

## **HIDRO\_CLIM: FERRAMENTA PARA INTEGRAÇÃO DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, POTENCIAL HIDRÁULICO E CLIMA**

*Heloisa Teixeira Firmo<sup>1</sup>, Eduardo Barbosa Correa<sup>2</sup>, Eduardo Marques<sup>3</sup>, João Leonardo da Silva Soito<sup>4</sup>, Lázaro Costa Fernandes<sup>5</sup>, Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas<sup>6</sup>, Maximiliano Andrés Strasser<sup>7</sup> e Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora<sup>8</sup>*

<sup>1</sup> Professora Adjunta do DRHIMA (Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente), da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Caixa Postal 68.5710. E-mail: l.

<sup>2</sup> Doutorando do Laboratório de Hidrologia - Programa de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Email: ebcorrea@coc.ufrj.br

<sup>3</sup> Professor Assistente da Universidade Federal Fluminense. Email: emarques@ic.uff.br

<sup>4</sup> Doutorando do Programa de Planejamento Energético (PPE/COPPE-UFRJ). Email: jsoito@furnas.com.br

<sup>5</sup> Pesquisador do Instituto Internacional de Mudanças Globais (IVIG), COPPE/UFRJ. Email: maxi\_strasser@hotmail.com.

<sup>6</sup> Doutorando do programa de Engenharia Civil PEC/COPPE-UFRJ. Email: lazaro@ivig.coppe.ufrj.br}

<sup>7</sup> Professor Adjunto do Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPE/COPPE-UFRJ). Email: mfreitas@ppe.coppe.ufrj.br.

<sup>8</sup> Professora Adjunta da Universidade Federal Fluminense. Email: lazaro@ivig.coppe.ufrj.br.

**RESUMO** — A gestão dos múltiplos usos dos recursos hídricos em bacias hidrográficas com potencial hídrico relevante é uma questão complexa, especialmente se os efeitos das alterações climáticas são considerados. Modificações no comportamento da precipitação podem alterar significativamente os caudais dos rios, e implica mudanças na produção de energia hidrelétrica. O Hidro\_Clim é uma ferramenta de apoio à decisão que utiliza um sistema de informação geográfica (SIG) com diversos mapas temáticos. Através de um modelo hidrológico e simulações que avalia precipitações futuro, esta ferramenta poderá avaliar as consequências das mudanças climáticas no potencial hidráulico das bacias do rio Tocantins. Este efeito pode ser combinado com usos múltiplos para reduzir uma energia hidrelétrica produzida. Os mapas criados como resultados dessa análise serão assimilados pelo SIG, tornando uma ferramenta dinâmica para apoiar as decisões relativas aos sistemas ambientes, como as bacias hidrográficas do bioma amazônico.

**ABSTRACT** — The management of multiple uses of water resources in river basin with relevant hydraulic potential is a question complex, specially if climate changes effects are considered. Modifications in precipitation behavior can alter river flows significantly, and it implies changes in hidroelectric energy production. The Hidro\_Clim is a support decision tool that uses a geographic information system (GIS) with several thematics maps. Via hydrological model and simulations that evaluates future precipitations, this tool could evaluate the consequences of climate changes in hydraulic potential of Tocantins river basin. This effect can be combined with multiple uses to reduces an hidroelectric energy produced. The maps created as results of this analisys will be assimilated by GIS, making a dinamyc tool to support decisions concerning environments systems, like the river basins of Amazonic biome.

**Palavras-chave:** hidroeletricidade, mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos.

## 1 - INTRODUÇÃO

Constituiu-se tarefa complexa desenvolver uma metodologia de avaliação do potencial hidráulico integrada à gestão dos recursos hídricos e clima. As incertezas nas variáveis climatológicas e no uso da água se contrapõem à certeza da necessidade de aproveitamento dos recursos energéticos das bacias do Norte do Brasil, de forma a atender à demanda crescente de energia num momento de expressivo crescimento econômico no país.

A pesquisa tem por objetivo geral avaliar com maior precisão o risco e aumentar as possibilidades de uso consciente dos recursos hídricos nos aproveitamentos hidráulicos, levando em consideração os efeitos antrópicos e climáticos no uso atual e futuro da água e da energia em bacias hidrográficas de alto interesse ao setor elétrico brasileiro.

Como objetivo específico, visa propiciar informações consolidadas e georreferenciadas sobre as principais variáveis para a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos, dos potenciais hidráulicos e do clima na bacia do rio Tocantins.

A bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia localiza-se entre 2° S e 18° S de latitude e 46° W e 55° W, abrangendo os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Pará, Maranhão e Distrito Federal. Sua configuração é alongada no sentido longitudinal, seguindo as diretrizes dos dois cursos d'água que a formam, o rio Tocantins e o rio Araguaia. Possui uma área de drenagem de aproximadamente 763.614 km<sup>2</sup>, dos quais 384.460 km<sup>2</sup> pertencem à bacia do rio Araguaia (Agência Nacional das Águas - ANA).

A bacia Tocantins-Araguaia é dividida em diversas sub-bacias, com diferentes áreas de drenagem, de acordo com a utilização dos recursos hídricos pelos diversos aproveitamentos hidrelétricos existentes ou em construção.

A metodologia Hidro\_Clim inclui um Sistema de Informações Geográficas e alguns modelos matemáticos utilizados de forma a permitir análises e simulações de eventos extremos, bem como cenários de usos múltiplos atuais e futuros dos recursos hídricos (COPPETEC, 2010).

## 2 – METODOLOGIA

Esse artigo apresenta uma descrição sucinta dos ferramentais disponíveis e utilizados (modelos SMAP e SisUCA para a bacia do rio Tocantins) e desenvolvido (modelo matemático SisEVT) e das inter-relações entre seus componentes.

A figura 1 a seguir constitui-se de uma representação esquemática da metodologia Hidro\_Clim, que está sendo implementada na bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia, mas que poderia ser aplicada em outras bacias hidrográficas.

A metodologia compreende um Módulo Espacial, composto essencialmente por um Sistema de Informações Geográfica (SIG). Esse SIG contém uma base de dados parcialmente utilizada para a execução dos modelos que compõem o Módulo Hidro-Energético.

Esse Módulo Hidro-Energético pode ser descrito da seguinte maneira: foram efetuadas projeções climáticas futuras, que permitiram determinar séries de dados de chuva para analisar o possível comportamento das vazões das bacias hidrográficas. Os dados obtidos através dessa metodologia foram utilizados para calibração e simulação do modelo SMAP mensal.

Para rodar o SMAP, dentre outras informações, são utilizadas séries de dados de evapotranspiração, que foram geradas por intermédio de cálculos efetuados pela ferramenta desenvolvida SisEVT. As etapas de calibração e validação foram realizadas a partir dos dados de vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos obtidos junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Finalmente, o modelo SisUCA simula a operação da cascata de usinas hidrelétricas da bacia considerada e permite avaliar o impacto de eventos extremos e dos cenários de usos consuntivos da água nessas bacias.

O aplicativo SisEVT – Sistema para Estimativa da Evapotranspiração foi elaborado em linguagem Delphi para geração de séries históricas mensais de evapotranspiração potencial e evapotranspiração real em qualquer ponto de interesse no território brasileiro como, por exemplo, um aproveitamento hidrelétrico.

São descritos a seguir os modelos SisEVT e SisUCA, as hipóteses adotadas para a elaboração dos cenários climáticos futuros, o SMAP mensal, utilizado nas simulações das bacias do Tocantins e do Madeira. O item 3 consta de Resultados e Discussões e o item final apresenta algumas conclusões do presente artigo.

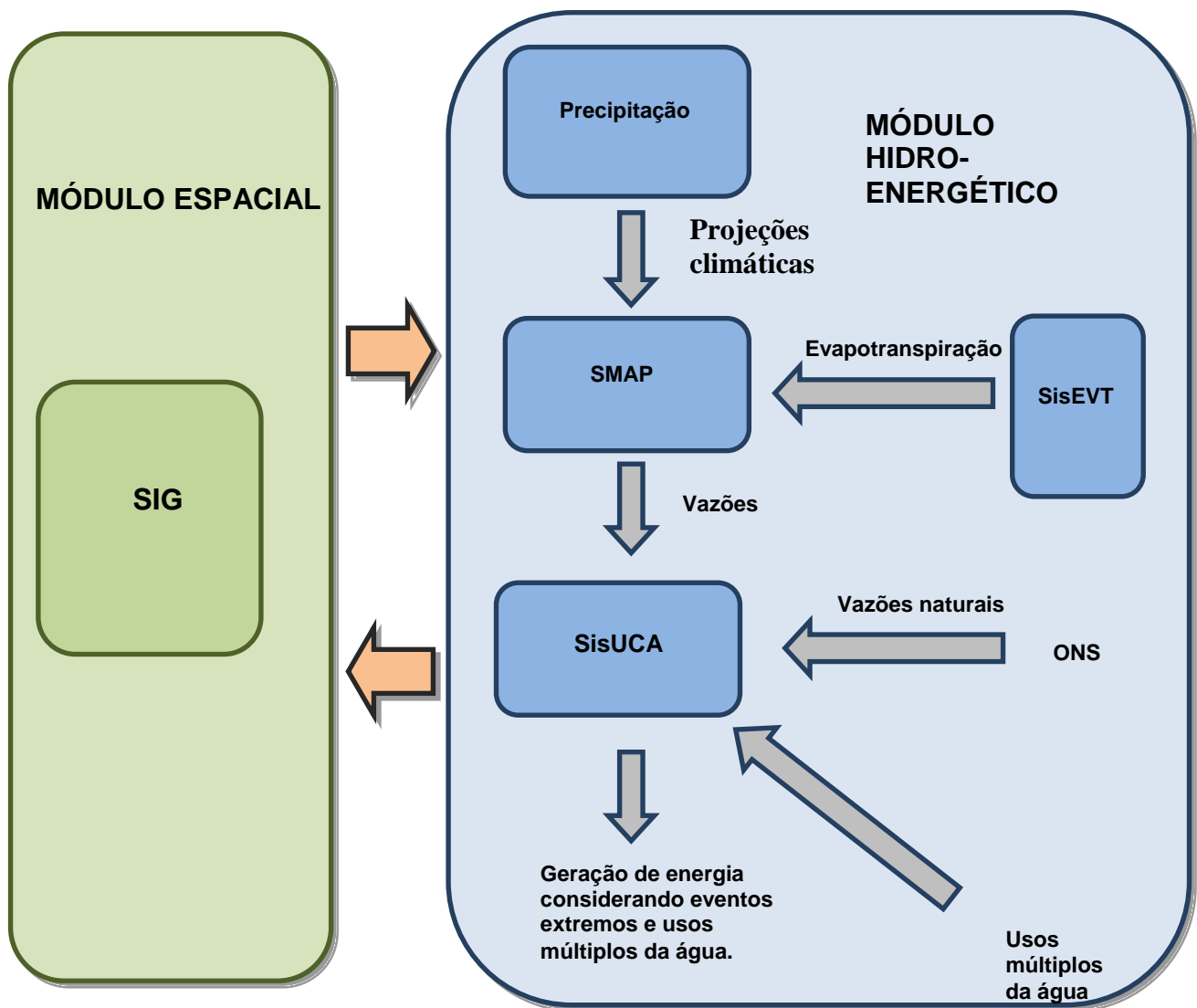


Figura 1 - Representação esquemática do Hidro-Clim.

### O aplicativo SisEVT

O banco de dados do aplicativo foi estruturado ao molde ao Sistema para Estimativa de Usos Consuntivos da Água – SEUCA que é adotado no cálculo dos usos da água para irrigação, dessedentação animal, abastecimento rural, urbano e industrial, servindo de apoio ao Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS e a Agência Nacional de Águas - ANA.

Tal como o SEUCA, são apresentadas informações de normais climatológicas (1931-1960 e 1961-1990) de temperaturas média, máxima e mínima; velocidade do vento; umidade relativa e insolação. Os dados de precipitação estão disponíveis para outras estações, já não mais meteorológicas e sim pluviométricas.

As variáveis climatológicas envolvidas no processo de estimativa da evapotranspiração de referência ou potencial e da evapotranspiração real são: evaporação, transpiração, evapotranspiração, a evapotranspiração de referência e evapotranspiração real.

Segundo Doorenbos & Pruitt (1977), a escolha do método para se estimar a evapotranspiração está condicionada à precisão dos dados meteorológicos medidos durante alguns anos. Já Samani (2005) menciona que as formulações matemáticas propostas para o cálculo da evapotranspiração variam desde equações complexas que necessitam de dados climatológicos detalhados (Penman-Monteith) até as mais simples que demandam dados climatológicos de fácil mensuração (Blaney-Cridle e Hargreaves-Samani). A equação de Penman-Monteith é recomendada em virtude do seu embasamento teórico, entretanto os dados requeridos nem sempre estão disponíveis. Com base no exposto foram selecionados três métodos empíricos de determinação da evapotranspiração de referência, a saber: Penman-Monteith; Hargreaves-Samani e Blaney-Cridle. Os três métodos encontram-se disponíveis no SisEVT para o usuário aplicar.

Para o cálculo da evapotranspiração real foram selecionados o método do balanço hídrico climatológico, desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), e o método Complementary Relationship Areal Evapotranspiration – CRAE, desenvolvido por Morton (1976, 1978, 1983a).

Os dados climatológicos disponibilizados no aplicativo são oriundos do SisVazNat – Sistema de Reconstituição de Séries de Vazões Naturais, consubstanciado em Hora & Marques (2010). O banco de dados possui informações das variáveis temperaturas média, máxima e mínima; velocidade do vento; umidade relativa e insolação por períodos de normais climatológicas (1931-1960 e 1961-1990) ou por média de longo período. Os dados de precipitação estão disponíveis para outras estações, já não mais meteorológicas e sim pluviométricas.

Os valores de precipitação mensal observada em cada uma das estações pluviométricas disponíveis na base de dados da ANA, desde 1931 até 2005, foram transferidos para as estações climatológicas através da interpolação espacial, ou espacialização, pelo método do inverso do quadrado da distância entre as estações pluviométricas e as climatológicas.

As variáveis evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), evapotranspiração real (ETR) e evapotranspiração potencial (ETP) foram calculadas em cada estação climatológica e armazenadas no sistema. Ao usuário é dada a opção para escolha do método de cálculo, bem como do local de interesse. Com base nessas escolhas, o SisEVT irá transferir as variáveis para o ponto definido pelo usuário pelo inverso do quadrado da distância.

Para calcular as variáveis evapotranspiração potencial e evapotranspiração real em qualquer ponto de interesse é necessário iniciar o aplicativo e escolher dentre os métodos disponíveis: o clássico (que consiste na combinação das equações de Penman-Montheith, Hargreaves-Samani ou Blaney-Cridle com Thornthwaite) ou pelo modelo de Morton.

Caso o usuário queira calcular as variáveis em um ponto qualquer, ele deverá digitar as coordenadas do ponto e o ano inicial e final correspondente ao período desejado. Nessa condição, o cálculo das variáveis é efetuado com base na interpolação dos dados existentes nos postos climatológicos até o ponto de interesse.

### **O modelo SisUCA**

O modelo SisUCA (Sistema de Simulação de Usinas com Usos Consuntivos de Água) (Hora, 2008), busca simular ocorrências de usos múltiplos e seus impactos na geração de energia numa cascata de usinas.

A metodologia proposta para a compatibilização do uso dos recursos hídricos faz uso do Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas (MSUI), com enfoque nos recursos hídricos e na sua disponibilidade para todos os usuários, inclusive o setor elétrico.

Para tal, buscou-se introduzir uma nova variável na formulação matemática desenvolvida pelo MSUI que representa as *retiradas de água*. O limite da variável é dado pela vazão máxima outorgável (VMO), que é a vazão máxima permitida para uso, conforme a Lei 9.433/97. Os órgãos públicos gestores dos recursos hídricos a utilizam para calcular as disponibilidades hídricas para a emissão e o controle de outorgas.

Apesar desta inovação, a operação da usina hidrelétrica continua sendo representada pela equação do balanço hídrico:

$$\Delta V_i = [Q_{aflu_i} - Q_{turb_i} - Q_{vert_i} - Q_{evap_i}] \cdot ns$$

onde:

$$\Delta V_i = \text{variação do volume da usina } i, \text{ em m}^3$$

$$Q_{aflu_i} = \text{vazão afluyente à usina } i, \text{ em m}^3/\text{s}$$

$$Q_{turb_i} = \text{vazão turbinada na usina } i, \text{ em m}^3/\text{s}$$

$$Q_{vert_i} = \text{vazão vertida na usina } i, \text{ em m}^3/\text{s}$$

$$Q_{evap_i} = \text{vazão evaporada no reservatório da usina } i, \text{ em m}^3/\text{s}$$

$$ns = \text{número de segundos de um mês médio e igual a } 2,6298 \times 10^6.$$

Outro conceito amplamente utilizado na metodologia proposta é a *série de vazões naturais*. A vazão natural corresponde àquela que ocorreria em uma determinada seção de um rio caso não houvesse o efeito das ações antrópicas na bacia contribuinte. De outra forma, pode-se dizer que é a vazão que existiria se fossem retirados os efeitos da operação dos reservatórios a montante e somando-se as vazões relativas à evaporação líquida nos reservatórios e incorporando-se, também, as vazões referentes aos usos consuntivos da água na bacia: irrigação, criação animal e abastecimento urbano, rural e industrial (ONS, 2007).

A série de vazões naturais é utilizada para o cálculo das energias asseguradas das usinas bem como para o planejamento e a programação da operação do Sistema Nacional Interligado, segundo a resolução

autorizativa da ANEEL nº 243, de 2004. As séries também auxiliam estudos específicos elaborados pelo ONS, como a definição de curvas de aversão ao risco de racionamento ou como o cálculo do rateio dos recursos da compensação financeira pelo uso dos recursos hídricos (ANEEL, 2004).

Na formulação desenvolvida, a vazão afluyente passa a contabilizar cenários de retiradas de água a montante de cada aproveitamento de uma cascata, permitindo ao tomador de decisão analisar a evolução das possíveis perdas de geração de energia em função do incremento dos usos consuntivos, limitados ao valor da vazão máxima outorgável.

### Projeções climáticas

Atualmente, a questão das mudanças do sistema climático tem recebido grande foco da sociedade. Cientistas em todo o planeta têm se debruçado sobre esta problemática, para avaliar como a dinâmica atmosférica poderá interferir nas sociedades humanas.

Um dos maiores temas em debates nessa questão é a avaliação de até que ponto as ações antrópicas provocam e/ou aceleram as mudanças no sistema atmosférico. Caso as ações humanas afetem o clima, é possível que as emissões dos gases de efeito estufa (GEEs) sejam os principais agentes dessas alterações.

Nesse ponto, o Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) acredita que as ações humanas são importantes para as mudanças climáticas, sendo o efeito dessas mudanças um possível aquecimento planetário. As conclusões pelos grupos de estudos do IPCC estão baseadas em modelos climáticos que tentam estimar como a atmosfera se comportará no futuro.

Por intermédio de investigações apoiadas pela modelagem numérica, foi constatado que as forças naturais não provocam as mudanças nas temperaturas observadas recentemente no planeta. Todavia, quando se avaliam as pressões antropogênicas (emissões de GEEs e particulados), os modelos climáticos aproximam seus resultados em relação às observações. A Figura 2 mostra uma esquematização das forças radiativas que impactam o sistema climático (IPCC, 2007).

Como se percebe, segundo os estudos compilados pelo IPCC, o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) representa a maior componente para o aquecimento atmosférico. De outra maneira, os aerossóis, principalmente aqueles que agem como núcleos de condensação e contribuem para a formação de tempestades, representam a maior componente de resfriamento.

No esquema do IPCC, a irradiância solar é a única causa natural relevante no tocante às mudanças climáticas e esta representa pequena força de aquecimento. Todavia, o vulcanismo também influencia a dinâmica atmosférica, lançando grandes volumes de particulados no sistema. Como consequência dessas atividades há um resfriamento local, podendo abranger grandes áreas do globo por várias semanas, meses ou anos. Mas, a incerteza acerca de quando, como e onde haverá uma nova erupção é um desafio a ser superado.

No somatório das forças radiativas, o saldo é positivo. Isso indica que a tendência seria de aquecimento global. Nessa linha, os modelos climáticos sinalizam que a temperatura média do planeta no século XXI pode aumentar a nível críticos para a dinâmica social atual.

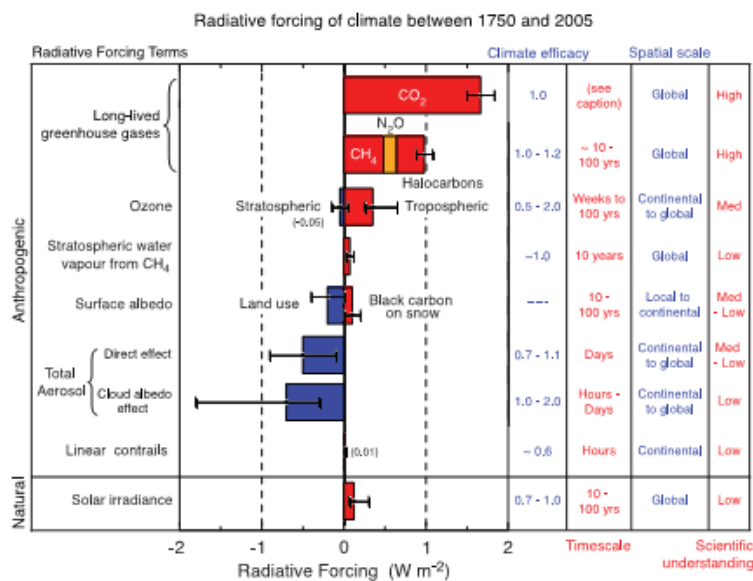


Figura 2 – Avaliação do impacto da forças radiativas no sistema climático. Fonte: IPCC, 2007.

A avaliação e tomada de decisão acerca da gestão dos recursos hídricos pode ser abordada quando o pior cenário do ponto de vista hidroenergético é concebido. Tal cenário refletiria uma apreciável redução nos montantes pluviométricos e aumento da evapotranspiração da bacia hidrográfica. Este cenário é bem refletido quando os impactos do aquecimento global são avaliados.

Para estudar como os aproveitamentos energéticos da bacia de interesse poderão ser afetados pelas mudanças climáticas, duas vertentes serão investigadas como potenciais metodologias nos estudos de impacto das mudanças climáticas sobre a vazão e, conseqüentemente, a geração hidroelétrica.

Em primeiro lugar, as saídas dos modelos utilizados no quarto relatório do IPCC (4AR, 2007) para a climatologia do século XX serão confrontadas com a climatologia dos dados observados nas proximidades dos aproveitamentos hidroelétricos. As saídas de 18 dos modelos utilizados estão disponíveis no site do Earth System Grid Project (ESG).

Através do software Grads, foram extraídos pontos geográficos para confrontar a saída do modelo com as estações representativas de cada aproveitamento hidroelétrico em análise. As séries históricas das estações foram obtidas através do HIDROWEB/ANA ([hidroweb.ana.gov.br](http://hidroweb.ana.gov.br)), sendo a relação dos modelos climáticos avaliados listada na tabela 1.

Tabela 1 – Lista das estações utilizadas para a avaliação dos modelos climáticos nas bacias hidrográficas do Tocantins e Madeira.

MODELO	INSTITUIÇÃO	PAÍS
BCM2.0	BJERKNES CENTRE FOR CLIMATE RESEARCH	Noruega
CGCM3.1-T63	CANADIAN CENTRE FOR CLIMATE MODELLING AND ANALYSIS	Canadá
CSIRO Mk3.0/3.5	COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION	Austrália
GFDL CM2.0	NOAA GEOPHYSICAL FLUID DYNAMICS LABORATORY	Estados Unidos
GISS	NASA GODDARD INSTITUTE FOR SPACE STUDIES	Estados Unidos
FGOALS1.0	INSTITUTE OF ATMOSPHERIC PHYSICS	China
ECHAM 4.6	NATIONAL INSTITUTE OF GEOPHYSICS AND VOLCANOLOGY	Itália
INMCM3.0	INSTITUTE FOR NUMERICAL MATHEMATICS	Rússia
IPSL-CM4 V1	Institue Pierre Simon Laplace	França
MIROC3.2	Center for Climate System Research	Japão
MPI-ECHAM4/5	Max Planck Institut für Meteorologie	Alemanha
MRI-CGCM2.3.2A	METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE	Japão
NCAR-CCSM3.0/PCM1	National Center for Atmospheric Research	Estados Unidos
UKMO_HADCM3/ HADGEM1	HADLEY CENTRE FOR CLIMATE PREDICTION	Reino Unido

Cada modelo climático com valor mensal de precipitação será confrontado com os respectivos valores obtidos pela série histórica de cada posto pluviométrico. Índices estatísticos serão utilizados para avaliar qual dos modelos melhor caracteriza a climatologia dos locais de interesse. Os índices estatísticos utilizados estão expressos a seguir:

Correlação que é calculada pela fórmula:

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x * \sum y}{n}}{\sqrt{(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}) * (\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n})}}$$

onde,

X é a variável independente, no caso, as observações;

Y a variável dependente, no caso, as saídas de cada modelo avaliado, e;

n o número amostral de pares observação/simulação.

O erro médio (EM) que avalia se o modelo tende a subestimar ou superestimar as observações também será utilizado, e tem como fórmula:

$$EM = (\sum \epsilon_i)/n$$

onde,

$\epsilon_i = X - Y$  para cada par amostral

Essa equação representa uma média das superestimativas e subestimativas. Se  $EM > 0$ , o modelo avaliado tem a tendência de subestimar mais que superestimar. Quando  $EM < 0$ , a tendência é de superestimativas maiores que subestimativas. Porém, se  $EM = 0$  duas coisas podem ocorrer: ou o modelo acerta exatamente todos os valores observados (modelo perfeito), ou existe um equilíbrio entre subestimativas e superestimativas.

De toda forma, avaliar apenas o erro médio não é suficiente, já que este índice leva em consideração o sinal positivo/negativo, mascarando o real valor do erro de cada modelo. Assim sendo, um índice estatístico que consiga avaliar como realmente o modelo se distancia do valor observado é necessário. Uma forma de avaliar tal valor de erro é a raiz do erro quadrático médio (REQM).

$$REQM = [(\sum \epsilon_i^2)/n]^{1/2}$$

Este índice estatístico torna todos os valores positivos, já que eleva as diferenças entre os valores observados e simulados ao quadrado.

Com a correlação, o erro médio e a raiz do erro quadrático médio é possível avaliar como cada modelo responde as variações dos valores observados, se o mesmo tem o vício de subestimar ou superestimar mais e qual a distância média entre o valor observado e aquele assinalado nas simulações dos modelos.

### **A Obtenção da Série Pluviométrica Futura**

Após decidir qual dos modelos melhor se ajusta aos dados observados, seus resultados para o futuro serão obtidos para a simulação que apresente o cenário mais crítico do ponto de vista pluviométrico. Essa série pluviométrica é um dos *inputs* do modelo hidrológico SMAP.

É preciso ressaltar que a resolução dos modelos climáticos não é a melhor para se avaliar a precipitação em escala tão reduzida quanto a escala de um aproveitamento hidroelétrico. O processo de *downscaling* seria indicado para melhorar a resposta dos modelos climáticos nos locais que se deseja utilizar a informação numérica.

Todavia, no caso das saídas dos modelos não expressarem satisfatoriamente a climatologia dos locais de interesse, a metodologia utilizada pode levar em conta a cenarização da série pluviométrica histórica.

Nesse caso, o *input* de precipitação do SMAP seria a série histórica de cada local, variando a quantidade de precipitação. Após analisar qualitativamente as projeções do IPCC e do INPE (2007), pode-se utilizar os resultados dos cenários mais pessimistas para o período de 2071-2100, que representa o período onde os efeitos do aquecimento global são mais críticos. Essa metodologia pode ser utilizada, caso seja constatado que as saídas presentes no ESG não possam ser utilizadas diretamente nos postos de interesse.

### **O modelo SMAP**

O SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) é um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão que apresenta estrutura simples e utiliza a separação do escoamento baseada nos parâmetros do Departamento de Conservação do Solo Norte-Americano (Soil Conservation Service – SCS, 1972). É um modelo determinístico, conceitual e concentrado cujo desenvolvimento baseou-se na experiência com a aplicação do modelo Stanford Watershed IV e o modelo Mero em trabalhos realizados no DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (Buchianeri, 2004). Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e, posteriormente, modificado para aplicações em versões horária e mensal.

O modelo SMAP, em sua versão original (Figura 4), foi configurado em modo diário, sendo constituído por três reservatórios lineares hipotéticos representando o reservatório do solo (R<sub>solo</sub>), o reservatório da superfície (R<sub>sup</sub>), correspondente ao escoamento superficial da bacia e o reservatório subterrâneo (R<sub>sub</sub>), correspondente ao escoamento subterrâneo da bacia (escoamento de base). Posteriormente, sua estrutura física foi adaptada para calcular vazões mensais. O modelo físico utilizado pela versão mensal é semelhante ao da versão diária, com a diferença que não utiliza o reservatório de superfície, pois a precipitação é toda convertida em escoamento superficial. Sendo assim ela utiliza apenas os reservatórios de solo e subterrâneo que representam o armazenamento e os fluxos na camada superior do solo e no aquífero.

A versão mensal foi escolhida para esse estudo levando em consideração a compatibilidade dos dados existentes para a região, além da utilização dos resultados mensais para geração dos cenários climáticos.

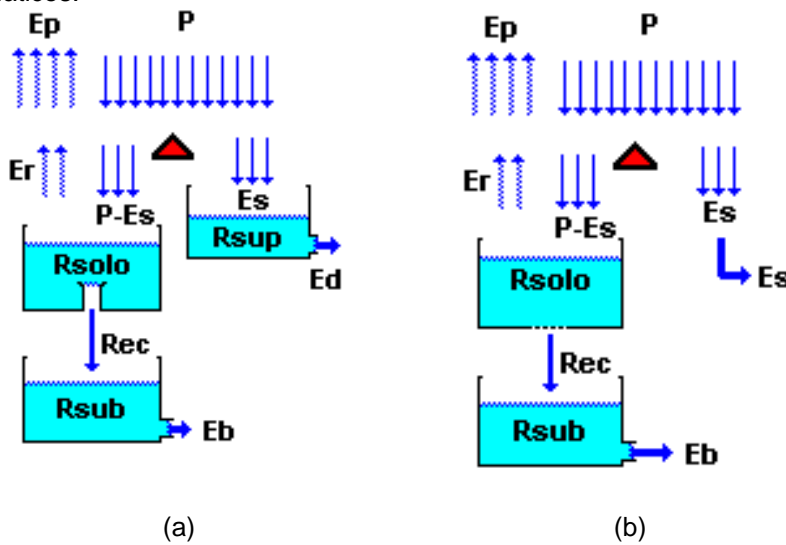


Figura 3: Modelo chuva vazão SMAP ; a) versão diária ; b) versão mensal

Os dados de entrada do modelo são os totais mensais de chuva ( $P_{(t)}$ ), os totais mensais de evapotranspiração potencial ( $Ep_{(t)}$ ) e as vazões médias mensais observadas em cada sub-bacia considerada no estudo ( $Q_{obs(t)}$ ).

O total médio de chuva ( $P_{(t)}$ ), utilizado pelo modelo, é calculado a partir das seguintes expressões:

$$Pm_{(t)} = P1_{(t)} * ke_1 + P2_{(t)} * ke_2 + P3_{(t)} * ke_3 + \dots + Pn_{(t)} * ke_n$$

$$P_{(t)} = Pm_{(t-3)} * kt_{(-3)} + Pm_{(t-2)} * kt_{(-2)} + Pm_{(t-1)} * kt_{(-1)} + Pm_{(t)} * kt_{(0)} + Pm_{(t+1)} * kt_{(+1)}$$

onde

$Pm_{(t)}$  : precipitação média observada na bacia, no instante de tempo t (mm).

$P1_{(t)}$  ;  $P2_{(t)}$  ; .. ;  $Pn_{(t)}$  : precipitação observada em cada posto pluviométrico da bacia, no instante de tempo t (mm).

$ke_1$  ;  $ke_2$  ; .. ;  $ke_n$  : coeficientes de representação espacial, computando o peso da precipitação de cada posto relacionado com a sua localização na bacia.

$kt_{(-3)}$  ;  $kt_{(-2)}$  ; .. ;  $kt_{(+1)}$  : coeficientes de representação temporal, computando os pesos da precipitação média dos três meses anteriores e do mês posterior ao mês da simulação.

Os coeficientes de representação espacial ( $ke_n$ ) e temporal ( $kt_n$ ) são utilizados devido à defasagem temporal que pode existir entre os picos de precipitação e de vazão quando se utiliza modelos concentrados, como o SMAP, em bacias com grandes tempos de concentração. Nessas bacias os modelos concentrados têm mais dificuldades de reproduzir esta defasagem quando utilizam apenas a precipitação média observada na bacia (Braga, 2009). Sendo assim, esses coeficientes são utilizados na fase de calibração do modelo para um melhor ajuste entre os hidrogramas observado e calculado.

Os valores mensais de evapotranspiração potencial foram obtidos a partir dos valores mensais de evapotranspiração potencial estimados pelo modelo SISEVAPO (Müller, 2001), para o reservatório localizado no exutório de cada trecho.

O funcionamento do modelo SMAP baseia-se na realização de um balanço de massa feito a cada evento de precipitação ( $P_{(t)}$ ), baseado no método do SCS. O balanço é iniciado com uma parcela de  $P_{(t)}$



sendo transferida como escoamento superficial ( $E_{s(t)}$ ) no solo. A lâmina restante da precipitação, subtraída do escoamento superficial ( $P_{(t)} - E_{s(t)}$ ), sofre perda por evaporação através da variável evaporação potencial ( $P_{(t)} - E_{s(t)} - E_{p(t)}$ ). O valor restante de precipitação é adicionado ao reservatório de solo  $R_{solo(t)}$ , que representa a camada superior do solo. Neste reservatório, a umidade do solo é atualizada ao longo do tempo através das perdas por evapotranspiração real ( $E_{r(t)}$ ), que dependem do nível do reservatório  $R_{solo(t)}$  e da capacidade de saturação do solo ( $Str$ ). Outra saída deste segundo reservatório representa a recarga do reservatório subterrâneo ( $Rec_{(t)}$ ), que é estimada com base na  $T_u$ , no  $R_{solo(t)}$  e no coeficiente de recarga ( $C_{rec}$ ). O nível d'água no reservatório  $R_{sub(t)}$  é então deplecionado a uma taxa constante de recessão do escoamento de base ( $K_{kt}$ ), resultando no escoamento de base ( $E_{b(t)}$ ) propriamente dito.

Para que o modelo se torne aplicável a uma região, são necessárias três etapas:

- **Calibração** consiste na estimativa dos parâmetros do modelo. Para isso, é necessário obter as vazões médias mensais em um período mínimo de 2 a 9 anos (Buchianeri, 2004), para a maior quantidade de postos possíveis na bacia hidrográfica a ser simulada. Os resultados das vazões calculadas serão comparados com as vazões observadas para o mesmo período.
- **Validação**: consiste na verificação dos valores dos parâmetros definidos na calibração. Essa verificação é feita utilizando-se os valores dos parâmetros estimados na calibração para o cálculo da vazão, em períodos diferentes daqueles adotados na etapa anterior.
- **Teste de desempenho do modelo**: nessa etapa são realizadas simulações propriamente ditas com o modelo, ou seja, serão utilizados os dados de precipitação originados dos cenários climáticos escolhidos para o cálculo da vazão. Nessa etapa, considera-se que o modelo encontra-se pronto para simular o comportamento da vazão o mais próximo possível da realidade, utilizando os valores dos parâmetros obtidos na calibração.

O processo de calibração, manual ou automático, consiste em estimar os parâmetros do modelo de modo que este represente bem os fenômenos que ocorrem na natureza. A forma mais simples e direta de avaliar a capacidade do modelo em representar os processos hidrológicos de uma bacia é comparando as vazões simuladas com as vazões observadas na natureza. A princípio, quanto mais próximas estiverem as séries simuladas e observadas de vazão, mais bem calibrado o modelo estará.

Na realidade, o processo de calibração de modelos hidrológicos é um problema de otimização, onde uma ou mais funções matemáticas, também conhecidas por funções objetivo, devem ser minimizadas ou maximizadas, estando o processo sujeito a restrições impostas ao espaço de busca dos parâmetros do modelo. O estabelecimento da função objetivo é uma das partes fundamentais na estimativa dos parâmetros e sua eficiência será medida através da comparação entre o hidrograma calculado pelo modelo e o hidrograma feito com as vazões observadas. O objetivo da calibração é aproximar o máximo possível os dois hidrogramas e a função objetivo busca medir a discrepância entre os valores simulados e observados para que possa ser minimizada.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### **Calibração e Simulação do Modelo SMAP para a Bacia do Tocantins-Araguaia**

Para o desenvolvimento dos estudos de modelagem chuva x deflúvio nas bacias dos rios Tocantins e Araguaia, buscou-se definir os aproveitamentos hidrelétricos considerados como base para as etapas de calibração e validação do modelo. Inicialmente, a topologia no rio Tocantins previa os aproveitamentos de Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado, Estreito e Tucuruí, entretanto, como o número de postos pluviométricos existentes entre o trecho intermediário das usinas de Serra da Mesa e São Salvador é insuficiente (4 postos), optou-se pela retirada das UHE São Salvador e Cana Brava e a inclusão destes postos no novo trecho intermediário entre as usinas de Serra da Mesa e Peixe Angical. Já no rio Araguaia, tendo em vista a grande distância entre os aproveitamentos de Couto Magalhães e Santa Isabel, optou-se pelo fluviométrico de São Félix do Araguaia (código 01150001) como sendo representativo do trecho médio do rio Araguaia e a UHE Santa Isabel da foz. A Figura 5 mostra a bacia com os aproveitamentos considerados no trabalho.

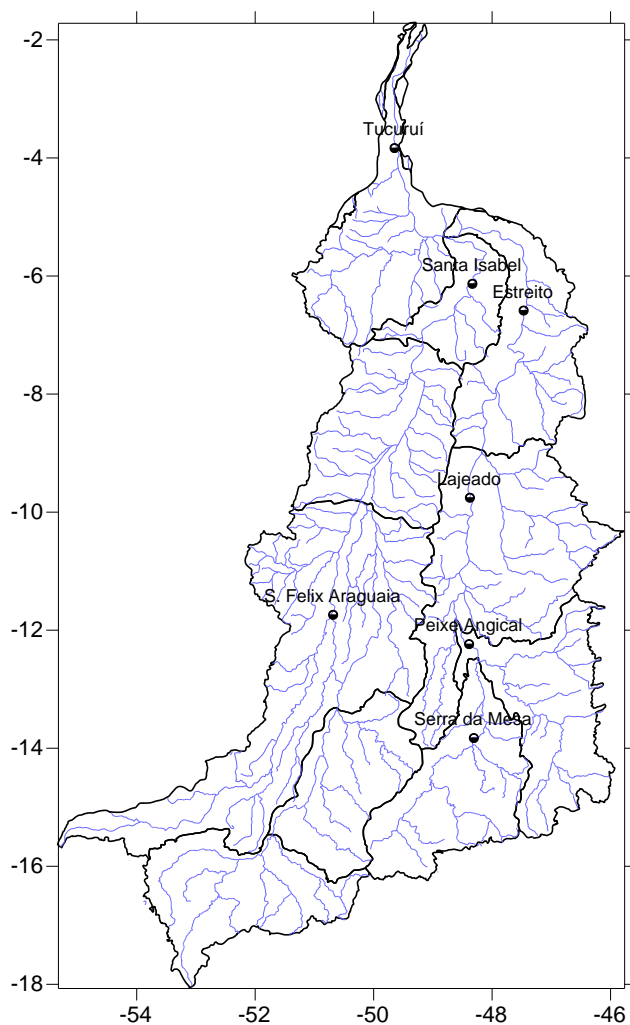


Figura 5: Bacia Tocantins-Araguaia com os aproveitamentos utilizados no trabalho.

A Tabela 2 mostra os aproveitamentos existentes na bacia do Tocantins-Araguaia e suas principais características.

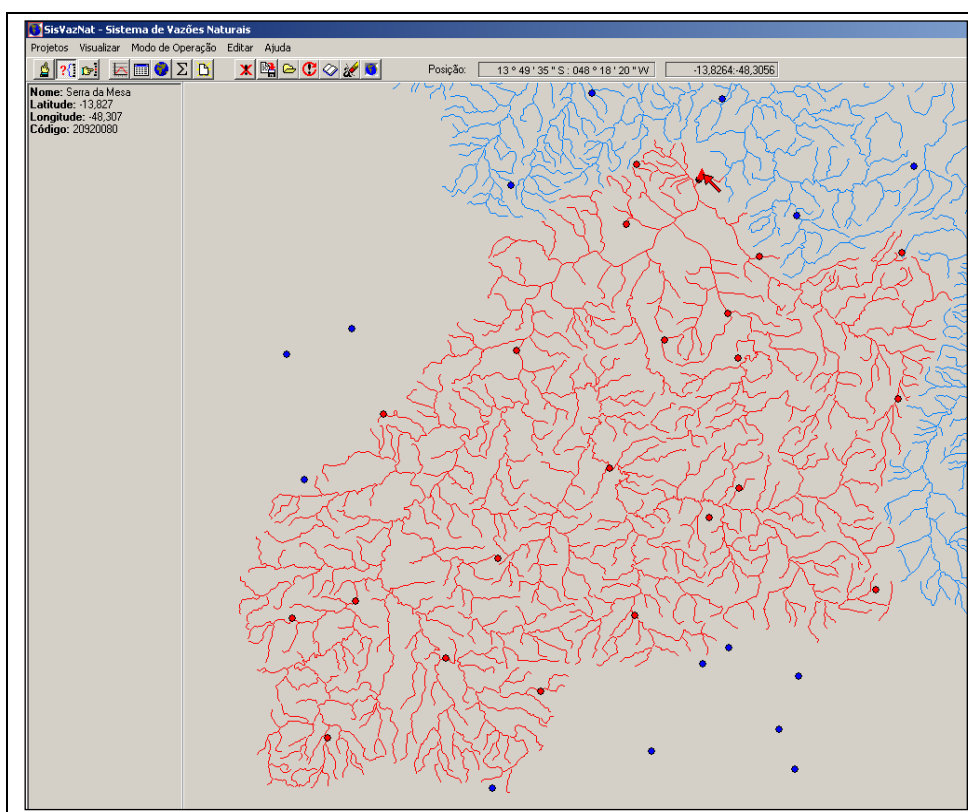
Tabela 2: Características dos aproveitamentos existentes na Bacia Tocantins-Araguaia						
Aproveitamento	Agente de Geração	Rio	Estágio	Área (km <sup>2</sup> )	Latitude	Longitude
Serra da Mesa	FURNAS	Tocantins	Operação	51.233	13° 49' 38"	48° 18' 28"
Cana Brava	TRACTEBEL	Tocantins	Operação	58.022	13° 24' 28"	48° 08' 32"
São Salvador		Tocantins	Projeto	63.704	12° 47' 59"	48° 14' 29"
Peixe Angical	ENERPEIXE	Tocantins	Construção	125.884	12° 14' 10"	48° 23' 16"
Luis E. Magalhães	INVESTCO	Tocantins	Operação	183.718	09° 45' 23"	48° 22' 28"
Estreito		Tocantins	Projeto	285.491	06° 35' 07"	47° 28' 02"
Couto Magalhães		Araguaia	Projeto	4.564	17° 09' 59"	53° 08' 26"
Santa Isabel		Araguaia	Projeto	375.495	06° 07' 56"	48° 19' 57"
Tucuruí	ELETRONORTE	Tocantins	Operação	757.577	03° 49' 59"	49° 38' 49"

A rede hidrometeorológica da bacia do Tocantins-Araguaia é composta por estações climatológicas do INMET e estações pluviométricas convencionais da ANA. Para o presente trabalho foram selecionados os dados com abrangência temporal entre 1931 e 2006, sendo que para a escolha dos postos foram

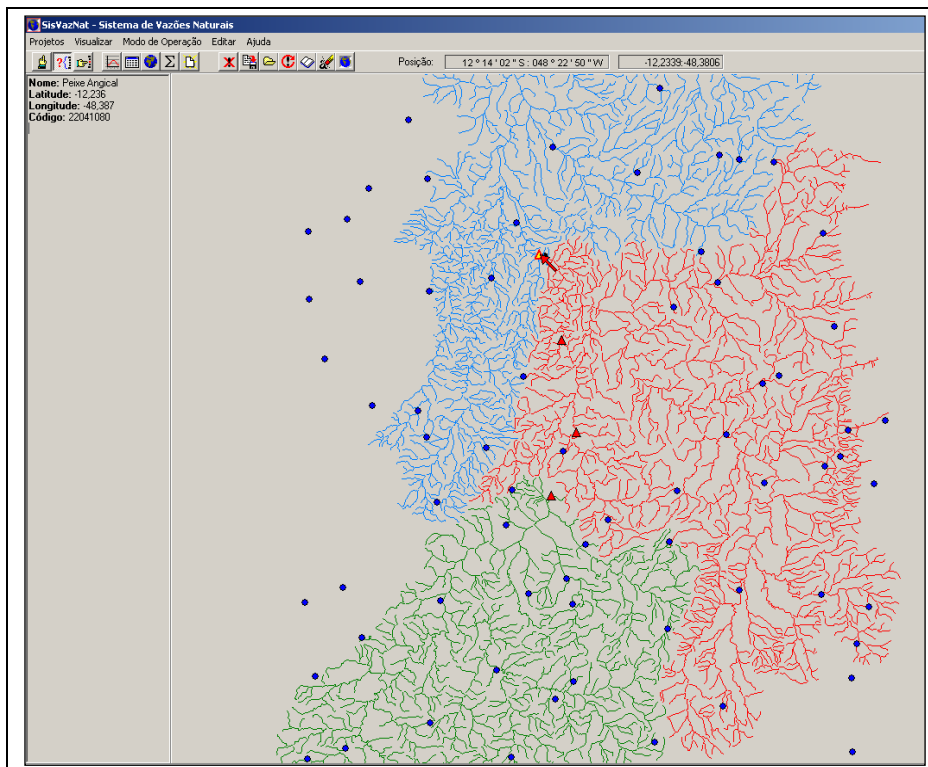
utilizados como critérios a localização e distribuição das estações em relação às usinas de interesse, a extensão e qualidade dos seus períodos de observação e o tamanho das áreas das bacias de drenagem. Foram incluídos apenas os postos com dados consistidos pela ANA, com, no máximo, 2 meses sem dados em cada ano.

Inicialmente foi consultado o banco de dados HIDROWEB da ANA, para verificar os postos existentes. Foram encontrados 352 postos pluviométricos, dos quais foram priorizados aqueles sob responsabilidade da ANA e operação pela CPRM e expurgados aqueles localizados à jusante da UHE Tucuruí e com séries históricas de curto período ou com muitas falhas (abaixo de 12 anos de observação). De maneira geral, buscou-se também visualizar a localização dos postos, evitando a sobreposição ou proximidade local entre dois ou mais postos.

Para a localização dos postos pluviométricos foi utilizada a ferramenta computacional SisVazNat, sistema generalizado para reconstituição de vazões naturais médias mensais em bacias hidrográficas para apoio ao Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH), desenvolvido em linguagem de programação Delphi, (Hora *et al.*, 2010). Para cada trecho incremental entre aproveitamentos hidrelétricos, foram destacados aqueles inseridos na área contribuinte incremental. As Figuras 6a-b mostram, respectivamente, os postos pluviométricos existentes a montante da UHE Serra da Mesa e no trecho incremental entre Serra da Mesa e Peixe Angical.



(a)



(b)

Figura 5: Localização dos Postos Pluviométricos a) montante da UHE Serra da Mesa ; b) trecho incremental entre as UHEs Serra da Mesa e Peixe Angical

Além disso, foram também analisados os postos pluviométricos considerados nos estudos desenvolvidos pelo Consórcio Themag-Aquavia para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 30/09/2002, no âmbito do projeto de reconstituição de séries históricas de vazões naturais na bacia do rio Tocantins. Dos 69 postos relacionados em ONS/THEMAG/AQUAVIA (2004), observou-se que alguns não pertenciam à bacia em estudo, outros são operados pelo INMET, e destes alguns possuem as mesmas coordenadas que os postos sob responsabilidade da ANA.

A Figura 6 mostra a distribuição dos postos que foram utilizados, ao longo da Bacia Tocantins-Araguaia.

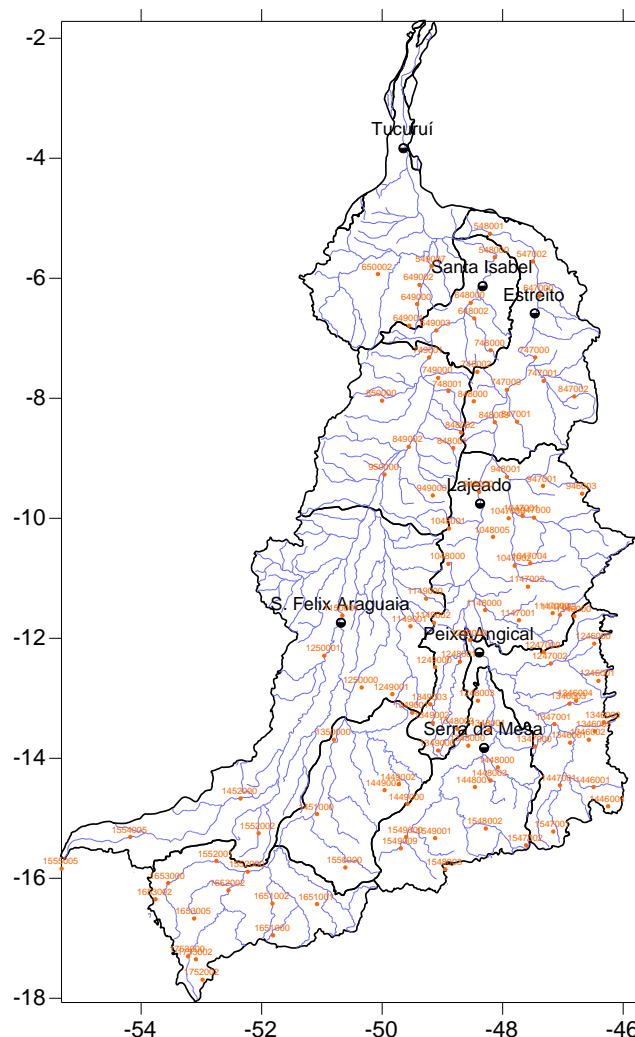
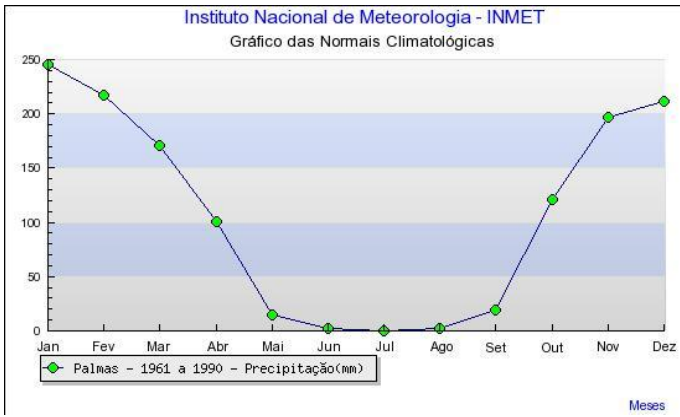


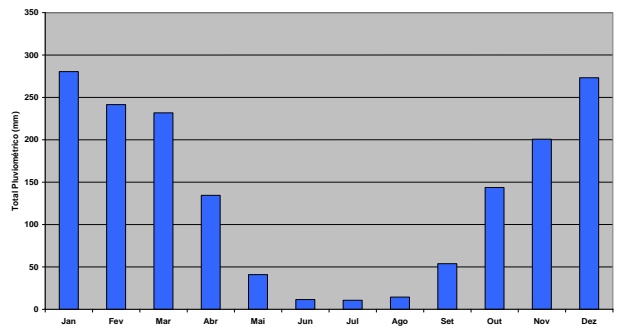
Figura 6: Distribuição dos postos pluviométricos escolhidos

Para a etapa de calibração dos parâmetros do modelo, são selecionados de dois a cinco períodos distintos, englobando situações hidrológicas diversificadas na bacia, ou seja, períodos com cheia anual baixa, média e alta. Uma vez calibrados os parâmetros, passa-se à etapa de validação dos mesmos, selecionando outros dois a cinco períodos distintos, diferentes dos usados na etapa de calibração. É importante utilizar nas duas etapas (calibração e validação) uma rede densa de estações pluviométricas de modo a assegurar uma maior distribuição espacial nos valores de precipitação observada na bacia, permitindo a obtenção de parâmetros do modelo mais representativos possíveis. Sendo assim, após a análise dos dados existentes, foram escolhidos os períodos de 1973 a 1983 para a calibração e os períodos de 1984 a 1994 para a validação do modelo SMAP.

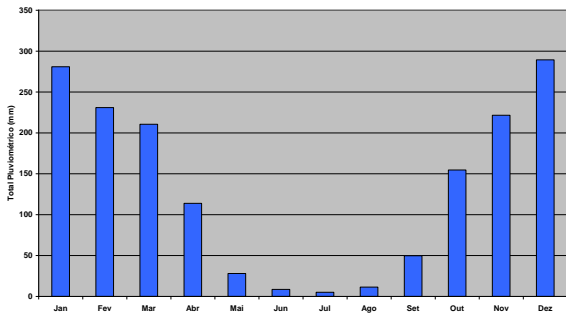
Realizado o inventário dos dados disponíveis, a etapa seguinte foi verificar o comportamento da precipitação ao longo da bacia para identificar os períodos secos e úmidos. Os pontos de monitoramento climatológico existentes na bacia do rio Tocantins pertencem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Em termos climáticos, verifica-se certa homogeneidade que confere a toda a região um clima tropical continental alternadamente úmido e seco. As variações sazonais da pluviosidade constituem o fator climático mais importante na região da bacia. Visando caracterizar o comportamento sazonal das chuvas ao longo da bacia, foram calculados os hietogramas de precipitações médias mensais de longo termo para cada aproveitamento e para a bacia inteira utilizando dados do período de 1973 a 1994. Os resultados foram comparados com a normal climatológica do período de 1961 a 1990 da estação de Palmas-TO do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no interior da bacia hidrográfica, sendo considerada representativa para a região. Como pode ser observado no gráfico da estação do INMET (ver Figura 8a), o período chuvoso compreende os meses de novembro a fevereiro e o período seco os meses de maio a setembro, sendo junho a agosto o período de seca mais intensa.



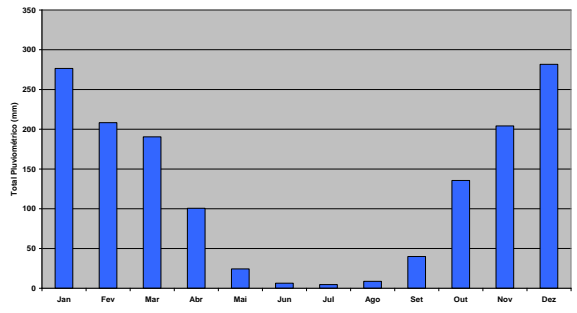
(a)



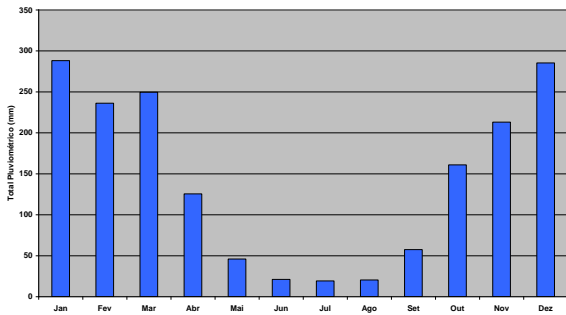
(b)



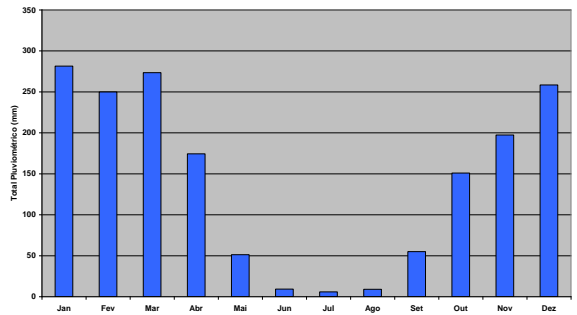
(c)



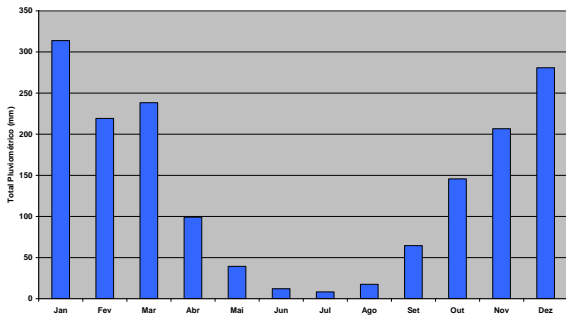
(d)



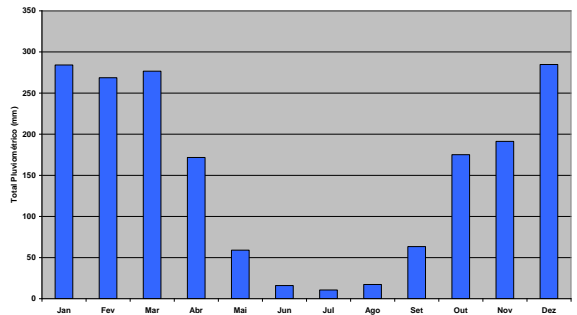
(e)



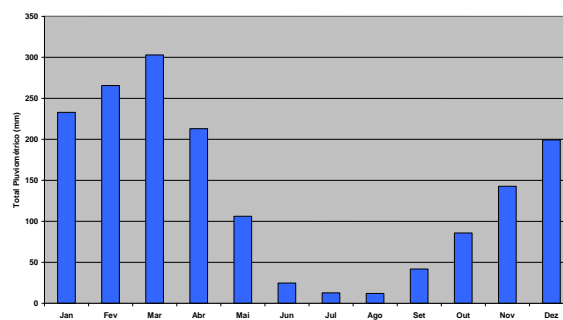
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 7: Climatologia da precipitação para a Bacia Tocantins-Araguaia utilizando dados do período de 1973 a 1994. a) Normal climatológica INMET – estação Palmas-TO ; b) Bacia Tocantins-Araguaia ; c) UHE Serra da Mesa ; d) UHE Peixe Angical ; e) UHE Lajeado ; f) UHE Estreito ; g) UHE São Felix do Araguaia ; h) UHE Santa Isabel ; i) UHE Tucuruí

As vazões utilizadas no trabalho como meio de comparação com o modelo hidrológico a ser adotado são vazões naturais reconstituídas seguindo a metodologia aplicada no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS/THEMAG/AQUAVIA; 2004). A seleção dos postos fluviométricos obedeceu ao critério de escolha do posto mais próximo de cada aproveitamento com a maior abrangência de dados possível. Essa informação foi confrontada com o período de dados obtido com as estações pluviométricas para que se pudesse utilizar a maior quantidade de estações de chuva com o maior período de dados possível.

## 4 – CONCLUSÕES

Conforme mencionado na Introdução, esse artigo apresenta a primeira parte da metodologia de avaliação do potencial hidráulico integrada à gestão dos recursos hídricos e clima - Hidro\_Clim, em andamento, para a bacia hidrográfica do Tocantins.

O principal objetivo deste artigo é disponibilizar para o meio científico a versão preliminar da metodologia, que deverá estar finalizada até o final de 2012.

Buscou-se é elaborar uma ferramenta que não adicione complexidade ao já intrincado problema de gestão integrada de recursos hídricos e clima. Além dos aspectos de estocasticidade de séries de vazões, das difíceis previsões climáticas, há de se ressaltar as ações antropogênicas e seus impactos econômicos, sociais e ambientais nas bacias hidrográficas. É importante lembrar também a complexidade de bacias transfronteiriças, como a do rio Madeira, cuja gestão depende da gestão de países vizinhos, o que pode trazer mais incerteza aos resultados.

Sendo assim, a metodologia em desenvolvimento objetiva tratar da forma mais eficiente, eficaz e simples, sem ser simplória, a complexa questão abordada. Com isso, espera-se dispor de uma ferramenta completa, útil e que poderá, eventualmente, ser desenvolvida no futuro para outras bacias hidrográficas.

Como objetivo de médio prazo a bacia do rio madeira também será escolhida para aplicar a metodologia aqui apresentada.

## AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi elaborado como parte do da programação de trabalhos do terceiro ano do projeto de pesquisa pelo IVIG (Instituto Virtual de Mudanças Globais da COPPE/UFRJ), intitulado “Desenvolver Metodologia de Avaliação do Potencial Hidráulico Integrada a Gestão dos Recursos Hídricos e Clima (Hidro-Clim) – O Caso das Bacias dos Rios Tocantins e Madeira”, para o programa de P&D de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S/A.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O; 1977. **Guidelines for predicting crop water requirements**. In: Irrigation and Drainage, Roma, FAO, 1977, 198p. Paper nº 24.

Earth System Grid Project, link para consulta: <https://esg.llnl.gov:8443>

HORA, M. A. G. M.; MARQUES, E.; HORA, A. F. **SisVazNat: Sistema de Reconstituição de Séries de Vazões Naturais**. Colorgraf Gráfica e Editora Ltda. 75 p. + CD-ROM. ISBN 978-85-910333-0-0. Niterói, RJ. Disponível em: <<http://www.sisvaznat.uff.br/publicacoes/sisvaznat.pdf>>. Acessado em janeiro de 2011.

HORA, M. A. G. M. **Metodologia para a Compatibilização da Geração de Energia em Aproveitamentos Hidrelétricos com os demais Usos dos Recursos Hídricos. Estudo de Caso: Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins**. 2008. 143f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Hidroweb, <http://hidroweb.ana.gov.br>

IPCC; Contribution for Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 – The physical science bases, 2007.

KONDRATYEV, K. Y.; Greenhouse warming versus aerosol cooling in the context of global climate change: Contribution of satellite observations - Journal of Aerosol Science, Volume 26, Supplement 1, September 1995, Page S365

KONDRATYEV, K. Y.; Greenhouse warming versus aerosol cooling in the context of global climate change - Fuel and Energy Abstracts, Volume 37, Issue 3, May 1996, Chapter 96/03229, Page 222

MONTGOMERY D.C., Runger G.C. e Hubele N.F.; Estatística aplicada à engenharia. 2ªed., Ed. LTC.

MORTON, F. I.; 1976. **Climatological estimates of evapotranspiration**. Journal of Hydrology Division, nov. 1976, v.102, n.HY3, p.275–291.



MORTON, F. I.; 1978. **Estimating evapotranspiration from potential evaporation: practicality of an iconoclastic approach.** Journal of Hydrology, Jan. 1978, v.38, n.112. p.1-32.

MORTON, F. I.; 1983a. **Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology.** Journal of Hydrology, Oct. 1983a, v.66, n.114, p.1-76.

MORTON, F. I.; 1983b. **Operational estimates of lake evaporation.** Journal of Hydrology, Oct. 1983b, v.66, n.114, p.77-100.

SAMANI, Z.; 2005. **Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani Equation).** Publicação Eletrônica. Disponível em <[cagesun.nmsu.edu/~zsamani/research\\_material/files/Hargreaves-samani.pdf](http://cagesun.nmsu.edu/~zsamani/research_material/files/Hargreaves-samani.pdf)>. Acessado em maio de 2007.