento indireto produzem mais destilado; no entanto, são mais complexos e possuem valores de instalação mais altos.

Os dessalinizadores de aquecimento indireto são divididos de acordo com o posicionamento dos estágios em verticais paralelos ou empilhados. Os sistemas que possuem estágios empilhados utilizam a energia térmica de forma mais

eficiente, devido aos seus estágios que recuperam calor do vapor produzido no estágio imediatamente inferior, possibilitando assim uma maior produção de água dessalinizada. O protótipo que possui essa configuração é chamado dessalinizador solar térmico com recuperação de calor; no LESGN/UFC, é dada ênfase a esse tipo de sistema.

O dessalinizador solar com recuperação de calor pode ser dividido em duas unidades: a unidade de aquecimento e a unidade de dessalinização.

A unidade de aquecimento é formada por coletores solares que absorvem a radiação solar, provocando o aquecimento do fluido de trabalho (água) que se move em circuito de termossifão para o tanque de armazenamento da torre. O termossifão é a movimentação natural do fluido em decorrência das diferenças de densidade, onde as moléculas frias do fluido descem e as moléculas quentes ascendem.

A unidade de dessalinização, também chamada de torre de dessalinização, é constituída por um tanque de armazenamento e múltiplos estágios de recuperação de calor. Cada estágio é formado por uma bandeja metálica montada sobre uma moldura de perfil metálico dotado de canais de escoamento, fixados à moldura externa, perfil retangular com características de isolante térmico. O tanque de armazenamento da torre de dessalinização é ligado diretamente à saída dos coletores de tubo evacuado. A Figura 2 apresenta o esquema de um dessalinizador solar com recuperação de calor.

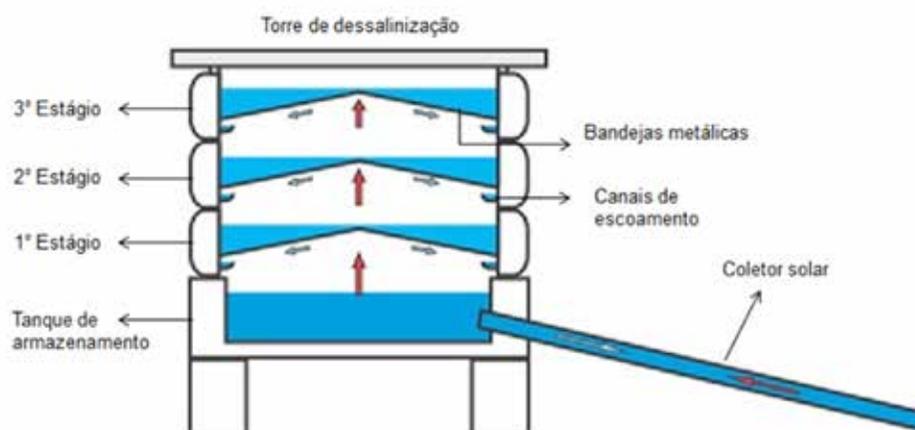


Figura 2. Esquema de um dessalinizador solar térmico com sistema de recuperação de calor.

Fonte: LESGN/UFC.

O processo de dessalinização principia com o aquecimento e a gradual evaporação da água localizada no tanque de armazenamento; esse vapor condensa na bandeja metálica do estágio logo acima, em razão da sua menor temperatura, e desliza para os canais de escoamento (calhas), sendo coletado em recipientes. Cada estágio recupera calor de condensação do vapor produzido no estágio imediatamente inferior.

Na torre de dessalinização, ocorrem os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação que promovem a mudança de fase do fluido com liberação de calor latente na evaporação e condensação, assim como a transferência de calor sem mudança de fase, os quais garantem a recuperação do calor nos estágios. Os gradientes de temperatura ao longo dos estágios são, portanto, a força motriz do processo de dessalinização.

No sistema aqui apresentado, o fluido de trabalho que circula no coletor é a água. Como o coletor possui contato direto com o tanque de armazenamento, essa mesma água é utilizada na produção do condensado na bandeja do primeiro estágio. A alimentação do dessalinizador com água bruta para todos os estágios e tanque de armazenamento é feita a partir do estágio mais alto da torre. No ponto mais alto da face superior de cada bandeja, existe um furo; à medida que a bandeja enche, a água extravasa para a bandeja imediatamente inferior e assim sucessivamente, até finalmente alimentar o tanque de armazenamento, que possui também um extravasor e um ponto de drenagem.

O desempenho do sistema depende de vários fatores, como o isolamento térmico, que garante a conservação de energia no sistema e reduz as perdas de calor para o ambiente; a vedação, que reduz as perdas de vapor; e o nivelamento da água presente nas bandejas, impedindo o transbordo de água bruta para as calhas e assegurando que não haja áreas secas na bandeja que prejudicariam a uniformidade da transferência de calor. Outro fator primordial é a boa captação da radiação solar incidente, que fornece energia ao sistema.

## 1.2 HISTÓRICOS DOS PROTÓTIPOS DE DESSALINIZADORES DESENVOLVIDOS NO LESGN

Vários protótipos de dessalinizadores solares com recuperação de calor vêm sendo desenvolvidos no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN), localizado na Universidade Federal do Ceará, em parceria com o Instituto Solar de Jülich (ISJ), na Alemanha, desde 1997. A revisão dos principais trabalhos realizados no LESGN é importante para apresentar a evolução dos protótipos e seus aprimoramentos.

Lima (2000) apresentou uma análise térmica e os resultados experimentais de um sistema de dessalinização solar com recuperação de calor. Foi feita uma análise química e bacteriológica da água antes e após a dessalinização. O sistema era composto por dois coletores solares e uma torre de dessalinização com seis estágios. O fluido de trabalho utilizado foi um óleo vegetal que fluía através de uma tubulação de cobre. Ao entrar na torre de dessalinização, o fluido de trabalho transferia calor para a água salobra através de um trocador de calor. Os resultados mostraram que o processo de dessalinização reduziu a alcalinidade, o pH, a cor, o teor de cloretos e a condutividade elétrica da água dessalinizada. A análise bacteriológica revelou a eliminação de todas as bactérias do grupo coliformes totais e do grupo coliformes de origem fecal. O dessalinizador alcançou uma temperatura de 80°C no primeiro estágio e obteve uma eficiência experimental de 25%. A produção de água alcançada foi de 5,1 litros por dia. A Figura 3 mostra o protótipo desenvolvido por LIMA (2000).



Figura 3. Dessalinizador térmico com sistema de recuperação de calor. Fonte: Lima (2000).

Coutinho (2003) apresentou os resultados analíticos, numéricos e experimentais de um dessalinizador solar com recuperação de calor. O protótipo era composto por um coletor solar com refletores espelhados planos e uma torre de dessalinização

com seis estágios. A ligação entre essas unidades também foi feita por um trocador de calor. A água produzida apresentou bons resultados nas análises físico-químicas. Foi observado que a dessalinização solar eliminou todas as bactérias dos grupos coliformes totais e do grupo coliformes de origem fecal. Observou-se que a temperatura da água, no primeiro estágio da torre de dessalinização, alcançou valores próximos de 90°C e que a eficiência experimental global do dessalinizador foi de 22%. A produção de destilado alcançada foi de 4,5 L/dia. A Figura 4 apresenta o protótipo desenvolvido por Coutinho (2003).

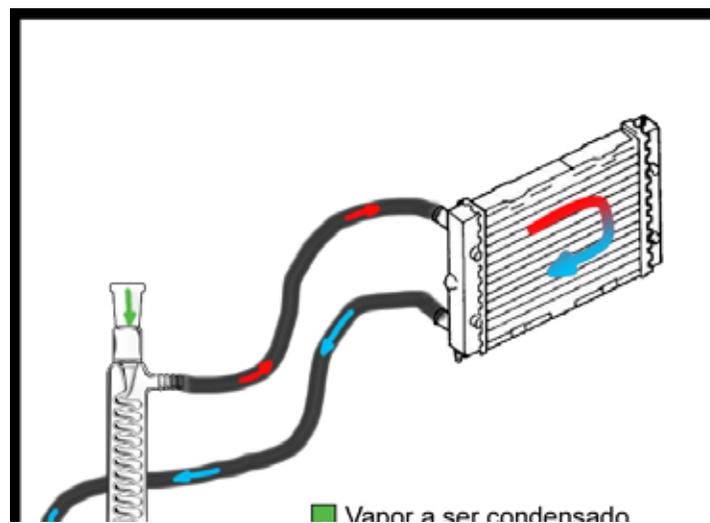


Figura 4. Dessalinizador térmico com sistema de recuperação de calor e refletores. Fonte: Coutinho (2003).

Alves (2009) apresentou uma modificação no sistema de captação de energia solar de Lima (2000), conectando uma torre térmica de dessalinização com recuperação de calor de sete estágios. A modificação consistia na instalação de um tubo de aço inoxidável, no qual foram feitos furos passantes igualmente espaçados ao longo do seu comprimento, de forma a permitir uma melhor distribuição na água quente do tanque de armazenamento. Os resultados mostraram uma temperatura de aproximadamente 100°C no tanque, 80°C no primeiro estágio e uma média de 31 L/dia. Sua eficiência experimental global foi de 0,62. A Figura 5 apresenta o protótipo utilizado por Alves (2009).



Figura 5. Dessalinizador com sistema de recuperação de calor com tubo de distribuição de água no tanque de armazenamento. Fonte: Alves (2009).

Schwarzer et al. (2009) aperfeiçoaram o sistema de dessalinização solar com recuperação de calor, com múltiplos estágios e uma bandeja por estágio, usando canais de material sintético para o escoamento de condensado e coletores de tubo evacuado. Os resultados obtidos mostraram uma produção de 15 a 18 L/m<sup>2</sup> por dia. A vantagem desse sistema estava no menor custo dos coletores solares e canais sintéticos.

Rodrigues (2010) apresentou um estudo do desempenho de uma torre de recuperação de calor que operava com novos canais sintéticos (alterações na geometria), dando continuidade aos trabalhos de Schwarzer et al. (2009). A unidade de aquecimento era constituída por coletores de tubo evacuado, e a unidade de dessalinização possuía cinco estágios de poliuretano. O trabalho apresenta ainda o desenvolvimento de uma correlação para o número de Sherwood, desenvolvida a partir de uma unidade sob condições de temperatura controladas em laboratório, como modelo de referência para o desempenho de torres de recuperação de calor. A produção alcançada foi de 35 L/dia, sem o uso de refletores (Figura 6). No entanto, foram observados resquícios de óleo na água destilada, provenientes do processo de fabricação dos perfis de poliuretano, que foram descartados.



Figura 6. Dessalinizador aquecido por coletores de tubos evacuados com perfis e canais de poliuretano.  
Fonte: Rodrigues (2010).

Apesar do problema na qualidade da água, os perfis de sintéticos utilizados por Rodrigues (2010) eram bem eficientes, bom isolamento térmico do sistema e vedação, prático na sustentação das bandejas e bons resultados de escoamento e coleta do condensado. Uma solução para o problema seria o desenvolvimento de novos estágios em que os perfis sintéticos não entrariam em contato direto com a água condensada, ou seja, não exerceriam a função de calha, mas somente as de isolante e estrutural.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar o desempenho de um protótipo de dessalinizador solar térmico operando com novos estágios de perfis de polietileno e canais de escoamento metálicos.

As metas específicas para a conclusão do trabalho foram:

- fabricação de novos estágios (perfis, bandejas e canais de escoamento);

- montagem do sistema de dessalinização e instalação gradual dos estágios;
- realização de medições experimentais de temperatura, radiação e produção de água dessalinizada;
- análise dos resultados: avaliar o desempenho do sistema com diferentes números de estágios instalados e operando sobre diferentes condições de nebulosidade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os procedimentos utilizados na fabricação dos novos estágios, uma descrição das unidades do dessalinizador e sua instalação, bem como os procedimentos necessários para a realização dos testes de campo.

#### 3.1 FABRICAÇÕES DOS NOVOS ESTÁGIOS

Os estágios da torre de dessalinização são constituídos por perfis retangulares de polietileno, bandejas metálicas inclinadas e canais de escoamento. A Figura 7 mostra os três componentes de um estágio em vista expandida.

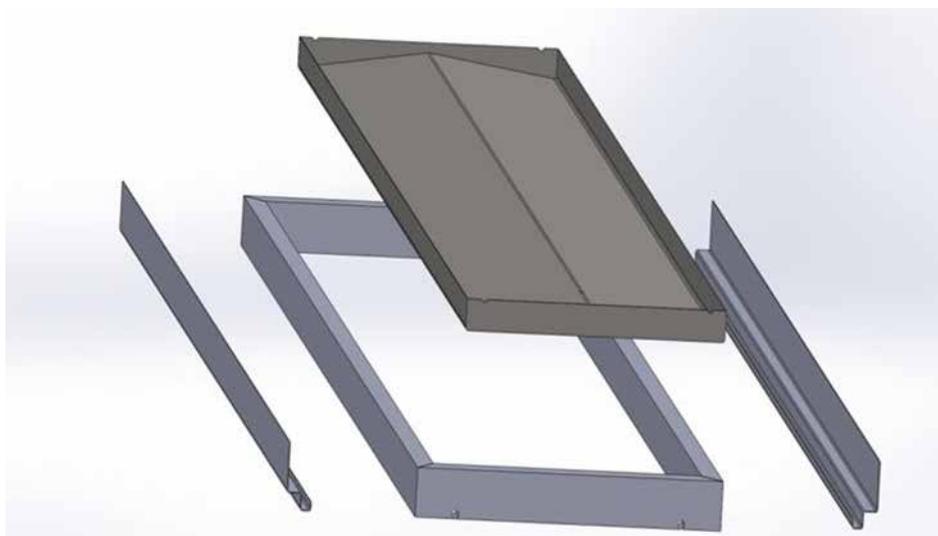


Figura 7. Componentes de um estágio de dessalinização. Fonte: LESGN/UFC.

##### 3.1.1 Perfis de polietileno

Os perfis possuem as funções estruturais e de isolantes térmicos. Eles dão suporte aos canais de escoamento e às bandejas metálicas. O material termoplástico utilizado foi o polietileno. Esses perfis foram utilizados por apresentar característica de bom isolante térmico do material e boa resistência mecânica, aspectos essenciais aos

procedimentos de manutenção e limpeza. A moldura formada pelos perfis tem 2,15 m de comprimento e 60 cm de largura. Os cantos dos perfis foram cortados em ângulo de 45°, visando o aumento da superfície de contato e melhor união do material.

Na fixação dos cantos, utilizou-se inicialmente silicone e resina epóxi. Ao longo dos experimentos, algumas dessas uniões começaram a abrir devido ao ressecamento dos materiais colantes utilizados. Para corrigir o problema, foram fabricados reforços de aço, que foram rebitados nos cantos dos estágios (Figura 8).



Figura 8. Reforço para fixação dos estágios. Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.1.2 Bandejas metálicas inclinadas

Cada estágio possui uma bandeja metálica com a finalidade de armazenar a água a ser dessalinizada e permitir que o vapor d'água no estágio abaixo condense. A bandeja metálica foi fabricada a partir de chapas de aço inoxidável AISI 304 de 2 m de comprimento por 0,60 m largura. Primeiramente, ela foi dobrada na sua linha de centro até um ângulo específico, denominado ângulo de condensação. Foram soldadas, nas extremidades da chapa dobrada, faces de vedação lateral para permitir o armazenamento de água. Ao final do processo de fabricação, a bandeja possui dimensões finais de 2 m de comprimento por 50 cm de largura e ângulo de condensação de aproximadamente 10° (Figura 9).



Figura 9. Bandeja de aço inoxidável. Fonte: Elaboração do próprio autor.

Foi feito um furo na bandeja de 9 mm de diâmetro, próximo a uma das extremidades, na linha de centro da bandeja, que tem como função permitir o escoamento da água bruta para os estágios inferiores até o tanque de armazenamento. Esse furo é feito em lados opostos entre as bandejas de estágios pares e ímpares, a fim de facilitar o escoamento da água bruta para o estágio inferior. Foi colocado um tubo de borracha no furo, com a finalidade de regular o nível da água na bandeja. Esse nivelamento é importante pelos seguintes motivos: impede que haja áreas secas nas bandejas, que prejudicariam o desempenho do sistema, e evita o transbordo de água bruta para os canais de escoamento, o que contaminaria a água de coleta com a água salobra.

### 3.1.3 Canais de escoamentos

Os canais de escoamento recebem a água condensada nas bandejas inclinadas, que escoam até ser coletada. Possuem ainda uma configuração que impede o contato direto do vapor e do condensado da água com os perfis de polietileno. São constituídos de um canal metálico e de uma superfície estendida que evita as perdas

de vapor e facilita no empilhamento dos estágios. A perda de vapor d'água em um estágio não representa apenas perda na produção desse estágio, mas também em todos os estágios seguintes, já que o vapor é o principal agente na transmissão do calor ao longo dos estágios.

Da mesma forma que as bandejas, os canais foram fabricados a partir de chapas de aço inoxidável AISI 304. A chapa foi cortada e dobrada uma série de vezes até formar o canal metálico, de aproximadamente 1,5 cm de largura, e em seguida a superfície estendida. Foram soldados tubos de aço nas extremidades dos canais para serem conectados às mangueiras que coletam a água produzida. Os canais foram fixados nos perfis de polietileno por meio de parafusos (Figura 10).



Figura 10. Perfis de polietileno com canais de escoamento acoplados. Fonte: Elaboração do próprio autor.

A fabricação dos estágios foi realizada na própria oficina mecânica do LESGN, com o uso de máquinas de corte, de solda, furadeira e viradeira.

### 3.2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES

Nos tópicos seguintes, serão apresentadas as características das duas unidades constituintes do protótipo do dessalinizador.

### 3.2.1 Unidade de aquecimento

Para o aquecimento, foi utilizado 25 coletores de tubo evacuado. Cada coletor desse tipo é composto por dois tubos de vidro. O externo possui alta transmissividade e mínima refletividade, para o comprimento de onda da radiação solar, de forma a permitir que a radiação atinja o tubo interno praticamente sem perdas. Este é recoberto por uma superfície seletiva com propriedades de alta absorvidade e mínima refletividade. Entre esses dois tubos, existe vácuo, a fim de isolar a superfície seletiva de processos de condução/convecção. Essa configuração lhe garante alta eficiência em comparação com os coletores de placas planas.

### 3.2.2 Unidade de dessalinização

A torre de dessalinização é composta pelo tanque de armazenamento e pelos estágios de dessalinização empilhados. O tanque de armazenamento usado neste trabalho foi adaptado de Rodrigues (2010), suas dimensões são 2,16 m de comprimento por 61 cm de largura, possui furos laterais para definir o nível de água no interior do tanque e para facilitar a limpeza e secagem do tanque, e ainda as aberturas para as conexões com os coletores de tubo evacuado. O tanque é de aço inoxidável para atenuar a corrosão pelo contato do aço com água de alta concentração salina. Ele também possui isolamento térmico.

Na fase atual do projeto, a torre foi testada utilizando-se, sequencialmente, dois, três, quatro e cinco estágios, embora tenham sido fabricados sete estágios, que futuramente serão montados e testados.

## 3.3 INSTALAÇÃO DO PROTÓTIPO DE DESSALINIZADOR

O protótipo foi instalado no próprio LESGN, localizado na Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza/CE.

Inicialmente, foram colocados dois suportes de concreto para a sustentação do tanque de armazenamento. Os coletores de tubos evacuados foram encaixados nas aberturas do tanque e vedados com anéis de borracha; a outra extremidade dos coletores é sustentada por um suporte de aço fixo ao chão. Os coletores foram orientados para o norte e inclinados aproximadamente  $15^\circ$  em relação ao plano horizontal.

Na parte superior do tanque, foram empilhados os novos estágios e, entre eles, foi colocada uma manta de polietileno de baixa densidade com filme de alumínio que

impede as perdas de vapor e calor.

O protótipo foi testado com dois, três, quatro e cinco estágios. Em cima do último estágio da torre, foi colocada uma tampa para evitar entrada de sujeira e de insetos.

A alimentação do sistema com água bruta (salobra ou salgada) é de cima para baixo, em contracorrente com o fluxo de calor, intensificando os gradientes de temperatura e ainda promovendo o seu preaquecimento. A Figura 11 mostra o protótipo de dessalinizador com cinco estágios.



Figura 11. Dessalinizador solar com nova torre de cinco estágios aquecido por coletores de tubo evacuado.  
Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.4 MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

#### 3.4.1 Medições de volume de água produzido

A produção de água dessalinizada foi medida diariamente. Em cada dia, as medições foram realizadas em dois períodos. Uma pela manhã, para avaliar a produção noturna, do fim da tarde do dia anterior até a manhã do dia da medição; e uma no final da tarde, para verificar a produção no período diurno. O protótipo foi capaz de produzir água mesmo sem radiação incidente nos coletores devido ao armazenamento térmico da sua estrutura. A água produzida em cada estágio foi medida separadamente.

### 3.4.2 Medições de salinidade

Após as medições da quantidade de água, foram retiradas amostras da água produzida em cada estágio e medida sua condutividade elétrica. Esse parâmetro está relacionado à presença de íons dissolvidos na água. Quanto maior a quantidade de íons dissolvidos, maior será o valor da leitura no instrumento. Para avaliar a eficiência do processo de dessalinização, foi comparada a condutividade da água produzida com a da água bruta de alimentação.

### 3.4.3 Temperatura e radiação

O protótipo de dessalinizador é monitorado através de um coletor de dados (datalogger) que registra dados de temperatura no tanque de armazenamento e nos estágios da torre de dessalinização, por meio de termopares tipo K. Não foi possível registrar a temperatura em todos os estágios da torre, pois o datalogger coletava também dados de outros protótipos do LESGN. Além das temperaturas, o datalogger registrou dados de radiação global incidente por meio de um piranômetro acoplado no plano inclinado dos coletores.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais do dessalinizador solar térmico operando com os novos estágios. Na primeira subseção, é analisado o desempenho do sistema em função do número de estágios instalados; já na segunda, é feita uma comparação do desempenho do protótipo submetido a diferentes condições de nebulosidade.

### 4.1 DESEMPENHO DO SISTEMA EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ESTÁGIOS

O sistema operou com as configurações de dois, três, quatro e cinco estágios.

Na operação com dois estágios, o sistema produziu 14,6 litros em um período de 24 horas. A produção diurna foi de 13,1 litros e a noturna foi de 1,5 litros. A condutividade elétrica média medida foi de 4,25  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ .

Com três estágios, a produção total foi de 20,7 litros por dia. Sendo 16,4 litros no período diurno e 4,3 litros no noturno, a condutividade elétrica média medida foi de 4,19  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ .

Com quatro estágios, a produção alcançou 25,3 litros por dia. Sendo 6,0 litros à

noite e 19,3 durante o dia. A condutividade elétrica média desse dia foi 4,34  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ .

Na configuração final, de cinco estágios, a produção alcançou 28,1 litros no período de 24 horas. A produção diurna e noturna foi de 23,3 e 4,8 litros, respectivamente. O gráfico a seguir (Figura 12) apresenta o desempenho do sistema em função da quantidade de estágios instalados.

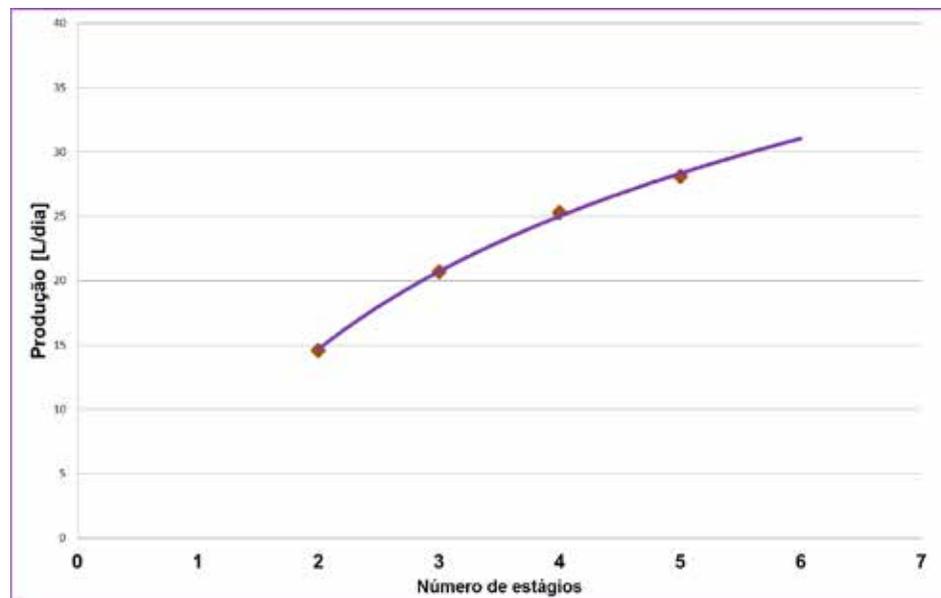


Figura 12. Desempenho do protótipo por estágios instalados e curva de ajuste. Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode ser observado, o ganho na produção de água diminui com o acréscimo de estágios. No entanto, a linha de ajuste indica que, com 6 estágios, o sistema poderia produzir mais de 30 litros por dia.

## 4.2 DESEMPENHO DO SISTEMA SUBMETIDO A DIFERENTES CONDIÇÕES DE NEBULOSIDADE

A nebulosidade é o principal fator limitante da quantidade de energia que chega aos coletores solares. Foi avaliado o desempenho do protótipo comparando-se os resultados de três dias com diferentes níveis de nebulosidade: um nublado chuvoso, um parcialmente nublado e um com céu limpo (ensolarado). Esses testes foram realizados com a configuração de cinco estágios.

O experimento realizado em 11 de abril de 2013, dia com precipitação de 12

mm (Gráfico de chuvas dos postos pluviométricos, 2013), forneceu uma produção de 11,9 litros em um período de 24 horas, sendo 10,0 litros a produção diurna e 1,9 litros a noturna. A condutividade elétrica média da água dessalinizada foi de  $5,20 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ . A Figura 13 apresenta os perfis de temperaturas e radiação na torre de dessalinização nesse dia.

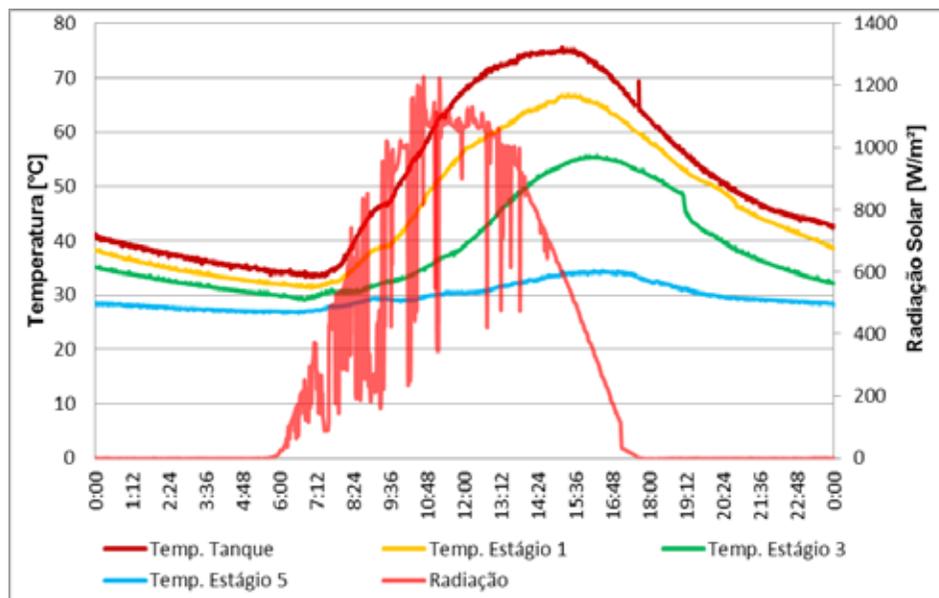


Figura 13. Medições de temperatura e radiação em um dia nublado com chuva. Fonte: Elaboração do próprio autor.

As oscilações na curva da radiação denotam a interferência de nuvens que refletem, absorvem e dispersam parte da radiação solar. A temperatura no tanque de armazenamento chegou a um máximo de  $75,5^{\circ}\text{C}$  por volta das 15h30min. O máximo na produção ocorre três horas após o máximo da radiação solar devido à inércia térmica do sistema. A Figura 14 apresenta as medições em um dia parcialmente nublado.

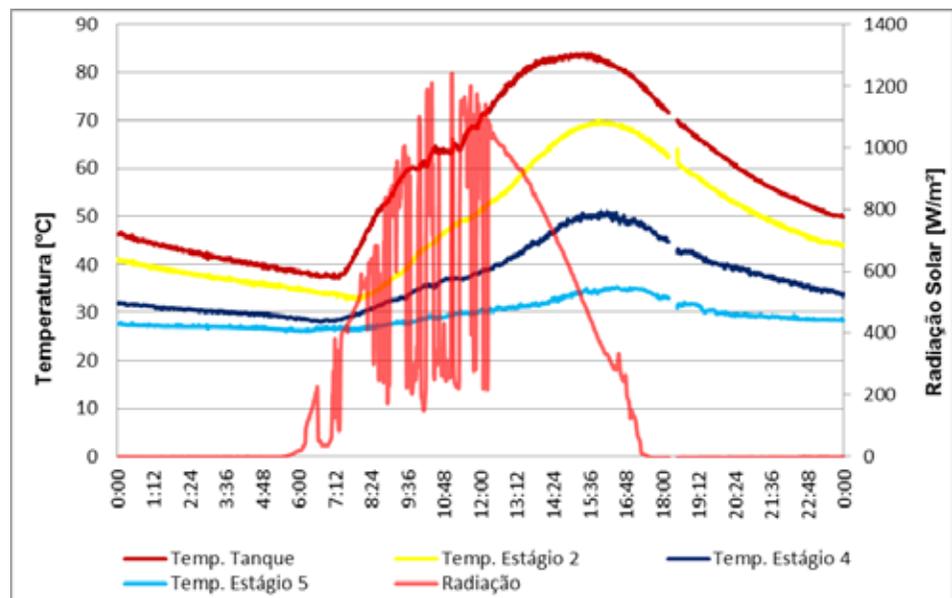


Figura 14. Medições de temperatura e radiação em um dia parcialmente nublado. Fonte: Elaboração do próprio autor.

As discontinuidades observadas no gráfico em torno das 18h do dia devem-se ao momento da coleta dos dados, período no qual o datalogger fica impossibilitado de registrar os valores. Os dados foram registrados em 10 de maio de 2013, um dia parcialmente nublado e sem chuva. A produção total foi de 18,7 no período de 24 horas. A produção diurna foi de 16,6 e a noturna de 2,1 litros, com condutividade elétrica média de 3,91  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ . A temperatura máxima no tanque foi de 83,3°C. A temperatura bem mais alta se justifica pelo fato de que, após o meio dia, não houve mais a interferência de nuvens, possibilitando a recuperação do desenvolvimento dos perfis de temperatura.

Por fim, a melhor produção com cinco estágios, de 28,1 litros ao dia, foi alcançada em um dia ensolarado no dia 21 de agosto de 2013. A produção diurna foi de 23,3 litros e a produção devida ao armazenamento de calor foi de 4,8 litros. A condutividade média foi de 5,33  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ . A Figura 15 mostra as medições desse dia.

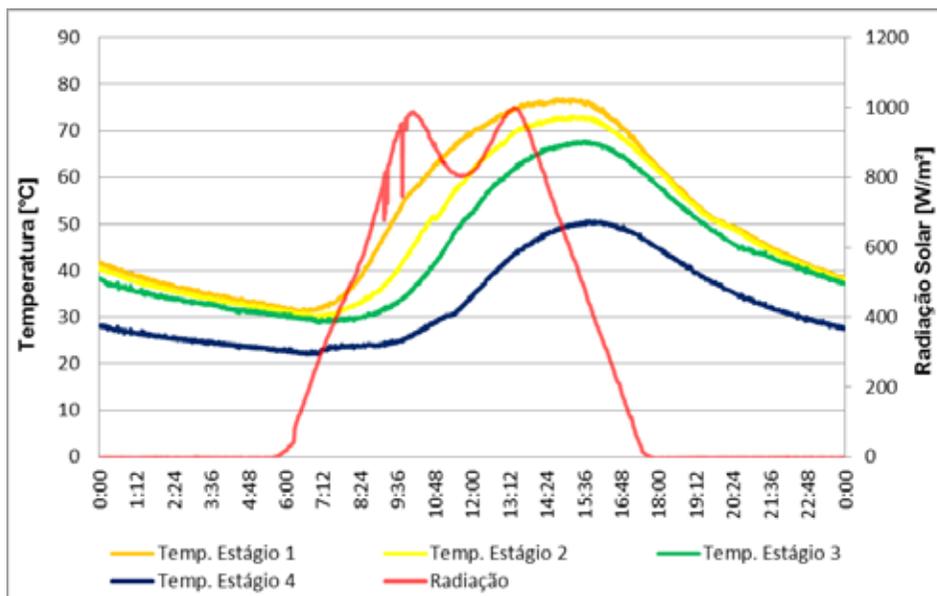


Figura 15. Medições de temperatura e radiação em um dia ensolarado. Fonte: Elaboração do próprio autor.

No gráfico da Figura 15, a temperatura no tanque de armazenamento e no estágio cinco não foi coletada. Conforme o gráfico, nesse dia praticamente não houve incidência de nuvens acima do protótipo. A redução na intensidade da radiação, registrada por volta do meio-dia, deve-se ao fato de que, nesse horário, a própria torre de dessalinização provoca uma pequena sombra nos coletores de tubo evacuado. O ideal é a reorientação do protótipo uma vez ao ano, para corrigir a variação na declinação solar.

A condutividade elétrica da água de alimentação foi cerca de  $800 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ , enquanto o maior valor aqui apresentado foi de  $5,33 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ , mostrando a eficácia do processo de dessalinização.

## 5. CONCLUSÃO

O protótipo de dessalinizador com estágios formados por perfis termoplásticos e canais de escoamento de aço inoxidável, com geometria especial, apresentou bom desempenho.

Em dias ensolarados, a produção do sistema alcançou 28,1 litros de água dessalinizada por dia. Os resultados mostraram que o sistema é capaz de produzir mesmo em dias nublados e chuvosos: nessa condição, as produções obtidas foram

representativas, de 18,7 e 11,9 litros, respectivamente.

Para uma população sendo beneficiada por esse tipo de tecnologia, dessalinizador solar com recuperação de calor, a baixa produtividade em um dia chuvoso, por exemplo, não consistiria em um problema, já que nos poucos dias chuvosos a água da chuva serviria para complementar a produção do dessalinizador. A produção no período da noite, sem incidência de radiação solar, foi de até 6 litros, caracterizando o bom desempenho no armazenamento térmico do sistema.

Devido às altas temperaturas alcançadas no protótipo, os microrganismos presentes na água de alimentação da torre são completamente eliminados, e a eficácia do processo de dessalinização é comprovada pela redução acentuada na condutividade elétrica, conforme testes e análises realizados.

No entanto, devido ao baixo índice de salinidade da água produzida, é necessária a adição de sais minerais para adequá-la ao consumo humano. O que não constitui uma desvantagem, uma vez que é possível misturar a água produzida pelo dessalinizador com a água que vinha sendo consumida pela comunidade local, e, conseqüentemente, possibilitar o aumento de água disponível para consumo. Ressalta-se que essa mistura será possível dependendo da qualidade e do teor de sais da água utilizada pela comunidade local.

Não foram utilizados nos testes refletores junto ao coletor solar; o emprego dos mesmos aumentaria expressivamente a produção de água dessalinizada, uma vez que a incidência de energia solar nos coletores seria maior.

Uma das grandes vantagens do sistema de dessalinização solar com recuperação de calor desenvolvido no LESGN é a possibilidade de produção de água potável de forma descentralizada, utilizando uma fonte de energia gratuita, e especialmente por permitir operação por usuários sem maiores conhecimentos técnicos. Tal tecnologia poderia ser uma importante ferramenta no recorrente problema social da escassez de água no Nordeste brasileiro. Com base no valor de 28,1 L/dia, cada protótipo pode fornecer água potável para até 13 pessoas em comunidades isoladas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, R. D. B. **Sistema de captação de energia solar para uma torre de dessalinização térmica com recuperação de calor.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

COUTINHO, L. D. E. **Protótipo experimental de um dessalinizador solar com recuperação de calor**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

Funceme – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Gráfico de chuvas dos postos pluviométricos**. 2013. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>>. Acesso em: ago. 2013.

GRASSI, M. T. **Água do planeta terra**. Cadernos temáticos de química nova na escola. [s.l.]: [s.n.], 2001.

IDA – International Desalination Association. **Desalination by the Numbers**. 2013. Disponível em: <<http://www.idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/>>. Acesso em: ago. 2013.

LIMA, C. A. **Dessalinizador térmico com recuperação de calor**: análise térmica e resultados experimentais. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (ou Rio+20)**. 2012. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/temas-agua/>>. Acesso em: ago. 2013.

RODRIGUES, F. **Desempenho de uma torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano para um dessalinizador solar térmico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

SCHWARZER, K.; VIEIRA, M. E.; HOFFSCHMIDT, B.; SCHWARZER, T. A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production. **Desalination 248**, Elsevier, 2009, p. 204-211.

## Websites

ONU (2012) - Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (ou Rio+20). Disponível em <<http://www.onu.org.br/rio20/temas-agua/>>. Acesso em: ago. 2013.

International Desalination Association (2013) - Desalination by the Numbers. Disponível em <<http://www.idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/>>. Acesso em: ago. 2013.

FUNCEME (2013) - Gráfico de chuvas dos postos pluviométricos.

Disponível em <<http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>>. Acesso em: ago. 2013.



3º

LUGAR

CATEGORIA  
ENSINO SUPERIOR



**Nicolas Guerra Rodrigues Tão, 20 anos**

**Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)  
São Carlos - SP**

## **ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE FIRST FLUSH NAS ÁREAS URBANAS DA BACIA SANTA MARIA DO LEME, SÃO CARLOS, SP**

### **RESUMO**

A gestão dos recursos hídricos atualmente lida com diversas problemáticas resultantes das atividades humanas e suas demandas, sendo uma delas o gerenciamento do First Flush, escoamento inicial que ocorre durante eventos chuvosos e carrega os contaminantes presentes na superfície, apresentando alto potencial de contaminação. Diversas técnicas podem ser empregadas para o seu tratamento, como as wetlands construídas, que podem promover uma melhoria ambiental ao tratar este contaminante e reduzir seu potencial de degradação do meio, além de poderem ser exploradas com fins paisagísticos de maneira integrada ao espaço urbano. Este trabalho buscou caracterizar o First Flush produzido na área urbana da Sub-bacia Santa Maria do Leme, em São Carlos/SP, e propor sistemas para o seu tratamento de maneira descentralizada nos bairros já ocupados, realizando também considerações para o projeto de áreas para futuras ocupações. Diversos atributos físicos da região foram levantados, como hipsometria, declividade, precipitação e permeabilidade, sendo que estes dados foram processados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) através de diferentes programas para a análise espacial, utilizando bases de cartas topográficas em escala 1:10.000, imagens de satélite GeoEye, além de bancos de dados já existentes quanto às propriedades da bacia. A caracterização do First Flush apontou um valor médio na bacia de 25,04 mm, o que produz um volume a ser tratado de cerca de 32.491 m<sup>3</sup>. A área urbana da sub-bacia foi recortada em 5 diferentes sub-regiões, caracterizando o

First Flush produzido em cada uma delas, de modo a projetar sistemas de tratamento independentes. O sistema escolhido foi o de wetland com tempo de detenção estendido, pois se adequa a áreas com maior extensão permitindo ocupar um espaço menor. A busca de áreas disponíveis para instalar o sistema considerou as áreas públicas institucionais na região, pois podem ser destinadas a tais finalidades, pressupondo o sistema seja projetado de modo a explorar seu potencial paisagístico. O desenvolvimento de tais sistemas se mostrou viável nas condições observadas, porém destaca-se a necessidade de que esta questão esteja inserida em projetos de expansão urbana, considerando o uso de sistemas específicos para a gestão do First Flush além de diferentes concepções de elementos do espaço urbano, destacando-se que o Plano Diretor Municipal de São Carlos apresenta instrumentos adequados para tal gestão.

Palavras-chave: gestão de bacias hidrográficas, água pluvial, drenagem, wetland.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de ações relacionadas à solução de problemáticas ambientais deve estar pautado em uma abordagem que seja integradora de áreas do conhecimento, sendo que a gestão de recursos hídricos não foge de tal premissa, e vai além, deve ser abordada dentro de um contexto específico em que se encontrem todos os aspectos ambientais relevantes e os conflitos que se desenvolvem. Desta forma, é de grande importância que projetos ambientais sejam desenvolvidos considerando o contexto da bacia hidrográfica como modulador dos componentes que ali interagem, seguindo ainda um princípio de descentralização da gestão, pois isto aproxima em um contexto mais sólido os fatores importantes para a realização de ações, considerando que a descentralização possibilita uma avaliação mais profunda das problemáticas enfrentadas e identifica de maneira mais adequada as potencialidades de cada ator para a solução destas problemáticas.

A gestão dos recursos hídricos utilizando a bacia hidrográfica como unidade básica foi aplicada em muitas experiências ao longo do século XX em diversos países, bem como em iniciativas nacionais para a adoção deste conceito de gestão, que foi fundamentado através da Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, criando uma política de recursos hídricos no Brasil e estabelecendo que a gestão deverá ser realizada por bacias hidrográficas aplicada em diversas escalas (PORTO; PORTO, 2008). A importância de se considerar a bacia hidrográfica origina-se do fato de ela ser um espaço em que interagem os processos biogeofísicos, econômicos e sociais, o que possibilita diversas integrações institucionais e a articulação entre o conhecimento científico e as ações de gerenciamento, sendo que todas estas

informações podem ser alimentadas em um banco de dados que permita a avaliação de se aplicar novas ecotecnologias em diferentes projetos de gestão da bacia, realizando simulações que confrontem os custos das alternativas com os benefícios delas advindos (TUNDISI, 2008).

De maneira indissociável à tendência da adoção da bacia hidrográfica como unidade de gestão, ocorreu também a descentralização da gestão. Este processo foi incorporado no cenário internacional de políticas públicas desde a década de 1980, e de maneira mais expressiva no Brasil a partir da década de 1990, que desenvolveu mudanças políticas para conceder maior poder de decisão política a níveis mais locais. A adoção de tal modelo de gestão traz benefícios como a redução de custos em transações, maior aproveitamento de informações, reconhecer de maneira mais efetiva as necessidades locais e assim trazer propostas de adaptações adaptadas a cada realidade, além de promover um espaço de decisão que seja mais democrático (ABERS; JORGE, 2005).

Entre as problemáticas enfrentadas no contexto descentralizado de uma bacia hidrográfica, estão as consequências oriundas do processo de urbanização, sendo possível citar a impermeabilização do solo que modifica a estrutura de drenagem de uma bacia, o que leva à construção de sistemas de drenagem que captam a água escoada na bacia e a direcionam para um corpo hídrico receptor, seguindo a lógica de gestão convencional aplicada às águas de escoamento pluvial. Tal metodologia de gestão não considera a influência que o despejo direto deste escoamento tem sobre a qualidade dos corpos d'água e seu potencial em degradar os ecossistemas; adota apenas uma posição de gestão em dispersar os resíduos gerados e atribuir ao ambiente a função de metabolizá-los.

Um importante fator da equação não considerado no raciocínio convencional é a composição química da água escoada. É necessário considerar que, após um evento chuvoso, a água precipitada irá percorrer a área de drenagem e, durante este processo, também irá carrear os resíduos e partículas depositados na área de drenagem. A composição deste material depositado nas áreas urbanas resultará do desenvolvimento residencial e industrial encontrado na referida região, e a concentração final deste material na água de escoamento será influenciada pelo período de seca, que determina a concentração do material, e também pela intensidade da precipitação. Outra característica importante da água de escoamento é que as maiores concentrações do material depositado são encontradas nos primeiros volumes escoados, padrão denominado de "primeiro fluxo", ou First Flush (AMARAL, 2011). Este efluente apresenta uma composição química com diversos contaminantes químicos e biológicos, com alto potencial de deterioração dos ecossistemas.

Os efeitos da ação do First Flush tendem a se concentrar em um ponto específico de uma bacia hidrográfica quando se parte de seu conceito físico. Todos os efeitos dos processos desenvolvidos dentro da bacia, considerando as áreas urbanas, industriais, agrícolas e naturalmente preservadas, são representados no exutório, um verdadeiro resumo da ocupação do território e do uso das águas na região (PORTO; PORTO, 2008). Portanto, a ação do First Flush também será concentrada no exutório, além de ser um ponto de convergência dos fluxos de escoamento da bacia. Ações de gestão que busquem soluções para a problemática do First Flush devem considerar estrategicamente a importância do exutório para a implantação de medidas de controle da poluição.

Entretanto, estas medidas de controle da poluição, quando voltadas ao tratamento do First Flush, podem ser consideradas medidas de prevenção no sentido de que minimizam os efeitos deste escoamento sobre os ecossistemas, sendo que a presença da elevada carga de poluentes no First Flush ainda é inerente às áreas urbanizadas devido ao modo como são projetadas. Segundo Nascimento e Vilaça (2008), medidas preventivas adotadas na gestão de bacias hidrográficas apresentam melhor desempenho devido ao seu resultado duradouro, que gera, em comparação às medidas corretivas, economia de recursos.

A medida mais direta no gerenciamento do First Flush é a sua contenção e tratamento prévio antes de ser direcionado para o corpo receptor. Diversos métodos têm sido estudados com tal propósito, e muitas observações apontam para o potencial dos sistemas de wetlands no tratamento deste tipo de efluente. Sistemas de wetlands baseiam-se nos processos biogeoquímicos que ocorrem em áreas naturais alagadas para a remoção de poluentes da água. Sua estrutura básica envolve um substrato, um conjunto biológico de macrófitas aquáticas e microrganismos, e um ambiente constantemente encharcado. Diversas combinações podem ser feitas utilizando diferentes materiais para o substrato e diferentes espécies de plantas e microrganismos, combinados em várias sequências e sentidos de fluxo de água. Porém, independente da estrutura aplicada, o princípio deste sistema é que a grande diversidade de organismos do sistema permite a retenção de diferentes poluentes, envolvendo em um único sistema as diversas etapas presentes em um tratamento convencional, e que pode inclusive apresentar resultados mais eficientes. Sistemas de wetlands ainda podem ser estruturados em diversos módulos e em diferentes escalas, sendo altamente adaptáveis a cada situação (KADLEC; WALLACE, 2009).

Considerando os conceitos discorridos até o momento, identificam-se: i) a necessidade da proposição de medidas para a redução do potencial do First Flush de degradar os ecossistemas; ii) o potencial de sistemas de wetlands para o tratamento de

efluente; e iii) a gestão da problemática do First Flush de maneira descentralizada e considerando o contexto de bacia hidrográfica como mais eficiente.

Tendo em vista a problemática do First Flush amplamente discutida, entende-se a importância de se desenvolver novas tecnologias e dar atenção a determinadas problemáticas que inicialmente podem ser consideradas irrelevantes, destacando-se desta forma o potencial poluidor do First Flush, como já foi apresentado. Destaca-se que, além de melhoria ambiental, a implementação de sistemas de tratamento também pode estar ligada a uma melhoria paisagística do meio, gerando maior conforto ambiental e lazer, e melhorias técnicas, já que o acúmulo da água para tratamento gera uma diminuição no pico de vazão das chuvas, que pode vir a reduzir risco de enchentes, recorrentes na região, aumentando a infiltração e recarga do lençol freático.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo propor um sistema de contenção de águas pluviais caracterizadas como First Flush na região da bacia Santa Maria do Leme, indicando-se sistemas de tratamentos apropriados para a redução do potencial de contaminação deste em corpos d'água, elaborando o sistema para bairros que já existem e para a futura ocupação urbana.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar volumetricamente a água de escoamento da área urbana considerada como First Flush.
- Determinar áreas prioritárias para a alocação do tratamento do First Flush na área urbana determinada como área de estudo.
- Definir alguns sistemas de tratamento que seriam viáveis para serem implantados nos diferentes locais da área urbana determinada como área de estudo.
- Elaborar um sistema-base de coleta e armazenamento, indicando um tratamento do First Flush, para futuras ocupações urbanas na bacia, levando-se em conta a área permeável exigida no plano diretor e, em uma segunda situação, a área permeável indicada como mais adequada em referências bibliográficas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODO

### Área de estudo

O presente trabalho teve como macroárea de estudo a Microbacia Hidrográfica do Córrego Santa Maria do Leme, localizada no município de São Carlos, SP (Figura

10 – Mapa de articulação), sendo contribuinte para a Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho. Ela apresenta uma área de 11,02 km<sup>2</sup>, ocupados com diferentes tipos de uso do solo, o que envolve áreas urbanizadas, áreas de produção agrícola e áreas de vegetação preservada. Segundo a classificação climática de Koeppen, o clima é Cwa, quente com inverno seco, com temperatura inferior de 18°C em média, ultrapassando 22°C nos meses mais quentes. O corpo hídrico principal é o córrego Santa Maria do Leme, de extensão aproximada a 4,7 km, com três afluentes principais e três secundários. No município, existem três outorgas de captação de água para o córrego Santa Maria do Leme. Segundo o Plano Municipal de Saneamento – São Carlos/SP (2012), os principais problemas relacionados aos usos conflitantes da água se devem a falhas na drenagem que levam ao extravasamento de canal em diversos pontos.

### **Caracterização volumétrica do First Flush da área urbana da bacia como um todo**

A primeira etapa do presente estudo compreende a caracterização volumétrica do First Flush total da área urbana da bacia. Para isso, foi necessária a digitalização da área urbana e determinação de sua área total em metros, curvas de nível, hidrografia, entre outros atributos do meio físico, em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas). No caso, o SIG utilizado foi o MapInfo Professional 11.0. Também foi necessário determinar quantos milímetros de chuva podemos considerar como First Flush, sendo que este vai variar conforme as características do meio físico, permeabilidade, tempo de detenção da bacia, entre outros fatores.

Tomaz (2009) apresenta alguns exemplos de milímetros de chuva considerados como First Flush, como em seu próprio estudo na cidade de Mairiporã, estado de São Paulo, que determinou que o maior montante de carga de poluentes é lavado do ambiente urbano nos primeiros 25 mm de chuva; outro exemplo é da LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), nos Estados Unidos, que prevê um valor também de 25 mm, em regiões úmidas, para o total de chuva mais crítico em termos de poluição. Tal estimativa leva em conta o pressuposto de Schueler (1987 apud TOMAZ, 2009) de que o First Flush é obtido com a precipitação que gera escoamento, que seria 90%, acarretando na deposição de 80% dos sólidos em suspensão.

Outra estimativa do First Flush que considera atributos mais específicos da bacia é apresentada pela American Society of Civil Engineering (1998 apud AKAN, 2003), que criou uma fórmula de determinação de First Flush (P, em mm) que se pretende aplicar nesta bacia, utilizando-se a área impermeável (I, em percentual); a precipitação média do município para um dia, com tempo de retorno de 6

meses ( $P_6$ , em mm); e um coeficiente “ar”, que leva em conta o tempo de detenção estendido do reservatório que se pretende criar (foi utilizado o valor para 24h de 1,299, sugerido pelos autores), obtendo-se a seguinte fórmula:

$$P = 1,299 \times P_6 \times (0,858 \times I_3 - 0,78 \times I_2 + 0,774 \times I_1 + 0,04)$$

Equação 1. Determinação do First Flush em mm.

A partir da precipitação considerada como First Flush, é possível determinar o volume total de água a ser retido para a melhoria da qualidade das águas pluviais ( $WQ_v$ , em  $m^3$  - Equação 2) que atingem os corpos hídricos. Para isso, é utilizado um coeficiente volumétrico ( $R_v$  - Equação 3), obtido através de constantes e da área impermeável ( $A_i$ , em %), da área urbana da bacia ( $A$ , em  $m^2$ ) e do First Flush ( $P$ , em mm), já calculado.

$$WQ_v = (P/1000) \times R_v \times A$$

Equação 2. Determinação do volume de água em  $m^3$  para melhoria da qualidade de águas pluviais para reservatório de detenção estendida.

$$R_v = 0,05 + 0,009 \times A_i$$

Equação 3. Coeficiente volumétrico.

Para diferenciar as áreas permeáveis das impermeáveis na zona urbana, foi proposta a aplicação do índice NandA - Natural and Artificial features ( $NandA = G - (R + B)$ ), que consegue distinguir elementos naturais (vegetação, sombra, solo exposto e corpos d'água) dos elementos artificiais (telhados de edificações, asfalto e concreto) na paisagem. O índice trabalha com as diferentes bandas de cor (RGB) de imagens de satélite de alta resolução, aumentando o contraste entre os elementos, considerando que a absorção das bandas do espectro de luz (0 a 255) é maior para os elementos naturais e menor para os artificiais (POLIDORIO, 2007). Para aplicar esta metodologia, foi desenvolvido um programa através do Microsoft Visual Studio 2010 com linguagem C# utilizando a biblioteca openCV para C# (EmguCV). A análise se constituiu de duas etapas em que foram processadas imagens de satélite GeoEye atuais da região (2013), obtidas com uma altura de 2 km, que produziu pixels com área de 0,23  $m^2$ . Primeiramente, aplicou-se

o índice proposto para realçar as áreas permeáveis dos outros elementos gerando uma imagem em escala de cinza, e posteriormente foi aplicado um threshold para determinar o intervalo na escala de cinza em que os pixels da imagem correspondem de fato a uma área permeável, sendo este intervalo de 160 a 255. Estas etapas geraram uma imagem com resposta binária que separava as áreas permeáveis (vegetação e gramado) das áreas impermeáveis, e com base na quantidade de pixels correspondente às regiões permeáveis e sabendo-se a área de cada pixel foi possível determinar a área permeável total. Essa etapa foi realizada pelo profissional Alan Kazuo Hiraga (mestrando em Ciências da Computação pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação – Processamento de Imagens e Sinais, UFSCar), com acompanhamento do autor do presente estudo.

### **Subdivisão da bacia levando-se em conta os bairros, a delimitação da bacia, as curvas de nível e o sistema de drenagem atual. Caracterização volumétrica do First Flush por área subdividida**

Através de planos de informação disponibilizados contendo o sistema viário de toda a bacia combinados com informações disponíveis da delimitação de bairros, acessíveis no Sistema de Informações Geográficas de São Carlos (SigaSC, 2013), foi possível a subdivisão da bacia, associada às curvas de nível, já que áreas do mesmo bairro que se encontrarem fora da delimitação da bacia são desconsideradas pois não têm sua drenagem nesta região.

A informação do sistema de drenagem atual é essencial, pois através dele é possível determinar o fluxo de escoamento da área urbana, sua direção e área abrangida. As divisões dos sistemas de drenagem são essenciais para a determinação das subáreas, tendo em vista que toda a água que escorre pela área urbana é direcionada por esse sistema, que leva em conta também as cotas e foi estabelecido possivelmente de forma independente em alguns bairros, o que justifica a definição dos bairros.

Um dos principais motivos para a subdivisão em áreas está no pressuposto de que se deve tratar a questão da drenagem de maneira descentralizada, buscando dimensões menores para os sistemas de tratamento, distribuídos nos diversos pontos, tendo em vista que os espaços não são muito grandes e que efetivamente se teria mais gasto com o sistema de transporte dessa água se ele fosse centralizado.

Com as áreas já subdivididas, utilizando o cálculo de First Flush, é possível determinar o volume de água que deve ser direcionado para tratamento em cada região.

## **Definição de áreas prioritárias, com base na subdivisão, para a implantação dos sistemas de tratamento de First Flush**

A definição de áreas prioritárias leva em conta as sub-regiões onde é possível que ocorra maior concentração de poluentes. Isso foi determinado através do uso e ocupação da área urbana, dando ênfase às sub-regiões onde se exerçam em maior concentração atividades potencialmente mais poluidoras, como postos de combustível, lava-rápidos, estacionamentos, borracharias e oficinas mecânicas. Além disso, outro parâmetro mais simples foi dar prioridade a locais onde se tenha maior densidade urbana (vias de grande circulação).

## **Análise de localizações viáveis em cada área subdividida considerada prioritária para a instalação de sistemas de tratamento**

Nesta fase, identificaram-se locais nas subáreas definidas como prioritárias para a implantação dos sistemas de tratamento de águas pluviais. Esses locais são áreas públicas desocupadas ou ocupadas parcialmente, pois mesmo que existam praças, ou que sejam próximas a áreas residenciais, é possível a implantação dos sistemas de tratamento propostos já que estes não interferem no seu uso principal e podem ainda vir a ser um atrativo paisagístico para a população local. Além disso, foi considerada como critério a locação desses sistemas nas áreas mais baixas e próximas dos rios, ou ainda o mais próximo possível das saídas do sistema de drenagem, para que não houvesse gastos com tubulações de direcionamento dessa água para os sistemas de tratamento. As áreas mais baixas foram escolhidas devido à concentração das águas pluviais transportadas por gravidade, e, por associação, essas áreas sempre serão mais próximas das saídas de drenagem e dos rios.

As áreas para a alocação dos sistemas de tratamento não devem ter declividade maior 8% (TOMAZ, 2009).

## **Dimensionamento dos sistemas, definição dos sistemas de tratamento viáveis e proposição para essas áreas prioritárias**

Cada área possui uma quantidade diferente de água em volume a ser tratada e também espaços diferentes dentro de si disponíveis para a implantação dos sistemas. Tendo isso em vista, escolhem-se os sistemas de cada subárea com características adaptadas à quantidade de água que será tratada e o tamanho do sistema que é possível implantar.

Para que o sistema se adapte às áreas disponíveis, considera-se a necessidade de

projetar um reservatório cilíndrico de contenção do volume de First Flush produzido antes que ele seja direcionado para a wetland, com o intuito de reduzir a área ocupada pelo sistema. Determinou-se que o reservatório deverá ocupar cerca de 30% da área disponível, e o restante representa a área do sistema de wetland. Com base na área disponível para o reservatório, é possível calcular a sua altura a partir do volume  $WQ_v$  encontrado. A partir da área restante, pode-se calcular o volume que a wetland tratará com base na altura da lâmina d'água do tipo de sistema escolhido, e considerando ainda o tempo de detenção do sistema é possível saber o tempo total necessário para que ele trate todo o volume de First Flush produzido.

### **Elaboração de um sistema-base para ocupações futuras na bacia**

Levando-se em conta a propensão de ocupação urbana existente na bacia, indicada no Plano Diretor Municipal (citado na contextualização), é necessário pensar não só em adaptações da situação existente, mas em projeções de utilização futura do espaço da melhor forma possível, pensando na elaboração de um projeto de bairro ideal.

### **Considerações gerais sobre os mapas produzidos**

Os mapas produzidos foram realizados em ambiente SIG, sendo que a informação geográfica associada tem como fonte as Cartas Topográficas de 1:10.000 disponibilizadas pelo Instituto Geográfico Cartográfico do estado de São Paulo (IGC). A maioria dos mapas foram processados no Software MapInfo Professional 11, com exceção dos mapas 3D, apresentados aqui como ilustrativos, que foram processados no Software ArcGis (ArcMap e ArcScene, 2010). Tais mapas sofreram extrapolações de suas escalas para tornar os aspectos do relevo mais facilmente visualizáveis ( $z=10$ ).

## **4. RESULTADOS, DISCUSSÃO E PROPOSTAS**

Primeiramente, foram obtidos os dados pluviométricos diários para o município de São Carlos, por um período mínimo de 30 anos (TOMAZ, 2009), com o volume de chuvas em milímetros. Esses dados foram coletados pela estação pluviométrica localizada na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) (Código do INMET:A711, Latitude Sul: -21,98 e Longitude Oeste: -47,88), ligada à rede de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibilizados por meio de cadastro no sistema de Base de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP,

2013), sendo o intervalo histórico utilizado de janeiro de 1970 até março de 2013, somando 43 anos, mais que o período mínimo necessário.

Com tais dados, foi possível calcular a frequência acumulada das precipitações que geram runoff, citadas por Tomaz (2009) como sendo toda precipitação acima de 2 mm. Schueler apud Tomaz (2009) determina então que o First Flush é obtido com 90% das precipitações que produzem runoff. Com isso, obteve-se o referencial de precipitação de 39 mm. Esta aproximação é apresentada na Figura 1; porém, decidiu-se trabalhar com a segunda aproximação descrita na metodologia para estimar os volumes de First Flush a serem geridos em cada subárea da bacia.

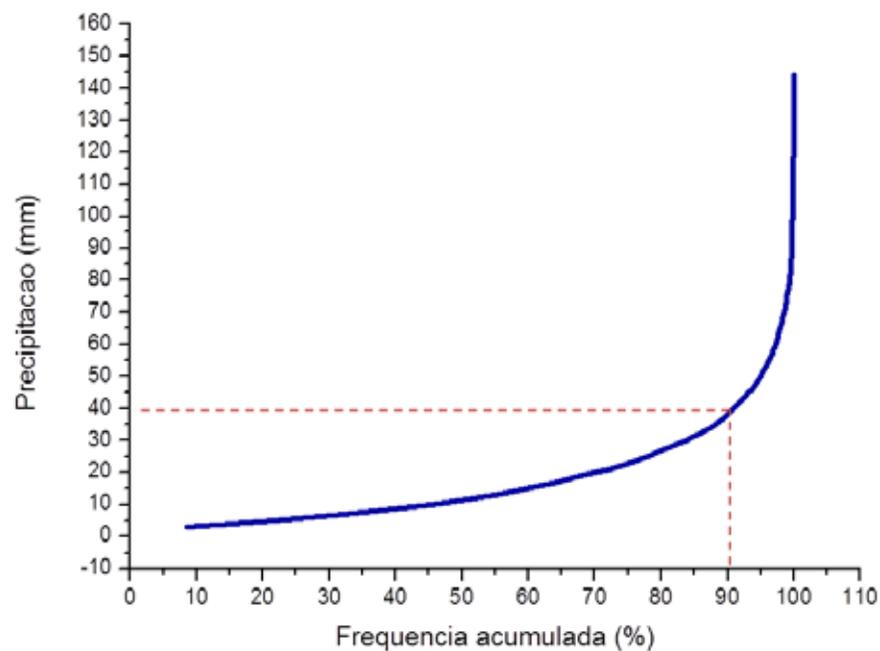


Figura 1. Relação entre a frequência acumulada de precipitação(%) com a precipitação (mm), obtendo-se o referencial de precipitação com 90% de 39 mm aproximadamente.

Foi determinado um polígono, a área de estudo, que considerou a maior parte da área urbana da bacia, sendo que as áreas não incluídas eram mais isoladas e localizadas na cabeceira da bacia, o que dificultaria a aplicação da coleta da água de drenagem ou a determinação de um ponto onde houvesse concentração de First Flush, devido à ausência de adensamento urbano. A área de estudo está então localizada próxima ao exutório da bacia Santa Maria do Leme, junto ao córrego

Cambuí e ao rio que dá nome à bacia, local mais baixo e com maior adensamento urbano, somando-se 1.796.000 m<sup>2</sup> (Figura 2).

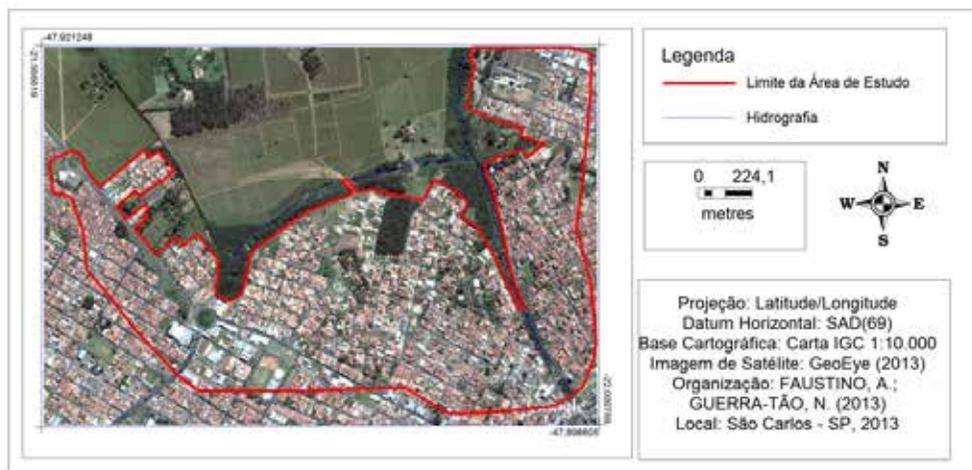


Figura 2. Mapa da área urbana considerada como área de estudo no presente trabalho.

A partir disso, foi possível determinar qual seria a área impermeável da área de estudo. Através do programa desenvolvido, descrito na metodologia, obteve-se a imagem processada (Figura 3), separando-se as regiões permeáveis das regiões impermeáveis, obtendo-se a área total permeável existente na área urbana, 452.759,6 m<sup>2</sup>, correspondendo a 25,27% da região (a área impermeável será então 74,73%).



Figura 3. Imagem da área urbana escolhida processada, retirando-se áreas permeáveis.

Os dados foram então aplicados à Equação 1 descrita na metodologia, porém,

para obter o P (total de First Flush em milímetros) foi necessário determinar a chuva com tempo de retorno de 6 meses para a bacia. Com base nos dados históricos e seguindo a relação entre a probabilidade de ocorrência do evento chuvoso (Prob) e o tempo de retorno (Tr) apontada por Akan e Houghtalen (2003) (Equação 4), a precipitação que apresenta Tr de 6 meses é a de 35 mm. Aplicando este resultado na Equação 1, o valor encontrado de First Flush foi de 25,04 mm. Então, da chuva média de 35 mm com período de retorno de seis meses, 71,53% pode ser considerada como potencialmente mais poluidora.

$$Tr = 1 / Prob$$

Equação 4. Tempo de retorno através da probabilidade de ocorrência do evento.

O volume total de água a ser retido para a melhoria da qualidade das águas pluviais (WQv) na área urbana considerada foi então contabilizado, obtendo-se um volume de 32.491 m<sup>3</sup> a serem retidos por período de chuva. A área média para tratar o volume total seria aproximadamente 36.101 m<sup>2</sup>, estabelecendo-se um sistema de retenção com 0,9 metros de profundidade (TOMAZ, 2009), o que representaria apenas 2,01% da área urbana da bacia delimitada como área de estudo. Mesmo que não representem a ocupação de muito espaço, tais dados são apresentados apenas como ilustrativos, já que a concentração do tratamento em apenas um lugar não é indicada, necessária ou possível, tendo em vista que devem ser considerados aspectos de: declividade; altitude, que estará relacionada com cada direção que a água escoar na área urbana, concentrando-se em diferentes áreas da bacia; transporte, que deve ser feito apenas com o auxílio do próprio relevo, sem utilização de bombas que gerariam gastos com energia elétrica; e, por fim, com a pouca disponibilidade de áreas tão grandes, a concentração torna-se inviável.

Levando-se em conta tais aspectos, foi proposta então a subdivisão da área de estudo proposta anteriormente em sub-regiões. Com os dados de altitude, curvas de nível e Mapa 3D (Figuras 4 e 5), foi determinado para onde ocorria o escoamento superficial da água.

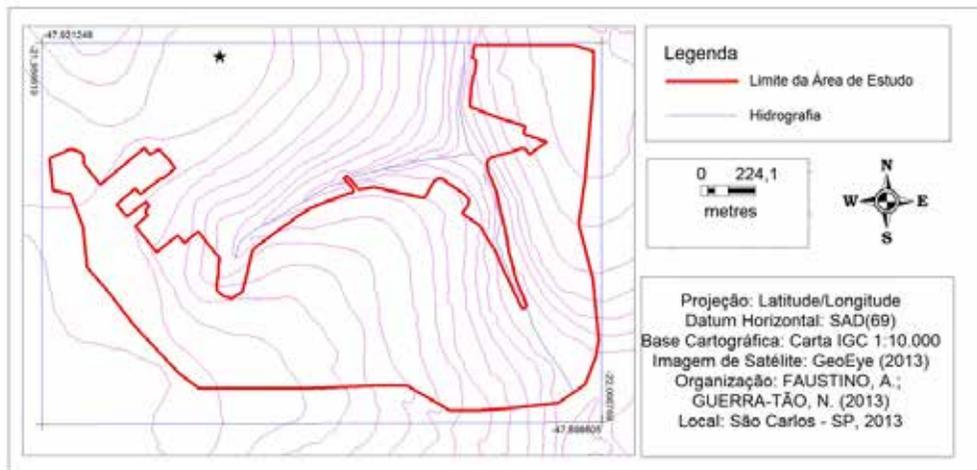


Figura 4. Limite da área de estudo associado às curvas de nível utilizadas para a delimitação das sub-regiões.

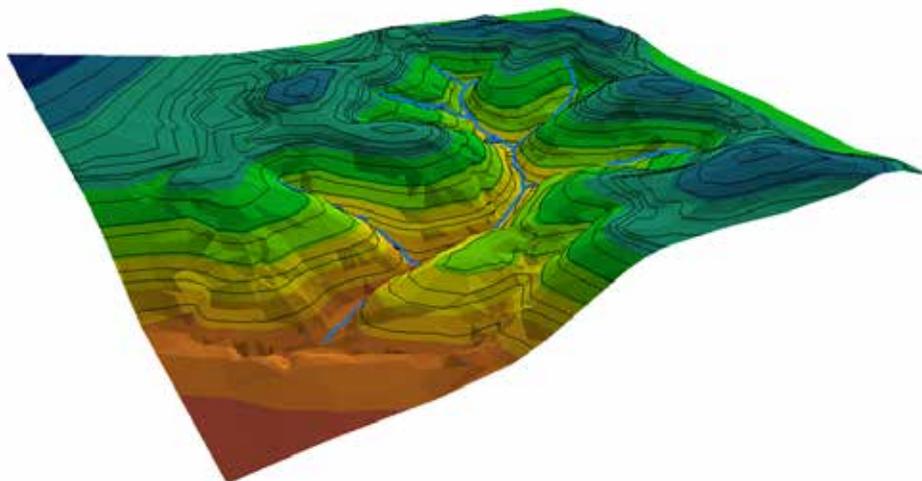


Figura 5. Modelo tridimensional da sub-bacia Santa Maria do Leme elaborado a partir das curvas de nível com equidistância de 5 metros.

Obtiveram-se as informações da delimitação e de quais bairros estavam localizados na área (Figura 6).

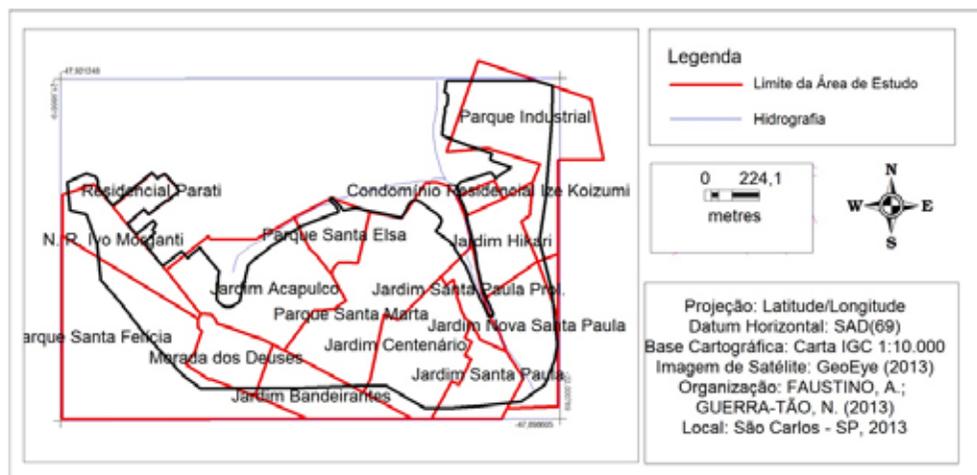


Figura 6. Bairros localizados dentro da Área de Estudo.

Com essa informação em mãos, foram solicitados os planos de drenagem para cada bairro ao Sistema Integrado Municipal (SIM), processo ainda não concluído. Porém, obteve-se a informação de que tais dados não estão organizados pela prefeitura de São Carlos, salientando-se que muitos bairros da região são anteriores à exigência de drenagem pluvial pela legislação, e tais sistemas podem nem ao menos existir. Sendo assim, conclui-se previamente que o único fator de influência sobre o escoamento está relacionado à altitude. Desta forma, obtiveram-se as sub-regiões apresentadas na figura a seguir (Figura 7). A área total das sub-regiões somadas não será igual à área total de estudo descrita anteriormente, pois, quando foram feitas as subdivisões, algumas regiões, em que a água pluvial não escoava na mesma direção foram desconsideradas.

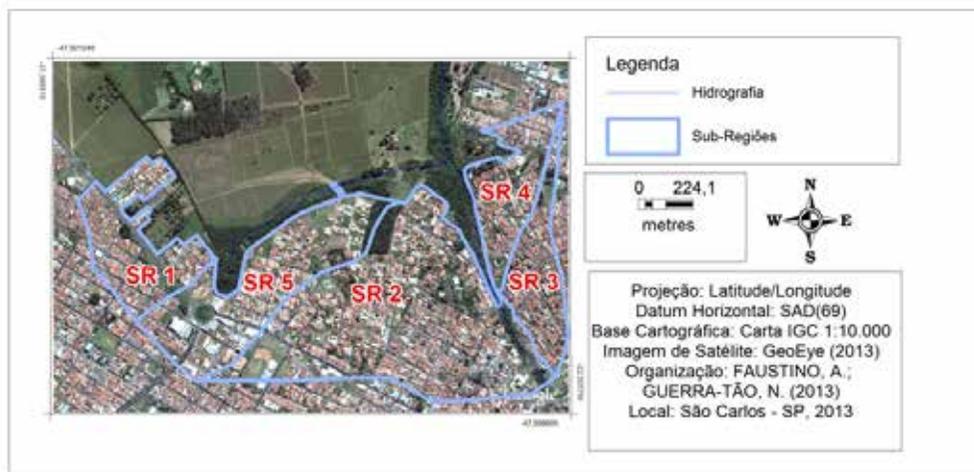
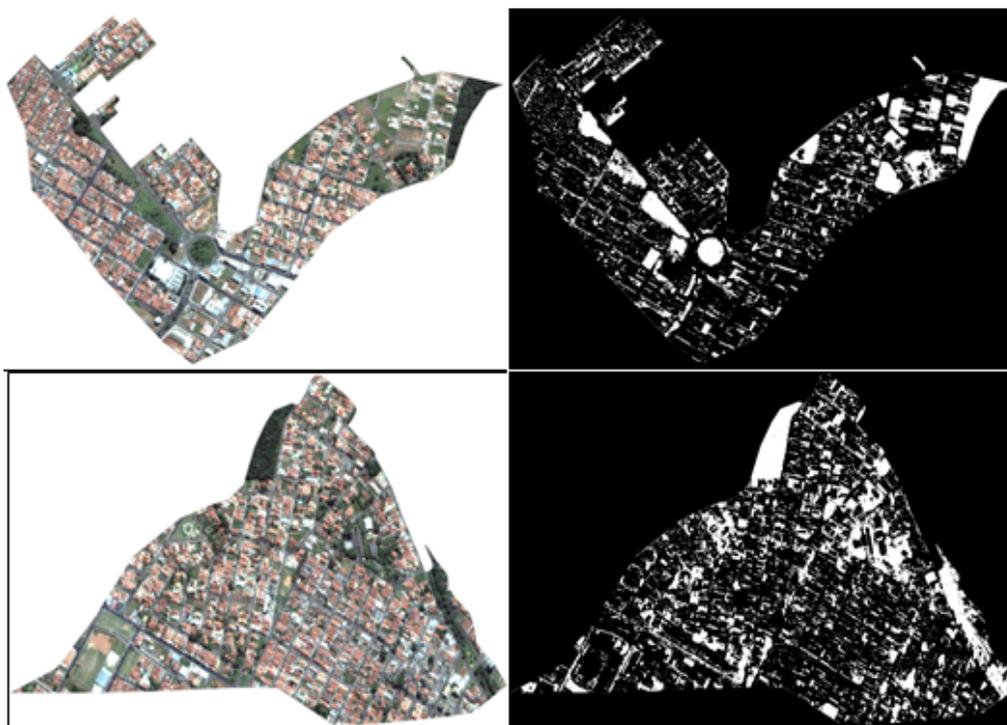


Figura 7. As sub-regiões estabelecidas a partir dos critérios descritos.

Para cada sub-região, foi realizado individualmente o mesmo método de processamento da imagem (Figura 8), aplicado na determinação da área impermeável e permeável indicado anteriormente.



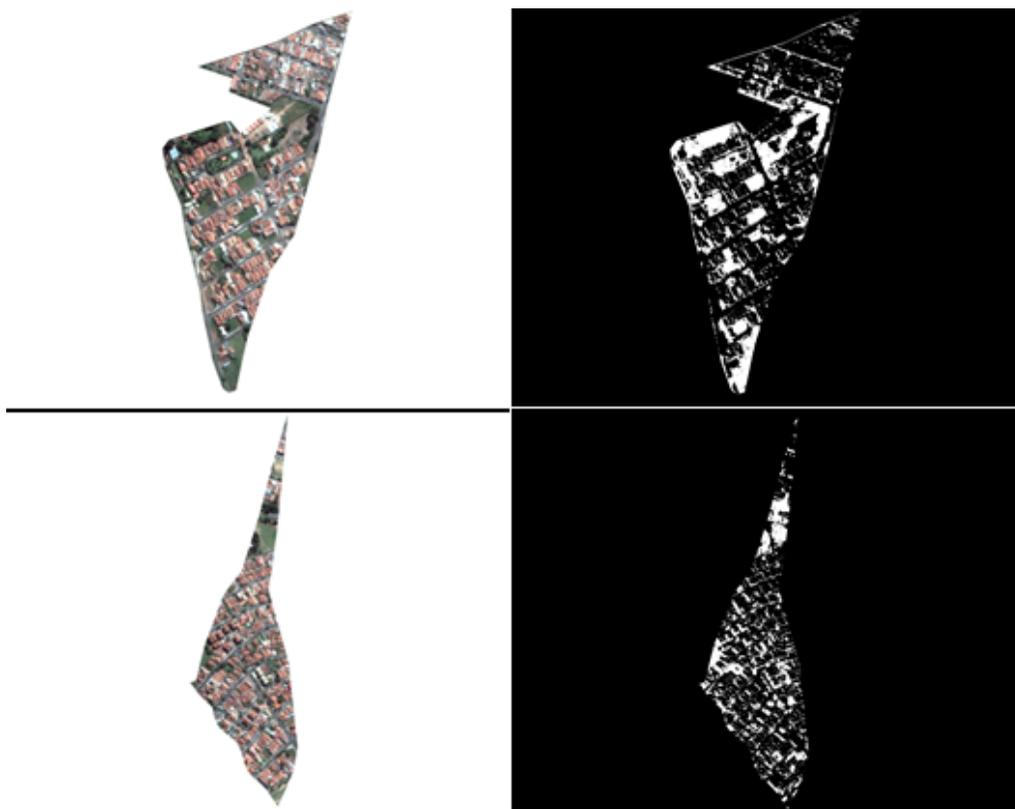


Figura 8. Processamento das imagens de satélite para cada sub-região. À esquerda, o recorte da sub-região antes do processamento, e à direita a classificação após a aplicação do índice NandA e do threshold.

Os valores obtidos são apresentados na tabela a seguir (Tabela 1), juntamente com a determinação do First Flush (P) individual para cada sub-região, o volume total de água a ser retido para a melhoria da qualidade das águas pluviais (VQv), as estimativas de área e quanto em porcentagem isso ocuparia em cada sub-região.

Região	Área total (m <sup>2</sup> )	Área impermeável (m <sup>2</sup> )	Percentual de área impermeável	First Flush (P em mm)	WQv	Área necessária aproximada (m <sup>2</sup> )	Porcentagem em relação à sub-região
1	205400	155400.2	0.76	25.04	3758.8	4176.4	2.03
2	740800	537971.5	0.73	23.61	12306.5	13673.9	1.85
3	154800	112829.8	0.73	23.73	2593.7	2881.9	1.86
4	165200	115319.2	0.70	22.37	2506.7	2785.2	1.69
5	348700	263817.2	0.76	25.04	6381.1	7090.2	2.03

Tabela 1. Dados de Área, First Flush e WQv para as sub-regiões determinadas.

Definidas e caracterizadas as sub-regiões, teve início o processo de priorização de áreas para a implantação dos sistemas de tratamento. Foram obtidos dados, através do site Wikimapia (2013), associados a informações do Google Street View (2013), de atividades realizadas na bacia que poderiam ser consideradas como potencialmente poluidoras da água pluvial. Na área urbana considerada de forma geral, foram encontradas 20 atividades, distribuídas em centros automotivos (6), estacionamentos (5), postos de combustível (2), lava-rápido (2), indústrias (2) e empresas (3) (Figura 9). Ocorreu maior concentração dessas atividades na sub-região 5 (Via de grande circulação, Avenida Miguel Petroni), considerada então prioritária para a implantação dos sistemas de tratamento. Dadas a ausência de critério maior relacionado às atividades, a existência de áreas para a implantação do sistema em todas as sub-regiões e a proporção da área urbana considerada como área de estudo já ter sido previamente selecionada englobando áreas menores, serão indicados tratamentos para todas as sub-regiões.

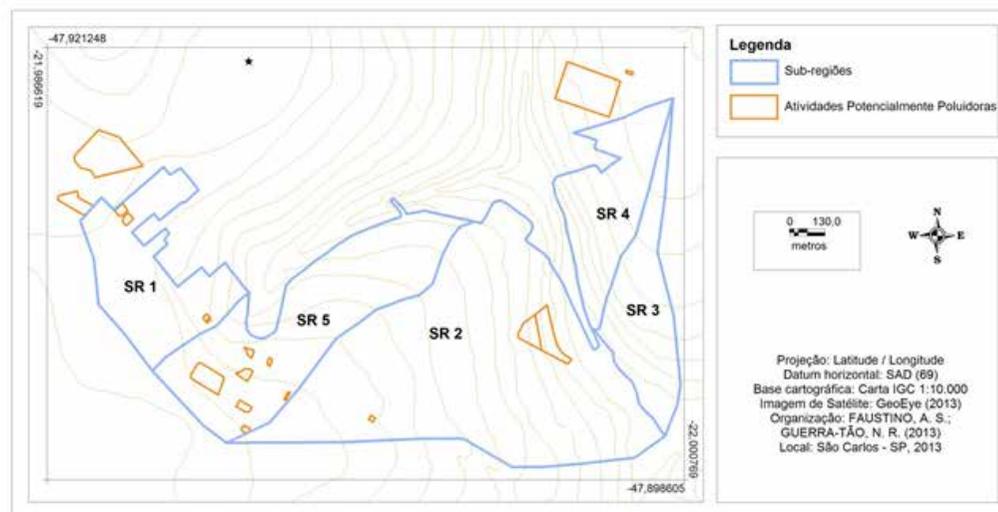


Figura 9. Mapa com a identificação das principais atividades potencialmente poluidoras dentro de cada sub-região.

Baseando-se na definição das sub-regiões, iniciou-se o processo de busca por áreas adequadas à construção do sistema de tratamento. Elaborou-se um mapa de declividade da bacia (Figura 10) por conta da restrição apontada pela literatura de que os sistemas não devem ser implantados em áreas com mais de 8% de declividade.

Levou-se em conta que áreas públicas disponíveis para o sistema são mais adequadas, pois a escolha de áreas particulares implicaria em processos de desapropriação, e a escolha de áreas de vegetação natural resultaria em perdas ambientais provavelmente maiores do que os ganhos com o desenvolvimento do sistema. Portanto, consultou-se o Sistema de Informações Geográficas de São Carlos (SIGA São Carlos) para verificar quais terrenos eram classificados como "áreas públicas municipais, estaduais ou federais para fins de recreio ou institucional", sendo estas áreas prioritárias para a implantação do sistema. Além desses critérios, considerou-se a proximidade das áreas disponíveis com os corpos hídricos e principalmente com o exutório, para aproveitar ao máximo a estrutura de drenagem natural da bacia e dispensar investimentos com sistemas de bombeamento. Sendo o critério de áreas públicas a prioridade nesta escolha, mesmo que o espaço encontrado estivesse em uma região com declividade maior do que o limite adotado, considerou-se a aplicação de terraplanagem. As áreas encontradas para a implantação do sistema em cada sub-região estão indicadas na Figura 10.

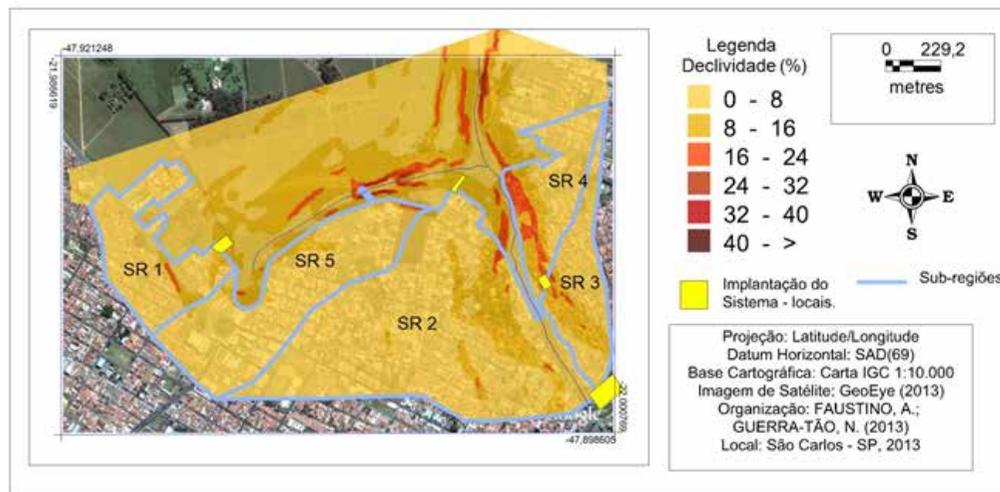


Figura 10. Mapa de declividade em % associado aos terrenos propícios à implantação dos sistemas em cada sub-região.

Uma consideração deve ser feita quanto à escolha da área para a sub-região 3, que é o Cartódromo, localizado no bairro Jardim Nova Santa Paula, um local já utilizado para o lazer da população focado na realização de atividades físicas, pois dispõe de pistas para caminhadas. Porém, este local também apresenta áreas cobertas por gramado que podem ser aproveitadas para a implantação da wetland, considerando que a junção destes dois usos na mesma área é viável dado o caráter paisagístico que wetlands possuem. A mesma área do Cartódromo apresenta capacidade para alocação de lagoas além da necessidade da sub-região 3, e por isso a área disponível será destinada a tratar o excedente de First Flush existente na sub-região 4, evitando assim o uso de reservatórios para conter o volume nestas duas sub-regiões. Dada a importância dessa área, foi desenvolvida e aplicada uma proposta de wetland visualmente, onde os locais das lagoas foram escolhidos de acordo com os cálculos realizados, respeitando-se bordas e áreas de recreação já existentes no local. A ideia é que todas as outras áreas propostas neste trabalho tenham suas wetlands concebidas a partir dos mesmos princípios de interligação entre a proposta teórica e sua aplicação com benefícios paisagísticos à população local, com base na ideia desenvolvida para o Cartódromo (Figura 11).

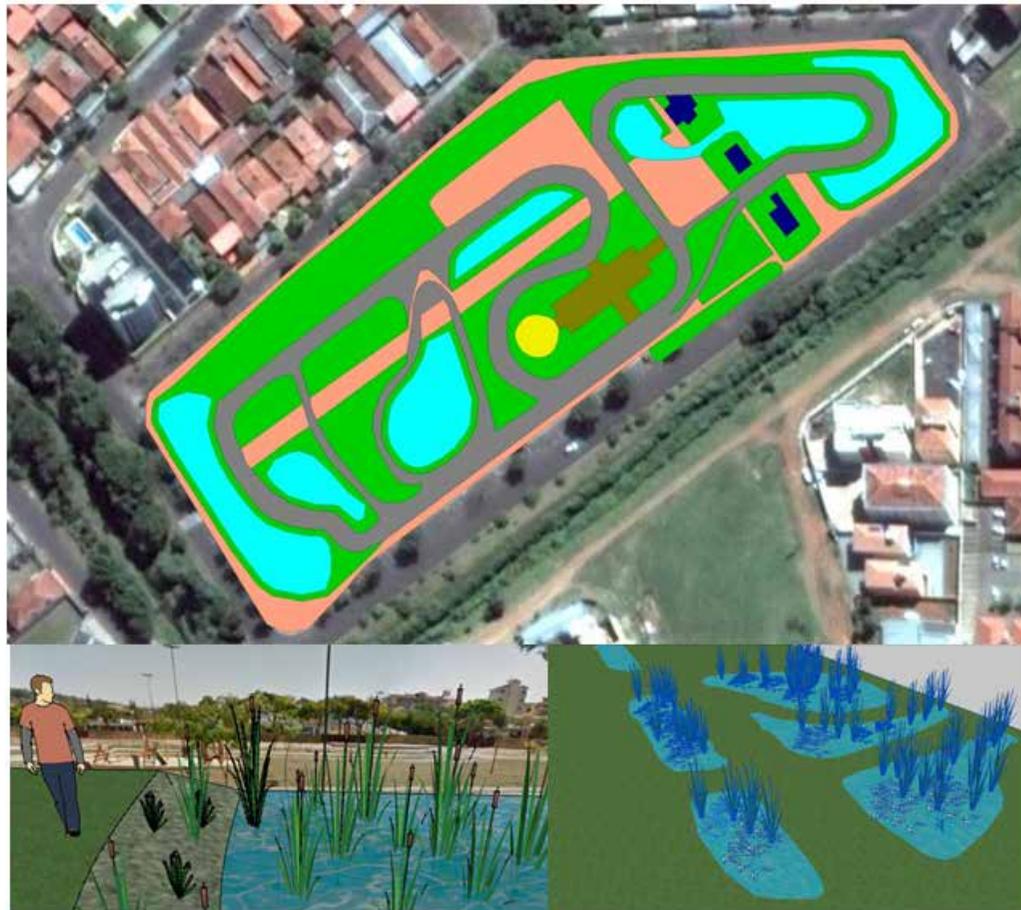


Figura 11. Ilustração da ação proposta para o Cartódromo que servirá como base.

Não foram identificadas áreas disponíveis para a sub-região 2, e com isso buscaram-se outras áreas localizadas além dos limites da bacia, porém próximas às regiões do exutório. Duas áreas contíguas, localizadas a 500 m do exutório seguindo a Avenida Francisco Pereira Lopes, foram identificadas como viáveis para a instalação dos sistemas, de modo que o First Flush da sub-região 2 será direcionado para tais áreas, destacando-se a necessidade de construção de um sistema de tubulação que conduza o material.

Com base na literatura consultada, determinou-se que o sistema mais adequado seria o de wetland com detenção estendida, considerando sua indicação para projetar sistemas que ocupem uma área menor e que realizem o tratamento do First Flush produzido por bacia com área maior do que 10 ha, o que se adequa às sub-regiões encontradas. Seguindo as especificações de projetos com esta modalidade de wetland apontadas em

Tomaz (2009), a partir do volume total identificado para o tratamento em cada sub-região, foi estimada a quantidade de água em m<sup>3</sup> representada em cada uma das estruturas da wetland, considerando a presença de: lagoa de pré-tratamento, lagoas fundas, lagoas rasas e de um volume variável. Como estas estruturas apresentam especificações diferentes, o volume envolvido em cada uma ocupa uma área superficial diferente, e a partir das contribuições individuais chegou-se na área total necessária para implantar o sistema de wetland (Tabela 2). Como as áreas disponíveis para as sub-regiões 1, 2, e 5 são menores do que a área necessária de wetlands para tratar o volume de First Flush existente em tais sub-regiões, foi proposto o uso de um reservatório alocado antes do sistema para conter parte do volume e liberá-lo aos poucos nas wetlands, reduzindo assim a quantidade de área ocupada pelas lagoas. O dimensionamento do reservatório envolveu um ajuste da área por ele ocupada (percentual da área disponível) e da sua altura (em metros), até que suas dimensões estivessem ajustadas segundo a necessidade de área a ser compensada (Tabela 3).

Região	Volume do pré-tratamento (m <sup>3</sup> )	Volume parte funda (m <sup>3</sup> )	Volume parte rasa (m <sup>3</sup> )	Volume variável (m <sup>3</sup> )	Área do pré-tratamento (m <sup>2</sup> )	Área parte funda (m <sup>2</sup> )	Área parte rasa (m <sup>2</sup> )	Área variável (m <sup>2</sup> )	Área total do sistema (m <sup>2</sup> )	Área disponível (m <sup>2</sup> )
1	302	680	680	1360	101	378	1511	1511	3502	3679
2	707	1590	1590	3181	236	884	3534	3534	8188	8730
3	259	584	584	1167	86	324	1297	1297	3004	4059.5
4	251	564	564	1128	84	313	1253	1253	2904	2152
5	129	289	289	578	43	161	643	643	1489	1568

Tabela 2. Dimensionamento dos sistemas de tratamento para cada sub-região a partir do volume WQv obtido na Tabela 1, considerando o uso de reservatórios para as sub-regiões 1, 2 e 5.

Região	Área disponível (m <sup>2</sup> )	Percentual de área para reservatório	Altura do reservatório (m)	Volume em reservatório (m <sup>3</sup> )
1	3679	0.1	2	735.8
2	8730	0.2	3	5238
3	4059.5	NA	NA	NA
4	2152	NA	NA	NA
5	1568	0.5	6.5	5096

Tabela 3. Dimensionamento dos reservatórios a partir da área disponível para o sistema.

\*Sub-regiões em que não há necessidade de reservatórios.

Os custos de um projeto de sistemas de wetlands construídos variam primeiramente em função do tipo de sistema escolhido, sendo necessário considerar que cada caso apresentará uma necessidade específica e, portanto, terá um projeto de sistema distinto. Em segundo lugar, existem as características do local destinado à construção, que pode necessitar de ajustes quanto à declividade, fornecer ou não um substrato adequado ao sistema (como solos argilosos que auxiliam na impermeabilização), apresentar ou não plantas possíveis de serem utilizadas etc. Sendo assim, existe uma grande variabilidade nos custos envolvidos com a construção destes sistemas, e deve ser realizada uma análise mais profunda quanto à viabilidade dos projetos considerando os custos envolvidos. De modo geral, pesquisas indicam que os custos de implantação destes sistemas podem ser de 50% a 90% menores do que os sistemas convencionais, sendo os custos operacionais muito baixos (NSFC, 2005 apud SILVA, 2007). A Tabela 4 apresenta os custos para construção de wetlands destinadas ao tratamento de esgotos em Iowa, nos Estados Unidos (SAUER; KIMBER, 2001 apud SILVA, 2007).

Localização	População atendida (hab)	Custo da wetland (US\$)	Área da wetland (ha)	Custo/ha (US\$)	Ano de construção
Agencia	616	30000	1.42	21127	1994
Chelsea	336	20000	0.11	181818	1990
Dows	660	53000	0.93	57205	1991
Cidade de Iowa	60.148	25000	0.22	113636	1998-99
Motel Vista Lago	variável	23000	0.36	63889	1997
Burr Oak	< 100	38000	0.1	380000	1993
AIMU - Associação Municipal de utilidade Iowa	variável	18000	0.06	300000	1999

Tabela 4. Estimativa de custos para alguns sistemas de wetlands nos EUA.

Tomando como referência o custo da wetland para a cidade de Iowa (Tabela 4), pois se trata de uma cidade, e apresenta uma maior população, o valor corrigido considerando o dólar da época apontaria para um custo de R\$ 127.272/ha para construir o sistema. Aplicado a este estudo (com ocupação de área total das wetlands de 1,91 ha), o custo estimado para a execução do projeto proposto neste trabalho seria de R\$ 243.090.

Para a elaboração do sistema para ocupação urbana futura, o processo teve início com a consulta à Lei Municipal 13.691 de 25 de novembro de 2005, o Plano Diretor de São Carlos, dentro do capítulo III (da Ocupação do Solo) em sua seção III (dos Coeficientes de Permeabilidade), onde se verificou que a região da bacia destinada à expansão urbana é classificada como Zona de Regulação e Ocupação Controlada dentro do zoneamento, e para estas zonas o coeficiente de permeabilidade deverá ser de 20%. Não se aplica a essas regiões o coeficiente de cobertura vegetal, que contribuiria para o aumento de áreas permeáveis igualmente. Com isso, a legislação não exige das novas áreas a serem construídas uma maior permeabilidade do solo, elemento fundamental para reduzir o volume de First Flush gerado, pois em todas as sub-regiões estudadas se encontrou uma permeabilidade superior

a 20%, em alguns casos chegando a 30%. Entretanto, deve-se considerar que os vazios urbanos contribuem significativamente para o aumento da permeabilidade nas regiões atualmente, sendo necessário um estudo mais aprofundado que indique qual a real permeabilidade encontrada quando estas áreas estiverem ocupadas.

Para o projeto de expansão de novos bairros, é necessário que se considerem alguns aspectos mais relevantes quanto à gestão de água de drenagem pluvial. Quanto ao percentual de áreas permeáveis, Silveira e Oliveira (2013) realizaram um estudo em diversas cidades brasileiras para avaliar qual seria o mínimo de área permeável necessária em cada terreno para que possa ser aplicado um conceito de sustentabilidade à proposta, sendo que os autores estimaram em 25% essa permeabilidade mínima. Assim como exposto neste projeto, recomenda-se que os sistemas sejam projetados seguindo a lógica da gestão descentralizada, ou seja, buscar que as unidades de tratamento sejam estruturadas considerando a maior subdivisão da bacia possível, criando deste modo sistemas cada vez mais independentes e que necessitem de áreas menores para desempenhar sua função. Essa lógica também deve ser aplicada no desenvolvimento do próprio sistema de coleta e drenagem das águas pluviais, que impreterivelmente deverá ser projetado de forma a complementar as necessidades do sistema de tratamento. É necessário ainda aproveitar o potencial paisagístico existente nos sistemas de wetlands, sem tornar a alocação do sistema uma perda de áreas públicas para a realização de um tratamento, mas fazendo com que este espaço seja caracterizado também como uma área de lazer.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Evidencia-se no First Flush sua alta capacidade de degradação dos ecossistemas aquáticos dada a sua composição final ao carrear os materiais depositados sobre a bacia hidrográfica, fato que é potencializado em função do processo de urbanização e terá aspectos variando de local para local por conta das diferentes atividades humanas que se desenvolvem sobre este território, determinantes da composição final do First Flush.

Destaca-se, sobretudo, com este trabalho a importância da implantação de sistemas que deem um manejo adequado às águas pluviais, potencialmente poluidoras e que não são comumente levadas à pauta seriamente nas ações ambientais governamentais. Salienta-se, com o trabalho apresentado, que a aplicação de tais sistemas é viável, principalmente se for considerada de forma descentralizada, que o espaço utilizado é reduzido e que um bom planejamento dos locais pode levar a uma redução substancial de custos

para a implantação. Considera-se também que os benefícios da aplicação do sistema não se limitam à questão ambiental e de qualidade das águas, mas que o sistema também pode oferecer uma opção de local de contemplação e lazer em espaços públicos, sem emitir odores ou causar quaisquer danos à qualidade de vida da população local, trazendo sim muitos ganhos.

O desenvolvimento sustentável com o passar do tempo não deve apenas se atrelar a atitudes pontuais e comuns, como reciclagem, plantio de mudas, entre outras, mas sim continuar melhorando continuamente e incluindo em suas atividades novas tecnologias e ideais, como as consideradas no presente estudo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERS, R.; JORGE, K. D. Descentralização da gestão da água: por que os comitês de bacia estão sendo criados? **Ambiente e Sociedade**, v. 8, n. 2, jul./dez. 2005.

AKAN, A. O.; HOUGHTALEN, R. J. **Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality**: Engineering Applications and Computer Modeling. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

AMARAL, R. O. M. **Avaliação de soluções naturais para o tratamento de excedentes poluídos de sistemas de águas residuais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Técnica de Lisboa, 2011.

DOYLE, K. C. **Sizing the first flush and its effects on the storage-reliability-yield behavior of rainwater harvesting in Rwanda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Massachusetts Institute of Technology, Villanova University, 2008.

GIKAS, G. D.; TSIHRINTZIS, V. A. Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. **Journal of Hydrology**, v. 466, p. 115-126, 2012.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment Wetlands**. 2 ed. Nova York: Taylor and Francis Group, 2009.

MONTEIRO, R. C. M. **Viabilidade técnica do emprego de sistemas tipo “wetlands” para tratamento de água cinza visando o reuso não potável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

POLIDORIO, A. M. **Detecção de elementos da paisagem urbana em imagens aéreas multiespectrais**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. I. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, 2008.

PRODANOFF, J. H. A. **Avaliação da poluição difusa gerada por enxurradas em meio urbano**. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 6 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010.

SÃO CARLOS. Lei nº 13.691 de 25 de novembro de 2005. **Plano Diretor do Município de São Carlos**. Capítulo III, Seção III, p. 47, 2005.

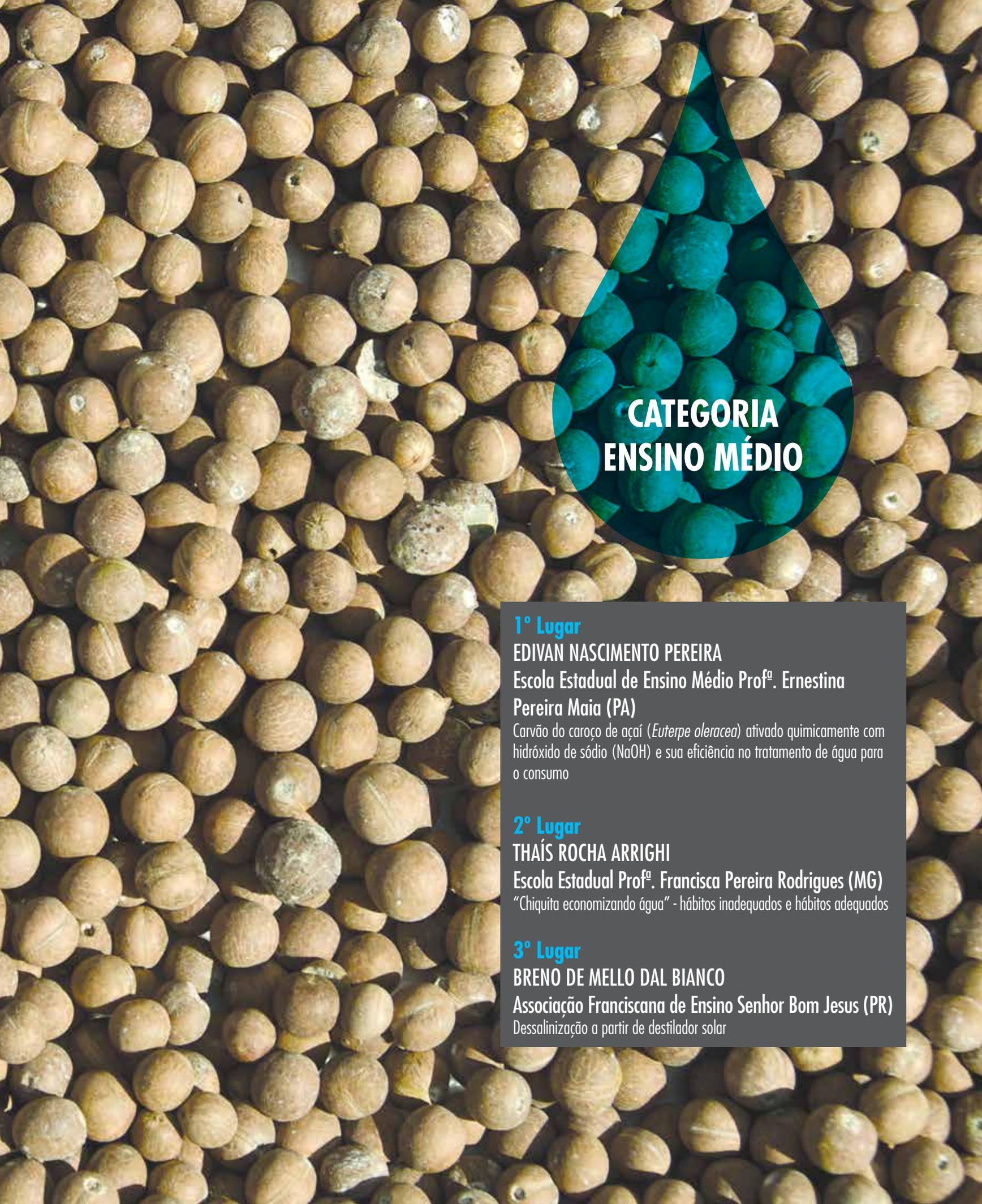
SILVA, S. C. da. **“Wetlands construídos” de fluxo vertical com meio suporte em solo natural modificado no tratamento de esgotos domésticos**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SILVEIRA, S.; OLIVEIRA, F. Minimum Permeable Soil Area in Sustainable Allotment. J. **Urban Plann. Dev.**, 2013.

TOMAZ, P. **Curso de manejo de águas pluviais**: Capítulo 59 – Wetland construída para melhoria da qualidade das águas pluviais. 2009. Disponível em: <[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo59\\_wetland.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo59_wetland.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2013.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, 2008.





## CATEGORIA ENSINO MÉDIO

### 1º Lugar

**EDIVAN NASCIMENTO PEREIRA**

Escola Estadual de Ensino Médio Prof<sup>a</sup>. Ernestina  
Pereira Maia (PA)

Carvão do caroço de açaí (*Euterpe oleracea*) ativado quimicamente com hidróxido de sódio (NaOH) e sua eficiência no tratamento de água para o consumo

### 2º Lugar

**THAÍS ROCHA ARRIGHI**

Escola Estadual Prof<sup>a</sup>. Francisca Pereira Rodrigues (MG)

“Chiquita economizando água” - hábitos inadequados e hábitos adequados

### 3º Lugar

**BRENO DE MELLO DAL BIANCO**

Associação Franciscana de Ensino Senhor Bom Jesus (PR)

Dessalinização a partir de destilador solar

1º

LUGAR

CATEGORIA  
ENSINO MÉDIO



**Edivan Nascimento Pereira, 19 anos**

**Escola Estadual de E. M. Profª. Ernestina Pereira Maia  
Moju - PA**

## **CARVÃO DO CAROÇO DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*) ATIVADO QUIMICAMENTE COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH) E SUA EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA O CONSUMO**

### **RESUMO**

O consumo de água nos bairros periféricos da cidade de Moju/PA realiza-se diretamente da torneira, sem o tratamento adequado. Dessa forma, a pesquisa teve como objetivo produzir carvão ativado com o caroço de açaí para ser utilizado em velas de filtro simples ajudando no processo de tratamento da água para consumo. Assim, produziu-se o carvão pelo processo químico de ativação que envolveu duas fases principais: a impregnação de 2 kg do caroço de açaí em 2 litros de solução ativante em concentração comum de 40g/l de hidróxido de sódio (NaOH) e água; e, por conseguinte, o processo de pirólise da amostra em forno de barro para a ativação. Além disso, foram realizadas análises de parâmetros físico-químicos e microbiológicos em amostras de água tratadas com o carvão produzido e carvão industrializado. Observou-se que o carvão produzido reduziu significativamente os valores de todos os parâmetros analisados e está de acordo com o padrão de potabilidade da água estabelecido pelo Ministério da Saúde (2005). Concluiu-se que a utilização do novo carvão ativado é uma forma eficiente de tratamento da água para consumo humano, auxiliando na prevenção de inúmeras doenças e contribuindo para uma melhor qualidade de vida da população local.

Palavras-chave: caroço de açaí, processo químico, carvão ativado, tratamento de água.

## 1. INTRODUÇÃO

A água tem influência direta sobre a saúde, a qualidade de vida e o desenvolvimento do ser humano. É um dos elementos indispensáveis à sobrevivência, sendo uma das principais substâncias ingeridas pelo ser humano. A água doce corresponde a 1% de toda a água do planeta e, em seu estado natural, representa um dos componentes mais puro; porém, esta característica vem se alterando, e hoje ela é um importante veículo de transmissão de inúmeras doenças (CUBAS, 2010).

Para a Organização Mundial da Saúde (OMS), todas as pessoas em quaisquer estágios de desenvolvimento socioeconômico têm direito ao acesso a um suprimento adequado e seguro de água potável. Segundo a Organização Panamericana da Saúde (OPAS/2001), cerca de 80% das doenças que ocorrem em países em desenvolvimento são veiculadas pela água contaminada por micro-organismos patogênicos (OMS/2009). Isto se deve ao fato de apenas 30% da população mundial ter acesso a água tratada e os outros 70% terem poços como fonte de água, facilitando, assim, sua contaminação. Segundo dados do Ministério da Saúde (2004), no ano de 2004 foram registrados cerca de 2,4 milhões de casos de diarreia no Brasil, e considera-se que a água seja responsável por 60% das internações hospitalares por diarreia no país, sendo a grande maioria das vítimas crianças menores de cinco anos.

Constituindo uma necessidade absoluta para a vida, a água deve ter uma qualidade apropriada, livre de quaisquer organismos que possam causar enfermidades, de minerais e substâncias orgânicas que causem efeitos fisiológicos adversos. De acordo com a portaria nº. 518 do ano de 2004 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004), define-se como água para consumo humano aquela livre de *Escherichia Coli* ou Coliformes Totais, sendo recomendada sua ausência em 100 ml de água e com concentração reduzida de substâncias orgânicas e inorgânicas.

Em anos recentes, vários estudos relataram a produção de carvões ativados (CA) a partir de resíduos como sementes de frutas, bagaço de cana-de-açúcar, restos de couro, pneus etc. O carvão ativado (CA) é um material carbonáceo e poroso preparado pela carbonização e ativação de substâncias orgânicas, principalmente de origem vegetal. É utilizado extensamente para a adsorção de poluentes em fases gasosas e líquidas, como suporte para catalisadores, na purificação de vários compostos, no tratamento de efluentes (BRUM, 2007).

A utilização de carvões ativados como adsorventes data de milhares de anos, quando os egípcios, por volta de 1.550 a.C., empregavam o carvão de madeira para a purificação de água para fins medicinais. No entanto, em 3.750 a.C., este

já era utilizado na redução de cobre, zinco e estanho, na manufatura de bronze e também como combustível doméstico (CLAUDINO, 2003).

Um maior desenvolvimento de carvões ativados surgiu durante a Primeira Guerra Mundial, quando os carvões granulados eram utilizados em máscaras de gás. No entanto, foi nos últimos 50 anos que a tecnologia de produção de carvões ativados evoluiu significativamente (CUBAS, 2010).

O carvão ativado é vastamente utilizado em vários ramos da indústria. Uma das mais importantes aplicações é no tratamento de água, com o objetivo de adequá-la aos parâmetros de potabilidade exigidos para o consumo humano, visto que o carvão ativado através da sua porosidade tem a capacidade de purificar a água, seja para fins potáveis ou para fins industriais.

Assim, sua ação elimina cor, odor, mau gosto, e remove substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas na água através do mecanismo da adsorção (FERNANDES, 2010).

O consumo de água nos bairros periféricos da cidade de Moju/PA, bem como nas comunidades ribeirinhas próximas da cidade, é realizado, em sua maioria, diretamente da torneira sem o tratamento adequado, mediante uma simples filtração, sem nenhuma preocupação com os riscos que o consumo de água não tratada pode ocasionar à saúde.

Por outro lado, o município de Moju é um dos principais municípios do Baixo Tocantins produtores de açaí (*Euterpe oleracea*), com safra estimada em 200 ton./mês (TEXEIRA et al., 2006). Entretanto, o resíduo gerado com o beneficiamento do fruto, que são a casca e o caroço, é tido como lixo e por isso é desperdiçado nas feiras livres da cidade e amontoados em sacas pelas ruas da mesma, visto que no município não há nenhuma política pública para o aproveitamento desse resíduo.

Diante da problemática apresentada, a presente pesquisa teve o objetivo de produzir carvão ativado a partir do reaproveitamento do caroço de açaí por meio do processo químico de ativação com a finalidade de utilizá-lo como material filtrante da água para o consumo.

## 1.1 HIPÓTESES

A utilização do carvão ativado produzido com o caroço de açaí em velas de filtro simples é uma forma eficiente de tratamento de água.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Produzir carvão ativado a partir do caroço de açaí a fim de utilizá-lo no tratamento de água para o consumo.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar qualitativamente a água consumida pela amostra em estudo;
- Verificar as formas de tratamento da água realizadas pela amostra em estudo;
- Fazer a ativação do carvão pelo processo químico de ativação com o Hidróxido de Sódio (NaOH);
- Realizar análises de parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água antes e depois do tratamento com o carvão ativado produzido;
- Comparar a eficiência do carvão ativado produzido com o carvão ativado industrializado;
- Mostrar mais uma maneira de reaproveitamento do caroço de açaí.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CAROÇO DE AÇAÍ

O açaí é uma das frutas de maior valor socioeconômico-cultural para a população da região amazônica, especialmente a população paraense. Entretanto, o seu principal produto é o fruto, de onde se extrai o “vinho do açaí”, que para muitas famílias é o alimento principal do dia a dia. O seu fruto é arredondado de 1 a 2 cm de diâmetro, com peso médio de 0,8 a 2,3g; seu epicarpo é de cor violácea-púrpura quase negra e muito fino, e tem apenas 1 a 2 mm de espessura. O epicarpo e o mesocarpo constituem a parte comestível do fruto (TEXEIRA et al., 2006).

O caroço do açaí constitui cerca de 83% do fruto e é formado por um pequeno endosperma sólido ligado a um tingimento que na maturidade é rico em celulose, heme celulose e cristais de insulina; antes, é rico em lipídios. Possui ainda epicarpo fibroso, rico em sílica e um endocarpo pouco lenhoso.

Segundo Texeira et al. (2006, p. 21), o caroço do açaí é uma fonte rica em carbono, apresentando teor acima de 48%. Isso faz com que esse resíduo seja bastante utilizado como ingrediente na compostagem ou na produção de adubo orgânico.

Pará é um dos estados líderes no plantio e na produção de açaí. O seu beneficiamento gera anualmente 93.521 toneladas de caroço. Na tabela abaixo, apresenta-se a produção anual de açaí por município no estado.

Tabela 1. Locais de maior produção de açaí no Pará.

Município	Quantidade (ton./ano)
Cametá	34.987
Limoeiro do Ajuru	15.254
Ponto de Pedras	10.600
Igarapé-Miri	9.000
Abaetetuba	8.500
Moju	2.800

Fonte: IBGE- Produção extrativista vegetal, anuário 2000.

O resíduo restante do processo de beneficiamento do açaí, como caroço é um material de difícil decomposição em virtude de apresentar alto teor de lignina. Esse teor oscila de 11,5% a 24% (TEXEIRA et al., 2006). Assim, o caroço de açaí pode se tornar um problema ambiental.

## 2.2 CARVÃO ATIVADO (CA)

O carvão ativado (CA) é uma substância carbonácea inerte, obtida geralmente de substâncias com alto teor de carbono, como osso, casca de coco, sementes e casca de fruta, madeira, carvão mineral e polímeros sintéticos (CLAUDINO, 2003).

Segundo Claudino (2003), carvão ativo ou carvão poroso é o nome dado a materiais carbonáceos que possuem grande capacidade de adsorção, conferida pelo elevado volume dos poros, e, portanto, elevada área específica. Assim, a área específica dos carvões ativados pode variar entre 500 e 3000 m<sup>2</sup>/g dependendo do tamanho e da distribuição dos poros no material.

Durante a ativação, a área superficial aumenta com a oxidação dos átomos de carbono, podendo o carvão apresentar área superficial superior a 3000 m<sup>2</sup>/g, após passar pelo processo de ativação (FERNANDES, 2010).

### 2.2.1 Características do carvão ativado

O carvão ativado é um material carbono, de alta porosidade e com alta área superficial interna, e essas características lhe oferecem a propriedade de alta adsorção (FERNANDES, 2010). Conforme Claudino (2003), o carvão ativado é um excelente adsorvente, com alta capacidade de adsorção, muito usado para

purificar, desintoxicar, desodorizar, filtrar, descolorir, declorificar e remover uma gama de materiais líquidos e gasosos.

As características mais importantes dos carvões ativados são área superficial, estrutura dos poros, propriedades eletroforéticas e acidez superficial. Essas características dependem da fonte do carvão ativado e dos métodos de ativação (FERNANDES, 2010).

### 2.2.2 Produção de carvão ativado

Cerca de 400.000 toneladas de carvão ativado são produzidas anualmente no mundo. Essas toneladas são obtidas a partir de um milhão de toneladas precursoras diferentes. O carvão ativado pode ser encontrado comercialmente na forma granular (CAG) e na forma física pulverizada (CAP) (FERNANDES, 2010).

Os carvões ativados granulados e pulverizados são utilizados para a adsorção tanto em correntes líquidas quanto gasosas. Para se obter máxima eficiência do uso do carvão ativado granulado, recomenda-se observar as condições de projeto de filtro (MULLER, 2008).

No Brasil, os precursores mais utilizados na produção de carvão ativado são madeira, osso, casca de coco e carvão betuminoso e sub-betuminoso. No processo de produção do carvão ativado, a matéria-prima é submetida aos processos de carbonização e ativação (FERNANDES, 2010).

De acordo com Cubas (2010), a carbonização consiste na pirólise do material precursor na ausência de ar em temperatura superior a 473K. Nesta etapa, são removidos os compostos voláteis e gases leves como CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, e é produzida uma massa de carbono fixo e uma estrutura porosa primária que posteriormente irá a ativação. A taxa de aquecimento, a temperatura final, o fluxo de gás de arraste e a natureza de matéria-prima são parâmetros importantes que irão determinar a qualidade e o rendimento do carvão ativado.

Conforme Brum (2007), a ativação visa o aumento da área superficial de carvão, proporcionando, desse modo, o aumento da sua porosidade. O propósito do processo de ativação é o controle das características básicas do material, como distribuição de poros, áreas superficiais específicas, resistência mecânica etc.

O processo de ativação pode ser de forma química ou física:

- Ativação química: consiste na impregnação de agentes ativantes como Cloreto de Zinco (ZnCl<sub>2</sub>), Ácido Fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), Hidróxido de Sódio (NaOH) etc. no material não carbonizado, onde estes agentes

proporcionarão a formação de ligações cruzadas, tornando o material menos propenso a volatilização quando aquecido a temperatura elevada (FERNANDES, 2010).

- Ativação física: consiste na reação do carvão com vapores de água, CO<sub>2</sub> ou uma mistura de gases após a carbonização. Para tanto, os gases são injetados na estrutura do carvão (FERNANDES, 2010).

Após a produção, os grãos do carvão podem apresentar diferentes poros. Estes são definidos segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) em: mesoporos, com diâmetro entre 2 e 50nm; microporos secundários, apresentando diâmetro entre 0,8 e 2nm; e microporos primários, apresentando diâmetro menor que 0,8nm (CLAUDINO, 2013).

### 2.2.3 Uso de carvão ativado no tratamento de água

O tratamento de água para o abastecimento público é um conjunto de processos e operações com o objetivo de adequar as características físico-químicas e biológicas da água bruta, visando consumo humano (CUBAS, 2010).

A água é a substância líquida mais consumida pelo ser humano e constitui, nele, cerca de 70%. Assim, é uma necessidade absoluta para a sobrevivência de qualquer ser vivo. Para a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2009), a água tem influência direta na promoção da saúde e da qualidade de vida do ser humano; dessa forma, todas as pessoas em qualquer estágio de desenvolvimento socioeconômico têm direito de ter acesso a um suprimento adequado e seguro de água potável.

Dessa forma, a água apropriada para o consumo humano deve ser livre de quaisquer organismos que possam causar enfermidades e de substâncias orgânicas e inorgânicas que causem efeitos fisiológicos adversos no organismo. Água potável, segundo a Portaria nº 2914 de 12 dezembro de 2011 do Ministério da Saúde, deve estar em conformidade com o padrão microbiológico da água para consumo humano, como apresentado na tabela abaixo:

Tabela 2. Padrão microbiológico da potabilidade da água.

Parâmetros	VMP
<b>Água para consumo humano</b>	
Escherichia Coli ou Coliformes Totais	Ausência 100 ml
<b>Água na saída do tratamento</b>	
Coliformes Totais	Ausência 100 ml

Fonte: Ministério da Saúde (Portaria nº 2914, 2011).

Segundo Cubas (2010), a maioria das substâncias causadoras de sabor, cor, odor, mutagenicidade e toxicidade como agroquímicos, geosmina, MIB e cianotoxina em geral, pode ser adsorvida em carvão ativado. Entretanto, não se pode afirmar que qualquer tipo de carvão ativado irá adsorver qualquer substância orgânica indesejável na água.

A adsorção em carvão ativado tem sido usada como etapa complementar ao tratamento de água convencional. É um dos adsorventes mais eficientes. Existem basicamente duas formas físicas de carvão ativado: carvão ativado pulverizado (CAP) e carvão ativado granular (CAG) (FERNANDES, 2010). Conforme Claudino (2003), a aplicação de carvão ativado pulverizado (CAP) diretamente para o tratamento de água é a melhor alternativa para remoção de compostos orgânicos causadores de gosto, cor e odor na água. Já a aplicação do carvão ativado granular (CAG) é recomendada após a filtração ou como meio filtrante da água.

A utilização de carvões ativados no processo de tratamento da água data de milhares de anos, quando os egípcios, por volta de 1550 a.C., empregavam o carvão de madeira para a purificação da água para fins medicinais e de potabilidade (CLAUDINO, 2003).

## 2.3 HIDRÓXIDO DE SÓDIO

O hidróxido de sódio, ou soda cáustica, é um sólido branco, muito higroscópico, inorgânico, comercializado na forma de escamas, pó, perolas e micropérolas. Apresenta massa específica de 2,12g/ml, ponto de fusão de 318,4°C e ponto de ebulição de 1390°C (SILVA, 2012).

De acordo com Silva (2012), o hidróxido de sódio que tem a fórmula química NaOH e uma típica base de Arrhenius, quando dissociado em água, libera hidroxila (OH). A soda cáustica, do latim *causticus*, que significa queimar, é uma base forte com alto poder corrosivo, podendo causar graves queimaduras em contato com a pele.

A fabricação do hidróxido de sódio é de extrema importância para diversos segmentos da indústria. Esta base é considerada como uma das mais importantes, pois, além de ser usada para a produção de tecidos e papel, participa como insumo na fabricação de diversos produtos (SILVA, 2012).

O uso das soluções de NaOH data do século XVIII, porém o pioneirismo da fabricação industrial do hidróxido de sódio sólido comercial é atribuído ao processo Leblanc. O químico francês Nicolas Leblanc (1742-1806) é o inventor do processo de fabricação da soda cáustica a partir do sal marinho. Sua invenção foi feita

em decorrência de um concurso nacional patrocinado pela Academia Real das Ciências da França, em 1781. Na época, a França importava 2/3 das matérias-primas para a fabricação dos álcalis. Este processo consiste na calcinação do carvão e sulfato de sódio, obtidos a partir da reação de cloreto de sódio com ácido sulfúrico e calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), resultando na produção de carbonato de sódio, industrialmente conhecido como barrilhas. Por conseguinte, o hidróxido de sódio é então obtido mediante uma caustificação pela cal, que só é possível devido ao fato de o carbonato de cálcio ser praticamente insolúvel em água (SILVA, 2012).

O hidróxido de sódio vem sendo muito utilizado como agente químico ativante na produção de carvão ativado. Na ativação química, o precursor é impregnado com agente ativador. Este agente químico ativante tem a capacidade desidratante que influencia na decomposição por pirólise, inibindo a formação de betuminosos no interior dos poros, contribuindo assim para o desenvolvimento de microporos, mesoporos e macroporos (CUBAS, 2010).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 PESQUISAS BIBLIOGRÁFICAS

A presente pesquisa iniciou-se em 13/01/2012, e foi concluída no segundo bimestre do mesmo ano em 22/10/2012. A pesquisa foi iniciada com a revisão bibliográfica em livros de literatura específica, artigos e revistas, bem como pesquisa realizada na internet. Esta primeira etapa da pesquisa foi realizada na biblioteca e laboratório de informática do Centro de Pesquisa e Apoio ao Desenvolvimento da Educação Matemática e Científica – CPADC (Clube de Ciências de Abaetetuba), e com a utilização do acervo do Grupo Pedagógico de Apoio ao Desenvolvimento Científico de Moju – GPADC (Clube de Ciência de Moju).

#### 3.2 PESQUISAS DE CAMPO

Seguidamente, aconteceu a pesquisa de campo. Nesta etapa, foi realizada a aplicação de 100 (cem) formulários à população do bairro da periferia do município de Moju/PA, no caso o bairro Parolândia, formulários estes contendo perguntas acerca da qualidade da água para abastecimento da população e das formas de tratamento realizadas. O bairro Parolândia localiza-se na zona leste da cidade de Moju/PA, cuja população é sempre acometida por inúmeras doenças veiculadas à água contaminada, salientando que o referido bairro é carente de infraestrutura e saneamento básico.

### 3.3 PESQUISA EXPERIMENTAL

#### 3.3.1 Produção de carvão ativado do caroço de açaí

Foram coletados 2 kg de caroço de açaí em feiras públicas da cidade de Moju. A amostra coletada, por apresentar resíduo do processo de beneficiamentos para obtenção do vinho do açaí, foi lavada em água corrente e posteriormente secada (desidratada) em estufa com temperatura de 50°C por 5 horas.

Para ativação química, primeiramente foi preparada a solução ativante. Dessa forma, pesaram-se 80g do agente ativante Hidróxido de Sódio (NaOH) em balança analítica do laboratório multidisciplinar do Centro de Pesquisa e Apoio ao Desenvolvimento da Educação Matemática e Científicas de Abaetetuba (CPADC) e mediu-se 1L de água, dissolveu-se o agente ativante na água e formou-se a solução ativante na qual foi adicionada a amostra de caroço de açaí desidratada que foi deixada em contato por 24 horas.

Para o processo de pirólise, a amostra de caroço de açaí impregnada com o ativante químico Hidróxido de Sódio (NaOH) foi secada em estufa a 50°C durante 6 horas. Depois da secagem, a amostra de caroço de açaí foi introduzida em um forno simples de barro e carbonizada a uma temperatura aproximadamente de 400°C por 3 horas, na ausência de oxigênio para evitar a queima total do carvão ativado. Depois, o carvão ativo foi resfriado, lavado várias vezes em água corrente para a retirada do excesso do agente químico ativante e, novamente, foi feito o processo de secagem, logo em seguida a pulverização, utilizando-se um liquidificador para tal procedimento. Depois de pulverizado, o carvão ativado produzido foi acondicionado em uma vela de filtro simples para posterior uso nos testes da qualidade da água. Estes procedimentos foram realizados no Centro de Pesquisa e Apoio ao Desenvolvimento da Educação Matemática e Científica de Abaetetuba (CPADC) / Clube de Ciências do Município de Abaetetuba (CCIA).

#### 3.3.2 Análise físico-química e microbiológica da água

O carvão ativado produzido foi utilizado no tratamento de água. Para tanto, utilizou-se duas velas de filtro simples (uma preenchida de carvão ativado industrializado e outra acrescida de 68,2g do carvão ativado produzido).

Foram coletadas 3 (três) amostras de água. A primeira não passou por nenhum tipo de tratamento; a segunda foi tratada com carvão ativado industrial e a terceira amostra foi tratada em vela de filtro simples acrescida de carvão ativado pulverizado

produzido com o caroço de açaí.

Além disso, foram realizadas análises de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, como Ferro, Turbidez e Coliformes Totais em 3 (três) amostras de água, totalizando 9 (nove) análises. As amostras de água foram coletadas às 7 horas da manhã na avenida principal do bairro Parolândia, na cidade de Moju/PA.

As amostras foram coletadas em garrafas de plástico de água mineral com capacidade para 300 ml com tampas e roscas previamente esterilizadas. No momento da coleta, limpou-se a torneira, realizou-se a higienização com álcool a 70% e deixou-se escoar a água por um tempo aproximadamente entre 2 a 3 minutos antes de cada coleta, como demonstrado.

Após os procedimentos de coleta, as garrafas contendo as amostras foram acondicionadas em caixas de isopor com gelo e lacradas com fita adesiva na tampa para que assegurassem o perfeito fechamento da mesma, e foram transportadas imediatamente ao laboratório de análises MAGMATEC em Ananideua-Pará. Para a realização das análises, utilizou-se o método SMWW obedecendo às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo mostrou que 81% do total da população pesquisada consome água de origem do Sistema de Abastecimento (COSANPA), e 19% consome água vinda de poços comuns (amazônicos) e/ou artesianos.

No entanto, 95% da amostra pesquisada conhece alguns riscos no consumo de água não tratada, sendo que, desse percentual, 86% citou as doenças causadas pela diarreia infecciosa, seguida pelas verminoses, infecção intestinal e cólera, como mostra a figura 1.

### Conhecimento da população sobre os riscos que a água não tratada pode trazer à saúde

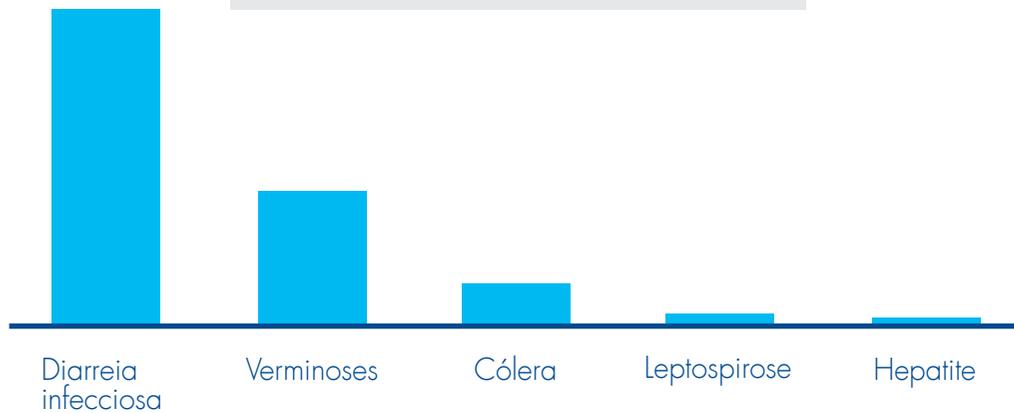


Figura 1. Percentual dos riscos que a água não tratada pode ocasionar à saúde.

Já em relação ao tratamento realizado na água que consomem, 40% dos entrevistados disseram não fazer nenhum tipo de tratamento, 60% disseram realizar algum tratamento, sendo que 80% dessa parcela fazem somente uma filtração simples, 18% aplicam cloro e 2% efetuam a fervura, como descrito na figura 2.

### Procedimentos usados pela população no tratamento de água para consumo



Figura 2. Percentual dos procedimentos efetuados no tratamento da água para o consumo.

Dentre os procedimentos de tratamento da água realizados pela população do bairro Parolândia em Moju/PA, o procedimento mais eficiente é a efetuação da fervura. Segundo Cubas (2010), este procedimento mata os micro-organismos causadores de doenças através da alta temperatura a que a água é submetida. Já a filtração simples, que é o procedimento realizado pela maioria da população, é a

forma de tratamento menos eficiente. Este procedimento consiste em coar a água na saída da torneira utilizando um pano. Essa filtração simples é eficiente somente na coleta de partículas sólidas e não remove os micro-organismos presentes na água.

Observou-se que 64% da amostra pesquisada afirmou ter contraído alguma doença veiculada pela água não tratada e 57% desse percentual contraiu diarreia infecciosa, seguida de verminoses, cólera, leptospirose e hepatite. Verifica-se, nesta análise, que a grande maioria da população pesquisada foi acometida por doenças transmitidas pela água. Isto se deve ao fato de 40% da amostra pesquisada consumir água sem tratamento e 60% não realizar o tratamento adequado. Além disso, o estado de conservação das encanações de abastecimento de água, por sua vez, encontra-se em péssimo estado e pode propiciar a contaminação da água. Segundo Brum (2007), a ausência de manutenção nas tubulações por onde passa a água é um importante fator de contaminação.

O mais preocupante nesta análise, referente aos 61% dos moradores, é que eles dizem que a água que consomem tem cor, outros 54% dizem que a água tem odor e 59% dizem ter gosto, sendo que a cor, o odor e o gosto citados foram de ferrugem, cor amarelada e preta, gosto de lama e odor de lama também, como descrito na figura 3.

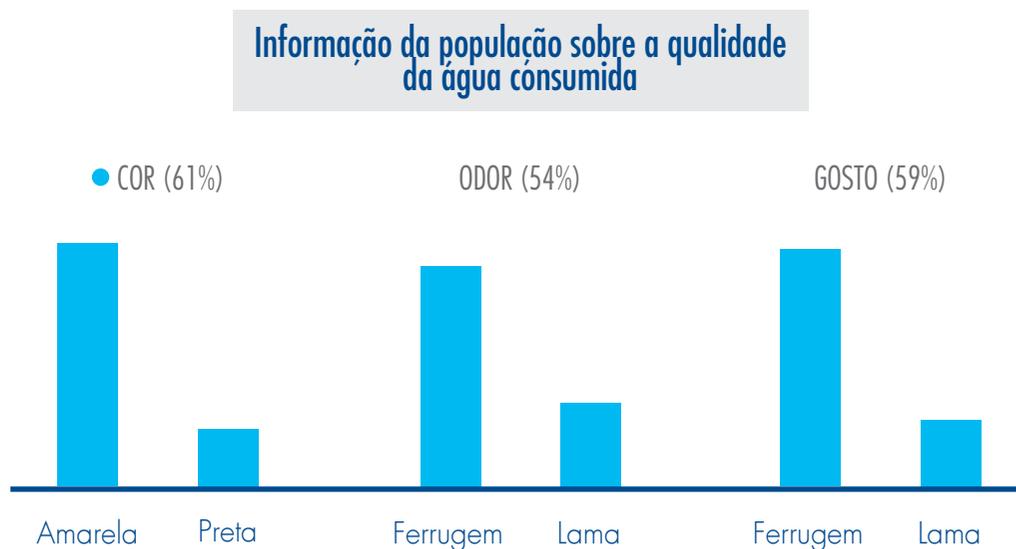


Figura 3. Percentual das características organolépticas da água apresentadas pela população.

## 4.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DA ÁGUA

Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas das 3 (três) amostras de água coletadas estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Resultados dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água coletada em uma residência do bairro em estudo.

PARÂMETROS	RESULTADOS			UNIDADE	VMP
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		
Ferro	0,29	0,20	0,19	mg/L Fe	0,30
Turbidez	3,0	0,0	0,0	UT	5
Coliformes Totais	9,2	0,0	0,0	UFC/100 ml	ausente

Fonte: Laboratório de análises MAGMATEC (método SMWW).

Em cada amostra de água, foram realizadas as análises dos seguintes parâmetros: Ferro, Turbidez e Coliformes Totais. A primeira amostra (amostra 1), como apresentada na tabela 3, corresponde à água coletada diretamente da torneira, ausente de tratamento. A segunda amostra (amostra 2) é de água coletada após tratamento com carvão ativado industrial, utilizando-se uma vela simples industrializada. Já a terceira amostra (amostra 3) diz respeito à água coletada após tratamento com o carvão ativado produzido do caroço do açaí. Através da Portaria número 518/2004, o Ministério da Saúde estabelece o padrão de potabilidade da água destinada para consumo humano. Segundo a Portaria, os valores permitidos são de 0,30 mg/L para o Ferro e de 5 UT para Turbidez. Já os Coliformes Totais devem ser ausentes em 100 ml de água.

Analisando os valores dos parâmetros referentes à primeira amostra, observa-se que os valores dos parâmetros Ferro e Turbidez, que são respectivamente 0,29 mg/l e 3,0 UT, estão em conformidade com os limites do padrão estabelecido pelo Ministério da Saúde. Já o valor do parâmetro Coliformes Totais, que é de 9,2 UFC/100ml verificado na primeira amostra, está acima do padrão exigido pela legislação vigente. Segundo o Ministério da Saúde, por meio da Portaria 518/2004, a água destinada para consumo humano deve ser livre de Coliformes Totais. Isso quer dizer que, em relação a este parâmetro, a água consumida pela população está com a qualidade comprometida. Esta contaminação elevada pode ser devido ao estado de conservação das encanações da Companhia de Abastecimento de Água – COSANPA. A torneira onde as amostras foram coletadas se encontra em má

conservação, quebrada, com saída de água entupida e até mesmo suja, indicando a ausência de limpeza e manutenção, proporcionando a contaminação.

Em relação aos resultados das análises realizadas na segunda e terceira amostras, tratadas com carvão ativado industrial e carvão ativado produzido do caroço do açaí respectivamente, como mostra a tabela 3, houve uma redução significativa no valor do parâmetro Ferro tanto para a água tratada com carvão ativo industrial quanto para a água com carvão ativo produzido do caroço do açaí. Sendo que o carvão ativado do caroço de açaí apresentou maior eficiência nestes parâmetros, pois conseguiu reduzir o valor de 0,29 mg/l da primeira amostra para 0,19 mg/l da terceira amostra. Já o carvão ativado industrial reduziu o valor do mesmo parâmetro de 0,29mg/l para 0,20mg/l.

No entanto, os dois carvões ativados apresentaram eficiência igual nos parâmetros Turbidez e Coliformes Totais quando comparados os valores da segunda e terceira amostras. Na segunda amostra, os valores dos parâmetros Turbidez Coliformes Totais são 0,0UT e 0,0UFC/100 ml, respectivamente. Quando se comparam os valores com os mesmos parâmetros na primeira amostra, é claro perceber que os dois carvões ativados exerceram eficiência máxima.

Portanto, os valores de todos os parâmetros analisados referentes à segunda e terceira amostras, sendo as amostras de água tratadas com carvão ativado industrializado e o carvão ativado produzido respectivamente, estão de acordo com o padrão de potabilidade da água para consumo humano estabelecido pelo Ministério da Saúde através da Portaria nº 518/2004.

De acordo com Claudino (2003), a estrutura física de carvão ativada é formada por uma grande quantidade de microporos, mesoporos e macroporos. Os microporos são de elevada importância no processo de adsorção, pois possuem grande área superficial. Já os mesoporos e macroporos servem de passagem para os microporos na adsorção.

Com base nesse autor, a eficiência desempenhada pelos dois carvões ativados, em especial pelo carvão ativado produzido com o caroço de açaí é atribuída à estrutura porosa do mesmo. Assim, pode-se dizer que o carvão ativado produzido é formado por microporos, mesoporos e macroporos. Vale salientar que essa estrutura porosa foi desenvolvida com a ativação no momento da carbonização do caroço de açaí. As figuras a seguir mostram a estrutura do carvão ativado antes e depois do processo de ativação.

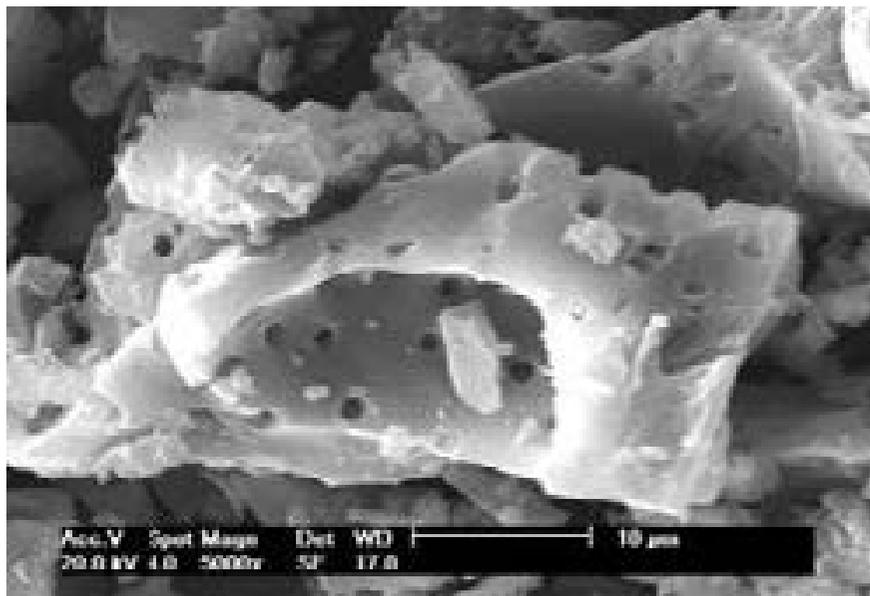


Figura 4. Microscopia eletrônica de varredura para CAED antes da ativação (5000x).  
Fonte: Fernandes (2010).



Figura 5. Microscopia eletrônica de varredura para CAED após ativação (5000x).  
Fonte: Fernandes (2010).

Percebe-se que a figura 4, antes da ativação, apresenta em sua estrutura poucos poros, em sua grande maioria mesoporos. Já a figura 5 mostra o carvão ativado após a ativação. Observa-se que, em sua estrutura, criam-se variados poros como, por exemplo, os microporos, mesoporos e macroporos. É por meio desses poros que o carvão ativado realiza o processo de adsorção.

## 5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa mostrou que o carvão ativado produzido com resíduo restante do processo de beneficiamento do açaí é eficiente no tratamento de água. Dessa forma, confirma-se a hipótese anteriormente formulada, alcançando os objetivos previamente propostos. Observou-se que o carvão ativado apresentou eficiência igual e em algumas análises superior ao carvão ativado industrial, salientado que o carvão produzido apresenta vantagens no que diz respeito ao baixo custo em sua preparação. Além disso, a pesquisa é relevante por duas razões. Primeiro, ela agrega importância ambiental, porque dá uma destinação ao caroço de açaí, que, se descartado de maneira inadequada, pode poluir o solo e a água. Segundo, porque o carvão ativado produzido a partir do aproveitamento desse resíduo pode ser eficientemente utilizado no processo de tratamento da água para consumo humano. Dessa maneira, o carvão ativado auxiliará a população local, sobretudo a população ribeirinha, a melhorar a qualidade da água consumida, ajudando na prevenção de doenças e contribuindo para uma melhor qualidade de vida.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 518 de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidade relativa ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <<http://www.agrolob.com.br/portaria%2051804.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2012.

BRUM, Sarah. Silva. **Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2007. Disponível em: <<http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

CLAUDINO, Antônio. **Preparação de carvão ativado a partir de turma e sua utilização na remoção de poluentes**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2003. Disponível em: <<http://www2.eng.ufsc.br/teses/mt01.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2012.

CUBAS, Karina Guedes. **Avaliação do desempenho de carvões ativos usados na remoção de compostos orgânicos de águas naturais, provenientes de cianobactérias e suas toxinas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Disponível em: <<http://www.rbciamb.com.br>>. Acesso em: 5 mar. 2012.

FERNANDES, Kendra D'Abreu Neto. **Uso de carvão ativado de endocarpo de coco no tratamento de água**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: <<http://www.pucrs.br>>. Acesso em: 8 mar. 2012.

MULLER, C. C. **Avaliação da utilização de carvão ativado em pó na remoção de Microcistina em água para abastecimento público**. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

REVISTA MEIO FILTRANTE. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br>>. Acesso em: 13 jan. 2012.

SILVA, I. M. C. B. da. Métodos de preparação industrial de solventes e reagentes químicos: Hidróxido Sódio. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 1, 2012. Disponível em: <<http://www.uff.br/RVQ/index.php/rvq>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

TEXEIRA, Brito Leopoldo et al. **Compostagem**: lixo orgânico urbano e resíduo da agroindústria do açaí. Belém: Albras, 2006.



2º  
LUGAR

CATEGORIA  
ENSINO MÉDIO



Thaís Rocha Arrighi, 16 anos

Escola Estadual Profª. Francisca Pereira Rodrigues  
Piraúba - MG

## “CHIQUITA ECONOMIZANDO ÁGUA” HÁBITOS INADEQUADOS E HÁBITOS ADEQUADOS

### RESUMO

Antes da idealização do projeto, alguns alunos pensaram em pesquisar quanto a escola gastaria de água mensalmente. Procurada, a direção informou ao grupo de alunos que não tinha acesso a esses números, pois as contas não eram repassadas diretamente à escola. Dessa forma, os alunos pesquisaram entre os funcionários da limpeza quanto eles gastavam de água, e os resultados serão apresentados aqui.

Posteriormente, Thaís, aluna do 2º ano do ensino médio, tomou a iniciativa e criou o projeto. Ela pensava em mostrar para todos quanto de água era consumido ali na própria escola, mostrar curiosidades sobre o consumo brasileiro e várias informações que levassem a conscientizar a escola a poupar água. E assim foi feito, criando-se um mural na escola onde ela pudesse apresentar todo o conteúdo do projeto.

Além dessas informações transmitidas a todos, incentivada pelo Prêmio Jovem Cientista, ela elaborou um “Pacto das Águas da Escola”, firmado entre ela, um representante dos funcionários responsáveis pela limpeza, um representante dos professores e a diretora. No pacto, eles concordaram e assinaram um termo de responsabilidade de uso consciente da água, evitando sempre o desperdício.

## 1. INTRODUÇÃO

O projeto “Chiquita economizando água” foi lançado na Escola Estadual Professora Francisca Pereira Rodrigues em julho de 2013 com o objetivo de conscientizar alunos, professores, funcionários e todos os que frequentam o ambiente escolar sobre os hábitos adequados e inadequados do consumo de água na instituição. Para idealizar o projeto, analisou-se o consumo e o uso da água na escola, e foram entrevistados funcionários, professores, a diretora e alunos sobre algumas questões relacionadas ao tema. A conscientização de todos na escola, além de gerar uma economia financeira, gera cidadãos melhores e preocupados com o futuro da água não só em âmbito municipal, mas em todo o mundo.

## 2. APRESENTAÇÃO

Dona Francisca Pereira Rodrigues, popularmente conhecida por alunos e colegas de profissão como “Chiquita” foi professora e diretora da escola que hoje recebe seu nome. Homenageando-a mais uma vez, o projeto recebe como nome o seu carinhoso apelido.

Do volume total de água na Terra, somente cerca de 2,5% é de água doce, e acredita-se ainda que somente 1% esteja disponível para utilização dos mais de 7 bilhões de pessoas – população mundial da Terra, atualmente –; o restante da água estaria congelada nos polos.

Pensando nisso, o “Chiquita economizando água” foi criado na Escola Estadual Professora Francisca Pereira Rodrigues, na cidade de Piraúba, em Minas Gerais.

“Vivemos em um mundo cada vez mais inseguro, onde a demanda de água muitas vezes supera a oferta, onde a qualidade da água muitas vezes não consegue atender aos padrões mínimos de qualidade. De acordo com as tendências atuais, as futuras demandas por água não serão cumpridas”, disse o Secretário-Geral da ONU, Ban Ki-moon, em sua mensagem para lembrar o Dia Internacional da Diversidade Biológica.

## 3. DESENVOLVIMENTO

No início, ao saberem que não havia um número para o consumo de água na escola, um questionário foi feito aos funcionários com as perguntas: 1 – Quantos baldes d’água são gastos ao limpar uma sala de aula?; 2 – Quantos baldes d’água são gastos ao limpar o pátio?; 3 - Quantos baldes d’água são gastos para limpar

os corredores?; 4 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar a biblioteca?; 5 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar a sala dos professores?; 6 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar a secretaria?; 7 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar cada banheiro?; 8 - Quantas vezes por dia as salas de aula são limpas?; 9 - Quantas vezes por dia o pátio é limpo?; 10 - Quantas vezes por dia os corredores são limpos?; 11 - Quantas vezes por dia a biblioteca é limpa?; 12 - Quantas vezes por dia a sala dos professores é limpa?; 13 - Quantas vezes por dia a secretaria é limpa?; 14 - Quantas vezes por dia cada banheiro é lavado?; 15 - Quantos litros de água têm os baldes utilizados na escola?

Com o questionário, foi possível ver, em média, quanto de água era consumido na escola. Afinal, os alunos perceberam que o consumo era muito maior, pois ainda havia o uso das torneiras e descargas nos banheiros, das torneiras da cozinha, além do que era filtrado e consumido no bebedouro da escola.

Com base nos questionários respondidos pelos funcionários da limpeza, chegou-se à conclusão de que são gastos:

- 704L d'água por dia para as salas de aula;
- 256L d'água por dia para o pátio;
- 288L d'água por dia para os corredores;
- 72L d'água por dia para a biblioteca;
- 48L d'água por dia para a sala dos professores;
- 48L d'água por dia para a secretaria;
- 768L d'água por dia para lavar os dois banheiros.

"QUANTOS LITROS D'ÁGUA GASTAMOS?"

Questionário:

- 1 - Quantos baldes d'água são gastos ao limpar uma sala de aula? 2 baldes
- 2 - Quantos baldes d'água são gastos ao limpar o pátio? 6 baldes
- 3 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar os corredores? 3 baldes
- 4 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar a biblioteca? 3 baldes
- 5 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar a sala dos professores? 2 baldes
- 6 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar a secretaria? 2 baldes
- 7 - Quantos baldes d'água são gastos para limpar cada banheiro? 4 baldes
- 8 - Quantas vezes por dia as salas de aula são limpas? 6 vezes
- 9 - Quantas vezes por dia o pátio é limpo? 3 vezes
- 10 - Quantas vezes por dia os corredores são limpos? 3 vezes
- 11 - Quantas vezes por dia a biblioteca é limpa? 3 vezes
- 12 - Quantas vezes por dia a sala dos professores é limpa? 3 vezes
- 13 - Quantas vezes por dia a secretaria é limpa? 3 vezes
- 14 - Quantas vezes por dia cada banheiro é lavado? 6 vezes
- 15 - Quantos litros de água tem os baldes utilizados na escola? 8 litros

"Economize água, sempre!"

Figura 1. Questionário respondido por um funcionário da limpeza da Escola Estadual Professora Francisca Pereira Rodrigues.

São gastos, portanto, 2.184L diários de água, desconsiderando alguns ambientes que não entraram no questionário, como laboratório de informática, laboratório de ciências, sala da direção e sala da supervisão, além das torneiras, descargas e bebedouro.

O resultado do questionário também foi afixado no mural do "Chiquita economizando água".

Posteriormente ao resultado do questionário respondido pelos funcionários, Thaís resolveu elaborar outro questionário, agora para os professores e alunos da escola, sobre o uso adequado e inadequado da água.

Neste segundo questionário, foram elaboradas as seguintes perguntas: 1 - Você acha que nossa escola gasta muita água? O gasto é adequado e necessário? Justifique; 2 - Qual o principal ponto de desperdício d'água na escola, se existir?; 3 - Dê uma ideia para que possa ser solucionado o desperdício d'água na escola; 4 - Você tem algum hábito que considere inadequado e desperdice água? Você sabe qual hábito seria adequado para corrigi-lo?

O resultado foi impressionante: 50% dos professores concordaram que a escola gasta mais água do que seria necessário e sugeriram que, para que isso mudasse,

um trabalho sobre o tema seria imprescindível. Os outros 50% dos professores acharam que a escola gasta realmente muita água, porém, o necessário.

Entre os alunos, o resultado foi diferente: 20% concordam que o consumo é elevado, porém, assim como alguns professores, que é um consumo necessário. Um desses alunos justificou que na escola possuem muitos estudantes e, por isso, gasta-se muita água para as atividades, citando como exemplo a alimentação e a limpeza. Os outros 80% compartilham de uma mesma opinião, afirmando que o consumo é alto e inadequado. Dentre esses alunos, muitos citaram que o ponto de maior desperdício d'água seria o bebedouro. Eles afirmam que ora as torneiras ficam gotejando, ora abertas. Dizem também que, ao beberem água diretamente no bebedouro, muita água é desperdiçada.

Na questão 3, que pedia uma solução para o desperdício d'água, praticamente todos deram a sugestão de que os alunos usassem garrafas para beberem água. Assim, a ida ao bebedouro diminuiria; além disso, ao enchê-las, não haveria desperdício, afinal a água cairia totalmente dentro da garrafa, o que não acontece quando se bebe água diretamente no bebedouro, já que parte vai "ralo abaixo", gotejando das mãos e boca.

Na última questão, em que a pergunta era "Você tem algum hábito que considere inadequado e desperdice água? Você sabe qual hábito seria adequado para corrigi-lo?", alunos e professores citaram o banho como exemplo. Eles afirmaram que tomavam banhos demorados e se comprometeram a reverter esse problema, demorando menos e desligando o chuveiro ao se ensaboarem.

Esses resultados também foram expostos no mural do "Chiquita economizando água".

Como foi sugerido por muitos alunos que responderam ao questionário, foi implantada na escola a ideia de que todos levassem sua garrafa. E assim foi feito: depois de instruídos pelo mural do projeto, os alunos passaram a levar cada um a sua garrafa. Além da diminuição das idas ao bebedouro, o uso das garrafas poupou a água que gotejava ao beber diretamente no bebedouro. Professores também agradeceram pela diminuição de pedidos dos alunos para saírem, durante a aula, para beberem água.

Os funcionários da escola, estimulados pelo projeto, também passaram a supervisionar com mais frequência o bebedouro, cujas torneiras, segundo alunos no questionário, ora gotejavam, ora estavam totalmente abertas.

Incentivados pela ideia do próprio Prêmio Jovem Cientista, criou-se o “Pacto das Águas da Escola”, firmado entre a aluna autora, Thaís Rocha Arrighi, representando os alunos, a diretora da Escola Estadual Professora Francisca Pereira Rodrigues, Andressa Maria Retondaro Demolinari Neiva, a professora e orientadora do projeto, Arlete Aparecida Marchioni Juste, representando os professores, e a representante dos funcionários responsáveis pela limpeza, Maria Martins Pinto.

O “Pacto das Águas da Escola” foi redigido assim:

“Com a informação transmitida pelo projeto ‘CHIQUITA ECONOMIZANDO ÁGUA’, nós, alunos e funcionários, firmamos o compromisso de buscar poupar o consumo de água na ESCOLA ESTADUAL PROFESSORA FRANCISCA PEREIRA RODRIGUES, utilizando-a adequadamente, sem desperdícios. Certificamos que faremos o possível para que o consumo diminua, e que o conforto e a higiene não serão afetados.”

Esse ofício foi assinado pela aluna, pela diretora, pela professora e pela funcionária de limpeza.

Todos os impressos do projeto “Chiquita economizando água” – informações do mural, questionários de alunos, professores e funcionários – e o “Pacto das Águas da Escola” foram feitos em papel reciclado A4.

## 4. CONCLUSÃO

O projeto “Chiquita economizando água” foi lançado em julho de 2013, por isso o prazo para que houvesse grandes resultados foi curto. Todavia, o projeto, claro, continuará em andamento e, felizmente, a maioria da escola – alunos e funcionários – aderiu à conscientização proposta. Alunos já levam diariamente suas garrafas d’água, os funcionários da limpeza estão instruídos a pouparem o máximo possível, e todos estão alertas caso algum foco de desperdício d’água seja detectado.

Com o “Pacto das Águas da Escola”, firmado entre aluna, professora, diretora e funcionária de limpeza, todos têm o compromisso de fiscalizar o consumo de água na escola. Afinal, os pactuantes foram apenas representantes de toda a comunidade escolar.

Com o projeto, pôde-se prestar um serviço de utilidade pública, alertando toda a comunidade escolar sobre os hábitos adequados e inadequados do uso da água. Realizado no âmbito acadêmico, o projeto ultrapassa essa barreira e engloba toda a comunidade, afinal, incentivado na escola, o aluno também se preocupa com o desperdício na própria casa.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUA: uso consciente x desperdício. **Nova Escola**, s.d. Disponível em: <<http://revistaescola.abril.com.br/creche-pre-escola/sequencia-atividades-agua-uso-consciente-x-desperdicio-679622.shtml?page=all>>. Acesso em: 24 ago. 2013.

ALERTANDO para escassez de água doce, ONU pede esforços globais para proteger recursos naturais. **Nações Unidas no Brasil**, 23 mai. 2013. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/alertando-para-escassez-de-agua-doce-onu-pede-esforcos-globais-para-proteger-recursos-naturais/>>. Acesso em: 24 ago. 2013.

GALLO NETO, Carmo. Pesquisa avalia consumo de água em escolas. **Jornal da Unicamp**, edição 282, 4-10 abr. 2005. Disponível em: <[http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/abril2005/ju282pag11.html](http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/abril2005/ju282pag11.html)>. Acesso em: 24 ago. 2013.

3º

LUGAR

CATEGORIA  
ENSINO MÉDIO



**Breno de Mello Dal Bianco, 16 anos**

**Associação Franciscana de Ensino Senhor Bom Jesus  
Curitiba - PR**

## **DESSALINIZAÇÃO A PARTIR DE DESTILADOR SOLAR**

### **RESUMO**

A água salobra é pouco utilizada pelo homem devido ao excesso de sais em sua composição. Todavia, as maiores reservas de água no mundo são os mares e oceanos, e estes são salobros. Isso mostra a importância da dessalinização para a obtenção de água potável, especialmente em regiões secas que não possuem outras fontes desse recurso. O processo é, contudo, caro e pouco explorado. Daí surge a necessidade de se investirem em tecnologias que possibilitem um aproveitamento melhor deste recurso.

Este projeto se baseia num método de dessalinização sem custos, e que utiliza uma fonte de energia renovável. Ao acoplar um fogão solar a um circuito de refrigeração com um condensador, obtemos um destilador solar que pode ser utilizado tanto em larga escala como para suprir uma família pequena. Por ter sido construído com materiais simples e fáceis de adquirir, meu protótipo pode ser reproduzido sem muito esforço ou custos.

Palavras-chave: dessalinizador solar, renovável, destilador.

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez de água limpa é um problema enfrentado por boa parte da população brasileira. Cerca de 40 milhões de pessoas têm abastecimento descontinuado e irregular, além de muitas vezes receber água de má qualidade em suas casas. Já 11 milhões de brasileiros não têm acesso algum a água potável (REBOUÇAS, 2003).

No Brasil, muitas vezes persiste o pensamento de que, para vencermos a escassez de água, devemos fazer obras de grande porte, muitas vezes caras e complexas, como por exemplo a transposição do rio São Francisco. Essas obras, custeadas pelo poder público, raramente resolvem o problema. É sabido que, quando o investimento e método de retirada são custeados pelo indivíduo, este tende a fazer um uso mais proveitoso da água, evitando desperdícios (REBOUÇAS, 2003). Desta forma, soluções de menor escala dimensionadas e aplicadas no âmbito individual ou familiar se mostram mais eficientes.

A destilação solar é um processo mais barato quando comparado a outros processos de destilação. Isso se deve especialmente ao fato de ser utilizada uma fonte de energia renovável e gratuita, o Sol. Sua versatilidade permite que esta forma de energia seja usada não apenas para geração de eletricidade, mas também para aquecimento de água, desidratação e secagem de alimentos, cozimento, entre outros (RAMOS FILHO, 2011).

Este projeto visa a obtenção de água potável através de um destilador solar construído com materiais simples e fáceis de adquirir. O uso de energia solar permite a diminuição dos custos do processo, além de ser uma energia limpa e renovável. O emprego de materiais presentes no dia a dia e a reutilização de sucata fazem com que este protótipo possa ser reproduzido sem maiores dificuldades por qualquer pessoa e com baixo custo.

## 2. METODOLOGIA

Para facilitar a construção, o projeto foi dividido em duas partes: o fogão e o condensador. Ambos foram reunidos em uma estrutura única posteriormente.



Figura 1. Fogão solar.



Figura 2. Circuito de refrigeração.

O fogão foi construído a partir de antenas parabólicas usadas e retalhos de espelhos, o que barateou os custos. Esse método para a fabricação dos refletores a partir de antenas foi desenvolvido por Ricardo Eugênio Barbosa Ramos Filho para sua dissertação de mestrado.

As parábolas foram recobertas por quadrados de 28 mm de lado, cortados com uma ferramenta de ponta de carboneto de tungstênio a partir de retalhos de espelhos obtidos em vidraçarias. Retalhos de qualquer tamanho podem ser usados na produção dos refletores. Isso permite o uso de pedaços de espelhos que seriam normalmente descartados em vidraçarias, reutilizando esses materiais e mantendo o custo próximo a zero.

Para aderir os espelhos à antena, foi usada fita dupla face para colagem de vidros. Em cada refletor, foram colados aproximadamente 430 quadrados de espelhos, totalizando um consumo de aproximadamente 12 metros de fita e 0,34 m<sup>2</sup> de espelhos.



Figura 3. Colagem dos espelhos.

Após a conclusão da colagem dos espelhos, as antenas foram unidas pela sua própria haste de suporte de modo a sobrepor seus focos, maximizando assim a eficácia do fogão. Foi utilizada uma escada e arames para dar suporte à panela onde será fervida a água a ser destilada. A escolha de uma panela de pressão se deve ao fato de sua vedação permitir conduzir o vapor até o condensador com uma perda muito baixa, o que contribui para a eficiência do protótipo.

Para o condensador, foi feito um sistema hidráulico composto de um radiador automotivo comprado em ferro-velho e um condensador de Friedrich (serpentina), comumente encontrado em lojas de vidrarias para laboratório. O condensador foi ligado ao radiador de modo a contribuir com a convecção do líquido refrigerante interno. O líquido que resfria o vapor que entra no condensador segue aquecido

para o radiador, onde é resfriado e volta para o condensador, completando assim o circuito fechado de refrigeração.

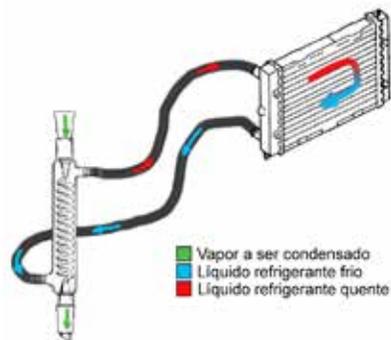


Figura 4. Esquema do condensador.

Todo o sistema de refrigeração foi fixado em torno de uma cadeira, a fim de gerar um desnível entre o radiador e o condensador que facilitasse a convecção.

A ligação entre a caldeira e o condensador foi feita por meio de uma mangueira comum de gás.

Testes preliminares foram realizados com a panela em alumínio natural. Esta não se mostrou eficiente, refletindo muita luz solar. O fundo da panela foi então pintado com tinta spray fosca da cor preta.



Figura 5. Pintura da panela.

A pintura maximizou a absorção da luz solar e sua conversão em calor, uma vez que o preto possui uma refletância inferior a 5%. Esse alto grau de absorção da radiação solar garante um ganho maior de calor (CASTRO et al., 2003).

Experimentos com os componentes isolados mostraram que as antenas conseguiram levar a água à ebulição e que o sistema de refrigeração condensava a maior parte da água fervida em um fogão a gás.

Todavia, no primeiro teste que buscava a destilação completa (ebulição e condensação), o protótipo falhou. A posição da caldeira e do condensador fez com que a água condensasse na mangueira de gás que liga os dois itens e voltasse para a panela. O refluxo da água e dificuldades no transporte, ajuste do foco e compensação do movimento aparente do Sol na montagem que utilizava a escada e a cadeira levaram à construção de uma estrutura de suporte para as partes do protótipo.

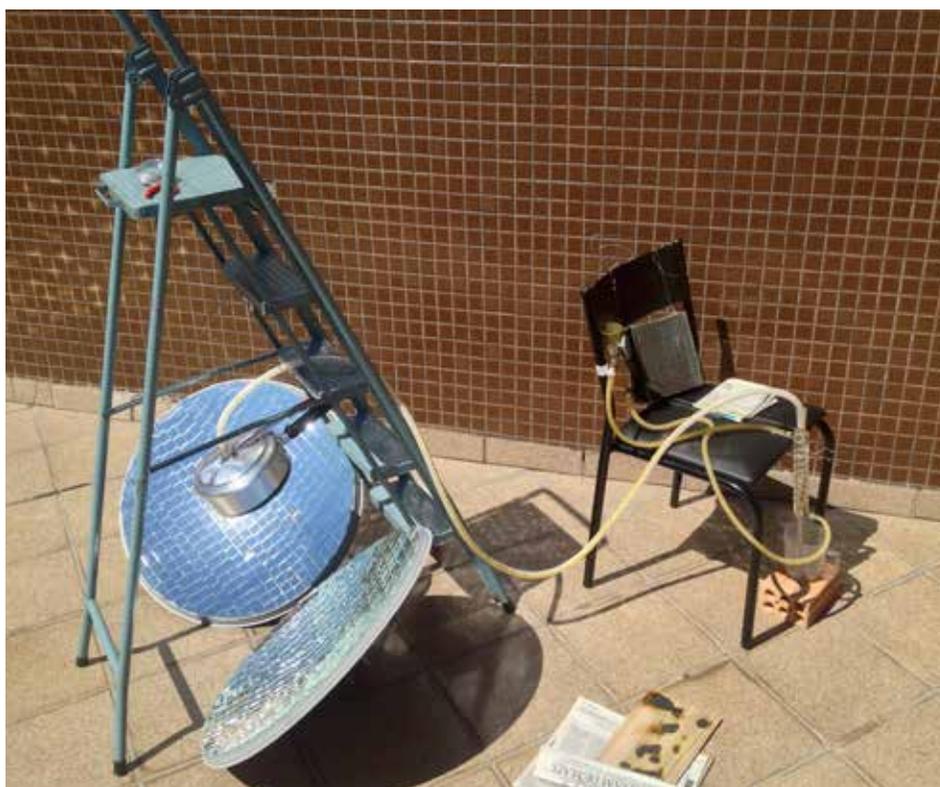


Figura 6. Montagem do primeiro teste.

A estrutura foi feita por uma serralheria. No formato de tronco de pirâmide e construída em metal, ela possui suporte para o radiador e o condensador, além de um descanso para um recipiente coletor de água destilada. Os refletores são presos a um eixo giratório, para compensar o movimento aparente do Sol. A caldeira tem um suporte de altura variável, a fim de ajustar a posição e tamanho do foco.

A estrutura trouxe várias melhorias. O transporte foi facilitado, uma vez que as múltiplas peças se tornaram um objeto único. O ajuste do foco e da posição da caldeira se deu com mais precisão, e o ajuste pela posição do Sol no céu foi feito com mais facilidade, devido à altura regulável da panela e ao eixo giratório das elipses, respectivamente. As mangueiras foram dimensionadas corretamente, evitando dobras ou comprimento excessivo. Esses fatores permitiram a realização de novos ensaios buscando a destilação da água marinha.



Figura 7. Estrutura completa.

Esses ensaios trouxeram resultados positivos, e a construção do protótipo foi finalizada. Pequenos aperfeiçoamentos ainda serão realizados, mas de fim estético (pintura, limpeza etc.).

Para a construção do protótipo, foi investida uma quantia aproximada de R\$ 660,00, distribuída nos seguintes itens:

- Antenas parabólicas: R\$ 50,00
- Espelhos: R\$ 40,00
- Fita adesiva dupla face: R\$ 80,00
- Cortador de vidro: R\$ 40,00
- Tinta spray: R\$ 20,00
- Mangueiras: R\$ 20,00
- Radiador: R\$ 50,00
- Condensador: R\$ 60,00
- Serviço de metalurgia: R\$ 300,00

### 3. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Foram realizados sucessivos experimentos durante a construção e projeto do protótipo. De caráter empírico, esses testes direcionaram o estudo, apontando falhas e possíveis melhorias para cada estágio do destilador. Os passos e decisões da metodologia foram tomados a partir dos resultados a seguir.

Durante a colagem dos espelhos nas antenas, foram feitos testes dos espelhos parabólicos em que os refletores carbonizaram uma placa de MDF. Porém, eles eram incapazes de ferver a água na caldeira. A causa disso era o acabamento em alumínio do fundo da panela. O alumínio refletia muita luz solar, diminuindo drasticamente sua eficiência. Esta descoberta acusou a necessidade de se pintar o fundo da panela de preto fosco.

Para atestar a funcionalidade do sistema de refrigeração, foram realizados dois ensaios de destilação de água marinha. Uma vez que a água já havia sido fervida utilizando os refletores e em função de uma sequência de dias nublados, foi utilizado um fogão a gás para induzir a ebulição da água do mar.

Em ambos os testes, foram colocados 200 ml de água na panela de pressão. Em aproximadamente 10 minutos, a água entrou em ebulição, e ao final de 40 minutos toda a água havia sido evaporada. Ao medir a quantidade de água destilada, foi constatado um volume médio de 185 ml, equivalente a um rendimento superior a

90%, o que confirmava a funcionalidade do circuito condensador.

Notou-se que a água destilada, apesar de não possuir sais, estava um pouco turva e com flavor de plástico proveniente da mangueira de gás utilizada para conectar a válvula da panela à entrada do condensador.



Figura 8. Resultado da primeira destilação.

Após esses dois testes, foi feito um experimento para atestar a funcionalidade do protótipo na realização do processo completo. Foram colocados novamente 200 ml de água marinha, e a estrutura improvisada com a escada e a cadeira foi montada. A água entrou em ebulição como esperado, mas o processo não foi completado. O vapor, ao sair da caldeira, condensava-se na mangueira de gás, e o líquido ou voltava para a panela ou ficava retido em vales e dobras na própria mangueira, impedindo que o vapor chegasse ao condensador e ao recipiente coletor.

Esse experimento mostrou a necessidade de uma estrutura para posicionar a caldeira no foco dos refletores com precisão. Com a estrutura pronta, dois novos ensaios foram realizados.

### 3.1. ENSAIO DE DESTILAÇÃO

O primeiro ensaio foi realizado em 2 de novembro de 2013, na cidade de Santo Antônio da Platina. O dia estava parcialmente nublado, e notava-se uma névoa constante no céu, mesmo quando não aparentava haver nuvens.

Às 12h40 do horário de verão (11h40 do horário solar), foram colocados 250 ml de água da torneira na caldeira. Passada uma hora, foi verificado que restavam 90

ml de água na panela, e foram coletados 145 ml de água destilada.



Figura 9. Durante o primeiro ensaio.

O rendimento se manteve acima dos 90% observados anteriormente, já que 145 ml dos 160 ml que evaporaram foram condensados. A qualidade da água melhorou, pois, apesar de ainda existir um flavor de plástico, ela estava mais cristalina.



Figura 10. Resultado do ensaio de destilação.

### 3.2. ENSAIO DE DESSALINIZAÇÃO

Para o segundo ensaio, foi utilizada água marinha coletada no município de Pontal do Paraná. Realizado novamente em Santo Antônio da Platina, esse experimento foi conduzido no dia 3 de novembro de 2013. Havia mais nuvens neste dia, o que reduziu a velocidade do destilador.

Com o horário de verão ainda vigente, a destilação foi iniciada às 12h30 com 250 ml de água salina e durou 2 horas. Às 13h30, foi feita uma leitura parcial e haviam condensados pouco menos de 100 ml. Às 14h30, o total destilado foi de 125 ml. Restaram 100 ml na caldeira e um pouco de sal como corpo de fundo.

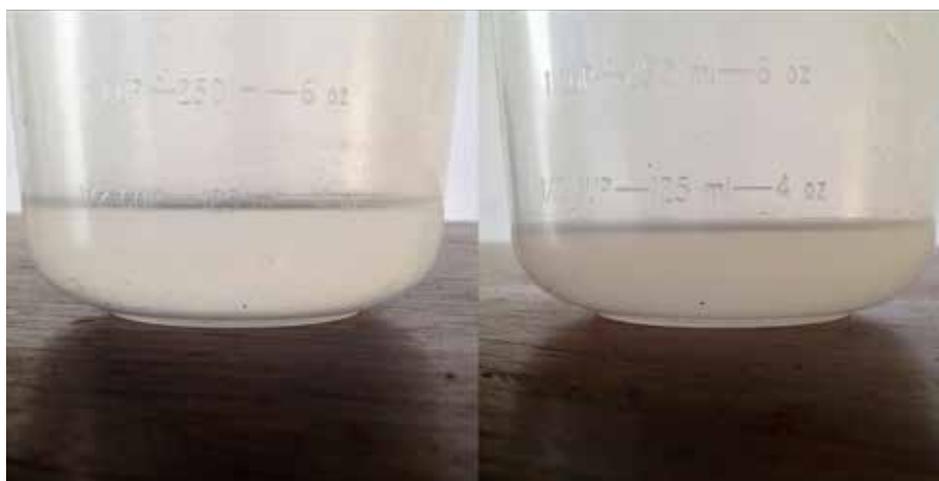


Figura 11. Volume de água dessalinizada.

○ flavor de plástico da água coletada diminuiu, e a salinidade da água marinha subiu drasticamente, deixando-a turva. ○ rendimento deste ensaio foi ligeiramente inferior, ficando um pouco acima de 80%.



Figura 12. Água salina (esq) e água potável (dir).

Vídeos dos testes foram gravados e disponibilizados na Internet. Seus links estão nos anexos.

## 4. CONCLUSÕES

O protótipo se mostrou eficiente e cumpriu seu objetivo, realizando o processo completo de destilação. Menores quantidades de água se mostraram mais eficientes pelo fato de longos períodos de aquecimento necessitarem de ajustes constantes da posição das antenas, para compensar o movimento aparente do Sol. Pequenos volumes requerem também tempos de exposição mais curtos e assim são menos penalizados por dias nublados.

O fogão desempenha bem seu papel. Com o auxílio da estrutura, o ajuste do foco dos refletores e o alinhamento com o Sol são feitos sem dificuldades. A água na caldeira atinge temperaturas satisfatórias ainda que o céu não esteja totalmente limpo. As antenas têm uma potência alta, requerendo poucos segundos para carbonizar materiais como papel ou MDF.

O circuito de refrigeração é funcional e garantiu rendimentos satisfatórios. O rendimento médio foi superior a 85%. O fluido utilizado é água pura de torneira, e todas as peças do circuito são removíveis, podendo ser substituídas em caso de necessidade.

O destilador em sua totalidade pode ser aprimorado com materiais mais adequados ou feitos sob medida. O emprego de antenas e um radiador maiores permite produções maiores, conforme a necessidade do usuário.

Apesar de isso aumentar o custo, ao se pensar em uma aplicação para uma comunidade ou grupo de pessoas esse preço pode ser diluído entre as famílias. Esse projeto é ideal para núcleos familiares e pequenas comunidades por requerer apenas um investimento inicial, uma vez que é um processo sustentável que não necessita de energia externa além da solar.

A água obtida também deve ser testada para se averiguar sua potabilidade. A mangueira de gás deixou resíduos na água coletada, mas este problema tende a diminuir com o uso. A qualidade da água obtida permite direcionar o projeto para diferentes fins, como irrigação, consumo humano ou limpezas em geral, já que requerem diferentes graus de pureza da água.

A aplicação em larga escala é uma oportunidade valiosa, pois essa tecnologia ainda é pouco explorada no mundo, e se mostraria especialmente eficiente no semiárido brasileiro. Essa região sofre historicamente com a falta de água potável, e o clima local se mostra muito adequado para uso de tecnologias solares.

No estado da Califórnia, nos Estados Unidos, uma usina de captação de energia solar voltada para a geração de energia elétrica está sendo construída. Ela segue o mesmo princípio do destilador no que se refere a usar energia solar para aquecer uma caldeira. A usina deve suprir por volta de 140 mil casas, gerando 377 megawatts de energia (SOLAR TRIBUNE, 2013).

Isto ilustra que o investimento nessa nova área de geração de energia pode colocar o Brasil em uma posição de destaque no mundo, pois essa área se encontra no início de seu desenvolvimento e possui muito potencial a ser explorado. Com essa tecnologia, é possível melhorar a qualidade de vida de muitos brasileiros que necessitam de água potável ou energia elétrica.

Ressalta-se também que são obtidos sais marinhos sólidos como subproduto do processo de dessalinização, e estes possuem valor comercial e diversos empregos na química, na culinária e na agropecuária, entre outras áreas.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTRO, A. P. A. S.; LABAKI, L. C.; CARAM, R. M.; BASSO, A.; FERNANDES, M. R. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 69-76, 2003.

RAMOS FILHO, R. E. B. **Análise de desempenho de um fogão solar construído a partir de sucatas de antena de TV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

REBOUÇAS, A. C. Águas no Brasil: abundância, desperdício e escassez. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 13, n. especial, p. 341-345, 2003.

SOLAR TRIBUNE. 2013. Disponível em: <<http://solartribune.com/abengoa-brightsource-to-build-worlds-largest-solar-power-towers-in-california-2013-03-18/>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

## 6. ANEXOS

Carbonização de placa de MDF:	<a href="http://youtu.be/dtHBc5xT0aI">http://youtu.be/dtHBc5xT0aI</a>
Ebulição da água:	<a href="http://youtu.be/q7oZ3ByH1gM">http://youtu.be/q7oZ3ByH1gM</a>
Teste da condensação:	<a href="http://youtu.be/wPD6XjK8bgs">http://youtu.be/wPD6XjK8bgs</a>
Carbonização de jornal:	<a href="http://youtu.be/a6oEFXRiGHw">http://youtu.be/a6oEFXRiGHw</a>
Ensaio de destilação:	<a href="http://youtu.be/l_Ylytm_UKg">http://youtu.be/l_Ylytm_UKg</a>

A close-up photograph of a bamboo stalk with a hole, pouring water. The water is clear and flowing downwards. The background is dark green. A large, dark green teardrop shape is overlaid on the right side of the image, containing the text 'COMISSÕES JULGADORAS' in white, bold, uppercase letters.

**COMISSÕES  
JULGADORAS**

COMISSÃO JULGADORA DAS CATEGORIAS MESTRE E DOUTOR, ESTUDANTE DO ENSINO SUPERIOR, MÉRITO INSTITUCIONAL ENSINO SUPERIOR E MÉRITO CIENTÍFICO

**Suzana Maria Gico Lima Montenegro**

**Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)**

Presidente da Comissão

**Ana Luiza Coelho Netto**

**Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)**

**Carlos André Bulhões Mendes**

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)**

**Cristina Celia Silveira Brandão**

**Universidade de Brasília (UNB)**

**José Roberto Campos**

**Universidade de São Paulo (USP)**

**Maria Lúcia Calijuri**

**Universidade Federal de Viçosa (UFV)**

**Rejane Helena Ribeiro da Costa**

**Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)**

COMISSÃO JULGADORA DAS CATEGORIAS ESTUDANTE DO ENSINO MÉDIO E MÉRITO INSTITUCIONAL ENSINO MÉDIO

**Eduardo Von Sperling**

**Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)**

Presidente da Comissão

**Anne Helene Fostier**

**Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)**

**Célia Regina Granhen Tavares**

**Universidade Estadual de Maringá (UEM)**

**Luiz Drude de Lacerda**

**Universidade Federal do Ceará (UFC)**

**Oscar de Moraes Cordeiro Netto**

**Universidade de Brasília (UNB)**

**Sandra Maria Feliciano de Oliveira e Azevedo**

**Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)**

**Yvonilde Dantas Pinto Medeiros**

**Universidade Federal da Bahia (UFBA)**



**PARCEIROS**

## CNPq

Com 63 anos de existência, o CNPq tem exercido um papel central no processo de formação e qualificação de recursos humanos, no País e no exterior, e no fomento à ciência, à tecnologia e à inovação, atuando na formulação de políticas e contribuindo, de forma significativa, para o avanço da fronteira do conhecimento, do desenvolvimento sustentável e da soberania nacional.

A concessão de prêmios é uma ação tradicional do CNPq desde a década de 1970. O Prêmio Jovem Cientista, criado em 1981, tem sido estratégico, uma vez que, ao impulsionar a capacitação de estudantes, jovens pesquisadores e profissionais empenhados na busca de soluções para os crescentes desafios da sociedade brasileira, agrega valor a uma perspectiva ampliada da interação ciência-tecnologia-sociedade, a partir de uma atuação científica que tem na apropriação social do conhecimento um princípio vital.

O Prêmio Jovem Cientista representa um grande estímulo para a ciência e a tecnologia no Brasil e apoia os ganhadores com bolsas de estudo do CNPq, em diferentes modalidades (iniciação científica júnior, iniciação científica, mestrado, doutorado e pós-doutorado júnior), para sua formação acadêmica e como incentivo ao aprofundamento e continuidade de suas pesquisas.

Nossos jovens e talentosos cientistas são fundamentais nesse esforço tão cheio de desafios e incertezas.



SHIS Quadra 1 Conjunto B, Blocos A, B, C e D  
Edifício Santos Dumont | Lago Sul | 71605-001 | DF  
Tel.: 0800 619697 | [www.cnpq.br](http://www.cnpq.br)

## GERDAU

A Gerdau é líder no segmento de aços longos nas Américas e uma das principais fornecedoras de aços longos especiais do mundo. Com mais de 45 mil colaboradores, possui operações industriais em 14 países – nas Américas, na Europa e na Ásia –, as quais somam uma capacidade instalada superior a 25 milhões de toneladas por ano. É a maior recicladora da América Latina e, no mundo, transforma, anualmente, milhões de toneladas de sucata em aço, reforçando seu compromisso com o desenvolvimento sustentável das regiões onde atua. Com mais de 130 mil acionistas, a Gerdau está listada nas bolsas de valores de São Paulo, Nova Iorque e Madri.

A empresa tem construído, ao longo de sua trajetória, uma atuação sustentável, promovendo o desenvolvimento social, respeitando o meio ambiente e investindo em relações sólidas e duradouras com clientes, fornecedores, colaboradores, governos, outras empresas e entidades do terceiro setor. Tudo isso com o objetivo de ganhos mútuos, que possibilitem crescimento contínuo.

Como parte fundamental das contribuições para o desenvolvimento das comunidades, a empresa incentiva o Prêmio Jovem Cientista, uma parceria consolidada, na qual a Gerdau aposta com a convicção de que o caminho do desenvolvimento e da competitividade passa pela inovação e pelo fomento à pesquisa científica, especialmente dentro da sala de aula. Os jovens premiados nesta edição, que tem como tema **Água: Desafios da Sociedade**, e nas edições anteriores orgulham o Brasil pela seriedade e alta qualidade dos trabalhos. Todos os participantes, do ensino médio e do ensino superior, demonstram disciplina e dedicação à Ciência. É preciso apoiá-los se quisermos ter um Brasil verdadeiramente competitivo, capaz de gerar soluções eficazes e que resultem em um desenvolvimento sustentável.



Av. Farrapos, 1.811  
90220-005 | Porto Alegre | RS  
Tel.: (51) 3323-2000 | [www.gerdau.com.br](http://www.gerdau.com.br)

## GE

A GE é uma companhia de tecnologias avançadas, serviços e finanças que busca solucionar os desafios mais complexos do mundo. Dedicada a inovações em energia, saúde, transporte e infraestrutura, a GE opera em mais de 160 países e emprega cerca de 300 mil funcionários globalmente.

No Brasil, a companhia mantém atividades há 94 anos, com escritórios distribuídos em diversos estados e unidades industriais em São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Todos os negócios industriais da GE estão presentes no Brasil, empregando cerca de 8 mil funcionários.

A GE também está construindo no Brasil o seu quinto Centro de Pesquisas Global, que será inaugurado no Rio de Janeiro e já trabalha para desenvolver soluções de alta tecnologia para atender as necessidades locais de infraestrutura. A escolha do Brasil reflete a convicção sobre a capacidade criativa e inovadora dos brasileiros.

Por acreditar na importância do desenvolvimento científico, a GE patrocina e apoia o Prêmio Jovem Cientista, responsável por estimular a pesquisa e a descoberta de soluções inovadoras no Brasil. Para a GE, apostar na criatividade é essencial para o desenvolvimento da pesquisa e da ciência. Faz parte do DNA da companhia apoiar o desenvolvimento de soluções, não apenas para as questões ligadas à água – que foi o tema da edição 2013 do Prêmio –, mas também temas que exijam inovações e ideias capazes de levar entusiasmo, motivação e qualidade de vida às atuais e futuras gerações.



Av. Magalhães de Castro, 4.800, 10º andar  
05676-120, São Paulo, SP  
Tel.: (11) 3067-8000 | [www.ge.com.br](http://www.ge.com.br)

## FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO

Nos seus mais de 30 anos, a Fundação Roberto Marinho vem atuando nas áreas ambiental, educacional e cultural, criando modelos e metodologias que são replicados por meio de parcerias com agentes públicos e privados.

São experiências como o Telecurso, que já formou milhares de brasileiros na educação básica; o Telecurso Tec e o Qualifica, dois projetos da educação profissional; e o Canal Futura, um modelo de TV participativa, educativa e inclusiva, que tem como base parcerias que mobilizam redes da sociedade em todos os estados brasileiros.

A Fundação já fez campanhas de preservação do patrimônio, restaurou prédios, monumentos e documentos e propôs soluções para a sustentabilidade de cada um. Ao perceber que patrimônio é tudo aquilo que dá identidade a um povo, criou o Museu da Língua Portuguesa, o primeiro do mundo no gênero. Também concebeu o Museu do Futebol, que conta a história do País pelo viés sociológico do esporte mais popular entre os brasileiros.

No Rio, criou o Museu de Arte do Rio, inaugurado em março de 2013, e desenvolve outros dois, o Museu da Imagem e do Som e o Museu do Amanhã. Ao aliar educação, sustentabilidade, tecnologia, meios de comunicação e cultura, os novos museus sintetizam a trajetória da instituição.

Num país que abriga 60% da Floresta Amazônica, seis biomas e 12% de toda a água doce do mundo, a Fundação mantém no ar, há mais de 20 anos, o Globo Ecologia, primeiro programa de televisão totalmente voltado a questões socioambientais.

A Fundação também produz, desde 1984, o Globo Ciência, primeiro programa semanal de divulgação técnico-científica do Brasil. Em 2012, criou o Florestabilidade, um projeto de educação que visa despertar vocações para carreiras ligadas ao manejo florestal e oferecer recursos pedagógicos para professores e técnicos da extensão rural da Amazônia.

E se orgulha de ser, há mais de 30 anos, parceira do Prêmio Jovem Cientista – iniciativa que, além de estimular jovens talentos a investigar as fórmulas para um mundo melhor, ajuda, sobretudo, a construir um Brasil mais sustentável e desenvolvido.



Rua Santa Alexandrina, 336 | Rio Comprido  
20261-232 | Rio de Janeiro | RJ  
Tel.: (21) 3232-8800 | [www.frm.org.br](http://www.frm.org.br)