

RAIMUNDO ALÍPIO DE OLIVEIRA LEÃO

CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM  
RESERVATÓRIOS DA BACIA DO JAGUARIBE-CE

Tese apresentada à Universidade Federal de  
Viçosa, como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola para obtenção do  
título de *Doctor Scientiae*

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

L437c  
2010

Leão, Raimundo Alípio de Oliveira, 1967-  
Caracterização fisiográfica e simulação hidrológica em  
reservatórios da bacia do Jaguaribe-CE / Raimundo Alípio  
de Oliveira Leão. – Viçosa, MG, 2010.  
xviii, 133f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Inclui apêndice.

Orientador: Antônio Alves Soares.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 116-121

1. Recursos hídricos. 2. Hidrologia. 3. Sistemas de  
informação geográfica. 4. Bacias hidrográficas.  
5. Sensoriamento remoto. I. Universidade Federal de  
Viçosa. II. Título.

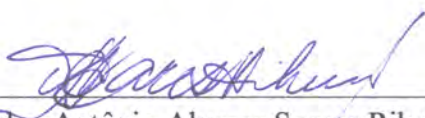
CDD 22. ed. 630.2537

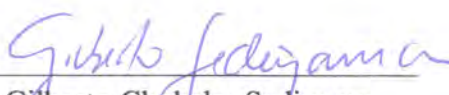
RAIMUNDO ALÍPIO DE OLIVEIRA LEÃO

CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM  
RESERVATÓRIOS DA BACIA DO JAGUARIBE-CE

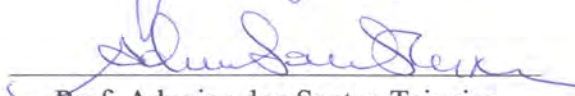
Tese apresentada à Universidade Federal de  
Viçosa, como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola para obtenção do  
título de “Doctor Scientiae”


APROVADA: 01 de julho de 2010

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Gilberto Chohaku Sedyama

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Fernando Falco Pruski

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Adunias dos Santos Teixeira  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Antônio Alves Soares  
(Orientador)

A Deus, meu Deus;  
a Eldenice, minha mulher;  
a Pedro Levi e Maria Alice, meus filhos;  
a João Eudes e Leônia, meus pais.

Pelo amor que sinto de vocês e por vocês, dedico-lhes esta Tese de Doutorado. Saibam que foram muito importantes nesta jornada de quatro anos, na medida que me proporcionaram toda tranquilidade para desenvolvê-la, ao compreenderem as minhas não raras ausências físicas e humorais.

## AGRADECIMENTOS

Ao Pai por esta e muitas outras graças alcançadas, ao Filho pela orientação na busca do Objetivo e ao Espírito Santo pela condução ao Objetivo.

A Nossa Senhora, a quem recorro nos momentos mais difíceis e de quem sempre encontro consolo.

A Maria Eldenice, meu amor, pelo amor, dedicação, companhia, inteligência, força, coragem, confiança, educação de nossos filhos, 15 anos de casamento feliz...

A meus filhos, Pedro Levi e Maria Alice, pela compreensão nos não raros momentos em que o Doutorado me impediu de brincar com eles, assim como de que eles me vissem antes de dormir e ao acordar.

A Maria Leônia, minha mãe, pelo amor, pela confiança, pelas orações, pelo apoio amplo total e irrestrito ao Doutorado e pela presença constante.

A João Eudes, meu pai, pelo amor, pelo apoio, incentivo e comentários e silêncios oportunos.

Aos meus irmãos Águeda, Hugo, Marta e Fernando pelo amor e incentivo contínuo. Quero destacar o Hugo agradecendo-lhe a solidariedade e ajuda quando do comparecimento à defesa da Tese.

Aos meus sogros, José Maria e Helena, pela compreensão quando da separação pela mudança para Viçosa e pela confiança no genro. Extensivo a Helder e Helena, meus cunhados, e respectivas famílias.

À Diana, minha prima, pelo incentivo constante.

Ao Prof. Antônio Alves Soares pelo acolhimento, orientação, apoio, confiança e presteza.

Ao Prof. Demetrius David da Silva pela orientação e apoio.

Ao Prof. Adunias dos Santos Texeira pela orientação, apoio e amizade e ainda por encabeçar o grupo de pesquisa do qual participo com muito orgulho, na Universidade Federal do Ceará.

Aos Profs Gilberto Sedyama, Carlos Antônio Ribeiro e Fernando Falco Pruski que muito contribuíram na avaliação e melhoria deste trabalho.

A outros professores com quem tive a oportunidade de trocar experiências e aprender: Sueli, Martinez, Paulo Afonso, José Helvécio da Universidade Federal de Viçosa e Eunice e Omar na Universidade Federal do Ceará.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pela bolsa de pesquisa nos três primeiros anos.

Ao Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS), À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (Cogerh) pelos dados fornecidos para a Pesquisa, respectivamente nas pessoas de Lunásio, Bosco e Disney.

Às professoras Zenilda Vieira Bruno e Sônia Maria Pinheiro de Oliveira, pelo incentivo e liberação quando a elas estive subordinado, na qualidade de servidor na Universidade Federal do Ceará, para que eu enveredasse por este caminho.

À equipe do Prof. Antônio, principalmente Patrícia, Adilson, Karine e Gilson, com os quais mantive contato frequente, resultando numa relação de respeito, confiança e amizade.

À equipe do Prof. Adunias, principalmente Firmino, Alexandre Costa, Tadeu, Lúcio, Dimas, Rafaela e Odílio pelo incentivo constante.

À Edna, ao Chicão, ao Eduardo, ao Marcos e ao Renato, funcionários do Depto. de Engenharia Agrícola cujo trabalho desempenham com tanta eficiência e vontade que dá gosto ver.

Aos amigos de sala na UFV Márcio, Marcos, Caio, Gil, Adinan e Douglas pela alegre e amistosa convivência e troca de informações.

Ao Prof. Francisco Pinto e sua digníssima esposa, Alessandra, por toda atenção dedicada a nossa família, recebendo-nos em sua casa, em ceia natalina, jantares e almoços em família, inclusive no apoio às nossas crianças, quando saímos em viagem.

Aos amigos da “República de Capixaba” com os quais pude contar sempre. Com muita alegria e amizade me receberam em sua casa e lá me hospedaram. Senti-me em casa na casa de Danilo, André, Fabrício, Marcelo Rocha e João Batista.

Aos amigos que consegui durante o curso de Doutorado com quem dividi os trabalhos e também os momentos de folga como as horas do cafezinho e os churrascos na hidráulica.

À revisora deste trabalho que, insistentemente, me pediu para ficar no anonimato.

Pode parecer muita gente, mas todos os citados foram importantes, se não especificamente para a realização e conclusão do Doutorado, mas como belas paisagens nesse passeio terrestre. Alguns deles, provavelmente, nunca mais eu verei. Então, se assim for, que fiquem, nesta obra, registrados seus nomes.

Finalmente, aos não citados pelo esquecimento no momento em que escrevo este agradecimento, nem por isso menos importantes, aceitem além do muito obrigado, o meu pedido de desculpas.

## BIOGRAFIA

RAIMUNDO ALÍPIO DE OLIVEIRA LEÃO, filho de João Eudes Lima Leão e Maria Leônia de Oliveira Leão, nasceu em Fortaleza-CE, em 18 de junho de 1967.

Concluiu o ensino fundamental no Colégio Santo Inácio de Fortaleza, em 1985. cursou Engenharia Agrônômica na Universidade Federal do Ceará, no período de 1986 a 1990.

Obteve o título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Federal do Ceará, em 2002.

Atualmente é funcionário de nível técnico na Universidade Federal do Ceará, desde 01/1995.

Em março de 2006 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal de Viçosa.

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	xii
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Caracterização do semiárido brasileiro .....	4
2.2. A política de açudagem no Estado do Ceará e as alternativas de armazenamento....	8
2.3. Importância dos Reservatórios para o Estado do Ceará.....	10
2.4. Impactos na construção de reservatórios.....	12
2.5. Evaporação nos reservatórios. ....	13
2.6. Modelos computacionais em hidrologia.....	19
2.7. Escoamento Superficial.....	23
2.8. Escoamento em canais naturais .....	24
2.9. Sensoriamento remoto.....	27
2.10. Sistemas de Informações Geográficas.....	33
2.11. Geoprocessamento .....	34
2.11.1 Classificação de imagens digitais.....	37
3. METODOLOGIA .....	40
3.1. Obtenção da base de dados georreferenciados. ....	40
3.1.1. Caracterização da Área de Estudo.....	40
3.1.2. Modelo digital de elevação e delineamento automático da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe .....	42
3.1.3. Georreferenciamento das imagens de satélite e montagem do mosaico de imagens para a composição da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.....	50
3.1.4. Levantamento de dados dos reservatórios, dados pluviométricos e dados climatológicos.....	52
3.1.5. Digitalização dos dados de Solos, Relevo e Vegetação .....	53
3.1.6. Classificação do mosaico de imagens de satélite para uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão .....	54



3.2 Desenvolvimento do Modelo Hidrológico .....	55
3.2.1. Balanço Hídrico nos Reservatórios .....	57
3.2.1.1. Volumes Armazenados.....	58
3.2.1.2. Volume Precipitado.....	58
3.2.1.3. Volume Efluente .....	59
3.2.1.4. Volume Evaporado.....	60
3.2.1.5 Volume Afluente .....	65
3.2.1.5.1. Escoamento superficial.....	66
3.2.1.5.2. Deslocamento do volume escoado .....	68
3.2.2. Aplicação do Modelo Desenvolvido .....	72
3.2.2.1. Caracterização da Região Hidrográfica Banabuiú .....	73
4. RESULTADOS .....	74
4.1. Delineamento automático.....	74
4.1.1. Delineamento automático da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e das bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.....	78
4.1.3. Relevo.....	83
4.2. Geoprocessamento das imagens de satélite e mapas.....	87
4.2.1. Classificação do mosaico e obtenção do uso e ocupação do solo.....	87
4.2.3. Mapa de solos .....	91
4.2.4. Tipo de solo .....	92
4.2.5. Mapa de vegetação .....	94
4.3. Distribuição espacial do Número da Curva.....	96
4.4. Açudes.....	98
4.5. Plataforma de coleta de dados climatológicos e estações pluviométricas.....	99
4.6. Balanço Hídrico nos reservatórios .....	101
4.6.1 Estimativa da evaporação em superfícies líquidas.....	101
5. CONCLUSÃO .....	114
6. RECOMENDAÇÕES .....	115
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	116
9. ANEXOS.....	122

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	= Área da seção do canal.
$a$	= Parâmetro do modelo de Muskingum.
$A_{BH}$	= Área de drenagem da bacia hidrográfica.
$A_{UD}$	= Área da interbacia.
$A_{pcd}$	= Área de influência sobre o reservatório da plataforma de coleta de dados $pcd$ .
$A_{pp}$	= Área de influência sobre o reservatório, do posto pluviométrico $pp$ .
$A_R$	= Área do reservatório.
$A_{SA}$	= Área da subárea.
$A_v$	= Energia advectiva no corpo de água.
$B$	= Largura da superfície do canal.
$b$	= Parâmetro do modelo de Muskingum.
B-S	= Método de Brutsaert-Stricker para estimativa da evaporação em superfícies líquidas.
$C$	= Coeficiente de Chézy.
$c$	= Coeficiente empírico da primeira lei de Dalton, adimensional.
$C_K$	= Celeridade da onda cinemática, ou seja, a distância percorrida pela onda com o tempo.
$CN$	= Parâmetro do método do Número da Curva, adimensional, variável entre 1 e 100 e reflete a cobertura do solo e o tipo de solo.
$CX_{ex}$ e $CY_{ex}$	= Coordenadas Leste e Norte, respectivamente, na projeção UTM, do centro de massa da interbacia do exutório da bacia hidrográfica.
$CX_i$ e $CY_i$	= Coordenadas Leste e Norte, respectivamente na projeção UTM, do centro de massa da interbacia.
$D$	= Distância euclidiana entre o centro de massa da interbacia e o da interbacia do exutório da bacia hidrográfica.
dB	= Método de deBruim para estimativa da evaporação em superfícies líquidas.
dB-K	= Método de deBruin-Keijman para estimativa da evaporação em superfícies líquidas.
$dS/dt$	= Variação do armazenamento no tempo.
$dV/dt$	= Variação do volume com o tempo $t$ .
$D_{ma}$	= Comprimento total dos trechos de uma nascente até o exutório da bacia hidrográfica.
$D_{mi}$	= Comprimento do trecho de rio da interbacia do exutório da bacia hidrográfica.
$E$	= Evaporação.
$E_a$	= Função aerodinâmica.

$e_a$	= Pressão real de vapor.
$e_d$	= Pressão de saturação do vapor na temperatura do ponto de orvalho, em kPa.
$EE$	= Exatidão específica.
$EG$	= Exatidão global.
$E_L$	= Evaporação no lago.
$E_p$	= Evaporação no tanque.
$ES$	= Escoamento superficial.
$e_s$	= Pressão de saturação de vapor.
$Evm$	= Evaporação média.
$Ev_{pcd,i}$	= Evaporação estimada, em mm, no dia $i$ , na $pcd$ -ésima plataforma de coleta de dados.
$f$	= Fator de atrito de Darcy-Weisbach, adimensional.
$f(u)$	= Função da velocidade do vento
$G$	= Fluxo de calor no reservatório.
$g$	= Aceleração da gravidade.
$H$	= Energia conduzida para ou do corpo de água, como calor sensível.
$I$	= Vazão afluente.
$I_0$	= Declividade do fundo do canal.
$I_f$	= Declividade da linha de energia.
$K$	= Coeficiente Kappa.
$K_p$	= Coeficiente do tanque.
K-N-F	= Método de Kohler-Nordenson-Fox para estimativa da evaporação em superfícies líquidas.
$L$	= Comprimento do talvegue, km.
$L_{cp}$	= Comprimento do curso principal.
$LE$	= Energia utilizada para a evaporação.
$L_{eb}$	= Comprimento do eixo da bacia.
$L_{ma}$	= Largura máxima do trecho, definida neste trabalho como 50 m.
$L_{mi}$	= Largura mínima do trecho, definida neste trabalho como 2 m.
$Lt_{bh}$	= Comprimento total dos drenos naturais.
$L_v$	= Calor latente de vaporização.
$m$	= Parâmetro do modelo de Muskingum.
$MC$	= Método de Muskingum-Cunge.
$n$	= Parâmetro do modelo de Muskingum.
$N$	= Número de elementos da matriz de confusão.
$O$	= Vazão efluente.
P	= Método de Penman para estimativa da evaporação em superfícies líquidas.
$P$	= Pressão atmosférica em kPa.

$P_{bh}$	= Perímetro da bacia hidrográfica.
$P_{pt}$	= Precipitação, em mm.
$P_{ptm}$	= Precipitação média.
P-T	= Método de Priestley-Taylor para estimativa da evaporação em superfícies líquidas.
$QES$	= Vazão decorrente do escoamento superficial.
$Qr$	= Vazão liberada.
$Q_0$	= Vazão de referência.
$r$	= Número de linhas ou colunas da matriz.
$R_a$	= Radiação de ondas longas proveniente da atmosfera e incidente na superfície da água.
$R_{ar}$	= Radiação de ondas longas refletida.
$R_b$	= Radiação de ondas longas emitida pelo corpo de água que retorna à atmosfera.
$Rh$	= Raio hidráulico na seção do canal.
$R_n$	= Radiação líquida.
$R_s$	= Radiação solar incidente medida na PCD.
$R_s$	= Radiação de ondas curtas.
$R_{sr}$	= Radiação de ondas curtas refletida.
$\Delta S$	= Variação de energia no corpo de água.
$S$	= Relação determinada pelo NRCS para expressar o potencial máximo de retenção da precipitação na bacia, em mm.
$S_0$	= Declividade.
$S_{0cp}$	= Declividade do curso principal.
$t$	= Tempo.
$T_a$	= Temperatura do ar.
$Tc$	= Tempo de concentração.
$T_{dp}$	= Temperatura do ponto de orvalho.
$T_{pmb}$	= Tempo de pico da interbacia.
$T_{máx}$	= Temperatura máxima do dia.
$T_{mín}$	= Temperatura mínima do dia.
$u_p$	= Velocidade do vento a 0,152 metros acima do tanque Classe A.
$u_d$	= Velocidade do vento tomada a uma distância $d$ da superfície líquida.
$u_2$	= Velocidade do vento a 2 metros de altura.
$UR_{máx}$	= Umidade relativa máxima do dia.
$UR_{mín}$	= Umidade relativa mínima do dia.
$U_{10m}$	= Velocidade do vento a 10 m de altura.
$v$	= Velocidade média, em $m^{-1}$ .
$Vaf$	= Volume afluente.
$Varm$	= Volume armazenado.

$VE$	= Volume escoado.
$V_{ef}$	= Volume efluente.
$V_{prec}$	= Volume precipitado.
$V_{ev}$	= Volume evaporado.
$x$	= Distância percorrida ao longo do canal, em m.
$x_{ii}$	= Elemento da interseção $i$ -ésima linha com a $i$ -ésima coluna.
$x_{i+}$	= Total da linha $i$ .
$x_{+i}$	= Total da coluna $i$ .
$y$	= Profundidade da água no canal.
$\alpha_{PT}$	= Constante empírica de Priestley-Taylor, adimensional.
$\alpha_1$	= Coeficiente empírico.
$\gamma$	= Coeficiente psicrométrico, em $\text{Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .
$\Delta$	= Declividade da curva de pressão de vapor de saturação vs temperatura, em $\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$ .
$\Delta x$	= Incremento de distância do método de Muskingun-Cunge.
$\Delta t$	= Intervalo de tempo do método de Muskingun-Cunge.
$\lambda$	= Calor latente de vaporização, em $\text{MJ kg}^{-1}$ .
$\rho$	= Densidade da água, $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa com a nova delimitação do Semiárido brasileiro, na cor escura Fonte: MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2005).....	5
Figura 2 - Bacia hidrográfica do rio Jaguaribe com identificação das regiões hidrográficas e dos reservatórios. ....	42
Figura 3 - Mosaico de arquivos SRTM compondo o MDE da bacia do rio Jaguaribe, com as regiões hidrográficas e os limites dos municípios que compõem a referida a bacia.....	44
Figura 4 - Fluxograma com os resultados, em uma pequena parte da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, do algoritmo de delineamento automático de bacias hidrográficas. A – Parte do MDE; B – Preenchimento das depressões; C – Direção do fluxo, no sentido da maior declividade; D – Acúmulo do fluxo pela soma das contribuições provenientes de células vizinhas, E – Identificação do curso de água e F – Delineamento de áreas de drenagem. ....	46
Figura 5 - Sobreposição das áreas de drenagens e cursos de água no formato vetorial sobre o formato matricial. ....	47
Figura 6 - Parte da imagem (217/064) do satélite Landsat5, na composição R5G4B3, destacando o reservatório Banabuiú na cor preta. ....	51
Figura 7 - Sequência de adição de imagens formando o mosaico de imagens da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.....	52
Figura 8 – Imagens do Google Earth com resolução bem definida, representativa de cada classe de cobertura do solo, utilizadas como amostras para avaliação da classificação das imagens de satélite. A – Classe água; B – Área antropizada; C – Solo descoberto; D – Vegetação densa e E) – Vegetação rala. ....	55
Figura 9 – Fluxograma do módulo Balanço Hídrico .....	56
Figura 10 – Fluxograma do módulo Número da Curva para obtenção do escoamento superficial. ....	56
Figura 11 – Fluxograma do módulo Muskingum-Cunge para o deslocamento do hidrograma até o reservatório.....	57
Figura 12 - Áreas de influência A1, A2 e A3, sobre o açude Banabuiú, dos postos pluviométricos 212 (P1), 427 (P2) e 494 (P3).....	59
Figura 13 - A) Imagem de satélite Landsat TM, com passagem no dia 14/07/2006, composição R5, G4, B3. B) Mesma imagem com sobreposição de rede de drenagem e divisores delineados automaticamente por meio das extensão ArcHydro, no aplicativo ArcGis 9.3.....	76
Figura 14 – Mosaico de imagens Landsat 5 e rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe obtida no delineamento automático. ....	77
Figura 15 – Modelo digital de elevação e rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe obtida no delineamento automático. ....	77
Figura 16 – Interbacias componentes da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. ....	79
Figura 17 – Interbacias componentes das bacias hidrográficas do açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão. ....	80

Figura 18 – Classificação do relevo conforme a altitude da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.....	83
Figura 19 – Classificação do relevo conforme a declividade da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. ....	85
Figura 20 – Cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão, no Estado do Ceará. ....	88
Figura 21 – Distribuição percentual da cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.....	90
Figura 22 – Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. ....	92
Figura 23 - Distribuição espacial do tipo de solo, segundo definição do Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (SCS-USDA), para determinação do valor CN. ....	93
Figura 24 – Mapa de vegetação da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe (Adaptação do mapa de unidades fitoecológicas do Estado do Ceará, extraído de FIGUEIREDO, 1997). ....	95
Figura 25 - Distribuição espacial do valor CN para condição de umidade antecedente II (UA-II).....	97
Figura 26 – Mapa de açudes com vazão regularizada $Q_{90reg}$ maior ou igual a $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . ....	99
Figura 27 – Distribuição espacial das plataformas de coleta de dados monitoradas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) e área de influência sobre a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.....	100
Figura 28 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos monitorados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) e área de influência sobre a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. ....	100
Figura 29 – Plataforma de Coleta de Dados com influência sobre os reservatórios Banabuiú e Pedras Brancas. ....	102
Figura 30 – Evaporação no reservatório Pedras Brancas, ao longo do ano de 2005, estimada pelos métodos Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruin-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S), deBruim (dB) e precipitação média na bacia hidrográfica do reservatório (Ppt média).....	103
Figura 31 - Evaporação no reservatório Banabuiú, ao longo do ano de 2005, estimada pelos métodos Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruin-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S), deBruim (dB) e precipitação média na bacia hidrográfica do reservatório (Ppt média).....	103
Figura 32 – Precipitação pluvial média na bacia hidrográfica do açude Pedras Brancas, no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), no referido açude, no ano de 2005. ....	106
Figura 33 – Precipitação pluvial média na bacia hidrográfica do açude Banabuiú, no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação	

calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), no referido açude, no ano de 2005. ....	107
Figura 34 – Precipitação pluvial média nas bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas (A) e Banabuiú (B), no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), nos referidos açudes, no período de 01/01 a 15/03/2005. ....	108
Figura 35 – Precipitação pluvial média nas bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas (A) e Banabuiú (B), no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), nos referidos açudes, no período de 16/03 a 15/06/2005. ....	109
Figura 36 – Precipitação pluvial média nas bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas (A) e Banabuiú (B), no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), nos referidos açudes, no período de 16/06 a 31/12/2005. ....	110



## RESUMO

LEÃO, Raimundo Alípio de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho 2010. **Caracterização fisiográfica e simulação hidrológica em reservatórios da bacia do Jaguaribe-CE.** Orientador: Antônio Alves Soares. Coorientadores: Demetrius David da Silva e Adunias dos Santos Teixeira.

A política de açudagem foi adotada no semiárido brasileiro, e principalmente no Estado do Ceará, regiões de acentuado déficit hídrico anual devido à irregularidade da distribuição das chuvas no tempo e no espaço, com o objetivo de garantir os recursos hídricos para usos múltiplos como aglomerados urbanos, agricultura, piscicultura, turismo e indústria e, ainda, a prevenção de cheias. A finalidade múltipla e a grande variedade de fatores envolvidos tornam o manejo de reservatórios bastante complexo. Os modelos hidrológicos surgem como ferramentas para auxiliar nos processos decisórios de gestores dos recursos hídricos, permitindo análise prévia de resultados de simulações contemplando diferentes cenários. Neste trabalho desenvolveu-se uma metodologia para modelagem em recursos hídricos no semiárido nordestino visando ao balanço hídrico de reservatórios, a partir de uma base de dados georreferenciada e utilizando o método do Número da Curva para a estimativa do escoamento superficial e de Muskingum-Cunge para escoamento em canais naturais. Como dados de entrada foram utilizados: base de dados georreferenciada contendo o delineamento da bacia hidrográfica do reservatório, subdividida em áreas de drenagem de até 25 km<sup>2</sup> (denominadas interbacias) e compreendidas entre duas confluências; a cobertura e o tipo do solo; a distribuição espacial de pluviômetros e estações meteorológicas com as respectivas precipitações e estimativas da evaporação diárias; dados dos reservatórios modelados como relações cota-área-volume, nível e vazão liberada diariamente, distribuição espacial e vazão efluente de reservatórios a montante do reservatório principal e as vazões outorgadas ao longo do sistema. O delineamento automático, realizado por meio da ferramenta ArcHydro, na plataforma ArcGIS 9.3, resultou em 227 interbacias para a bacia hidrográfica do reservatório Pedras Brancas, 1.811 para o reservatório Banabuiú, 2.634 para o reservatório Castanhão e 3.263 para o Orós. A lâmina escoada diariamente em cada interbacia, obtida pelo método do Número da Curva, foi convertida em vazão escoada e transferida pelo método de Muskingum-Cunge até o reservatório, consistindo no volume afluente. O volume evaporado foi estimado a partir de fatores climatológicos obtidos em estações meteorológicas

automáticas e o volume efluente obtido a partir das vazões liberadas nos reservatórios. O volume precipitado foi obtido por meio de dados de precipitação de pluviômetros distribuídos nas proximidades do reservatório. O escoamento superficial em cada interbacia e o deslocamento do hidrograma até o reservatório foram implementados no *Software Excel* da Microsoft, com programação em linguagem *Visual Basic for Application*. O modelo foi aplicado nos reservatórios Pedras Brancas e Banabuiú, no Estado do Ceará, com capacidade de armazenamento de 434 hm<sup>3</sup> e 1.700 hm<sup>3</sup> e bacias hidrográficas com áreas de drenagem de 1.787 km<sup>2</sup> e 13.500 km<sup>2</sup>, respectivamente. O modelo foi testado comparando-se os volumes observados e os estimados pelo modelo, diariamente. Embora o modelo tenha apresentado fraco desempenho no período chuvoso, sugerindo superestimativa do escoamento superficial com o uso do método do Número da Curva e a metodologia adotada, apresentou bom desempenho para o período seco, evidenciando boa estimativa do volume evaporado.

## ABSTRACT

LEÃO, Raimundo Alípio de Oliveira, D.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2010. **Physiographic characterization and hydrologic simulation in reservoirs of the Jaguaribe river basin, in Ceará State.** Adviser: Antônio Alves Soares. Co-Advisers: Demetrius David da Silva and Adunias dos Santos Teixeira.

In order to ensure water resources for multiple uses, such as, urban agriculture, aquaculture, tourism and industry, and also flood protection, reservoirs building police was adopted in Brazilian semi-arid, and especially in Ceará state, region of high annual water deficit due to the irregularity in rainfall distribution in time and space. That multi-purpose uses and the large variety of factors involved, make the management of reservoirs a complex task. The hydrological models emerge as a valuable tool to assist the decision maker in the process of water allocation, allowing for preliminary analysis based on simulation of different scenarios. This study presents a methodology for modeling water resources in semiarid northeastern - Brazil, targeting reservoir water balance. The model uses a spatial database and the Curve Number method for estimating runoff, and Muskingum-Cung for flow in natural channels. As input, the following dataset was used: spatial database containing the layout of the reservoir system, subdivided into drainage areas up to 25 km<sup>2</sup> (named interbasins) and between two confluences, soil type layer, spatial distribution of rain gauges and weather stations with their measured daily water precipitation and estimated evaporation; data from modeled reservoirs, such as, elevation-area-volume model, daily water level and flow released and spatial distribution of the reservoirs upstream of the main reservoir and its release, as well as water uptake from rivers between two reservoirs (water right) in the stream network. The automatic delineation of the river network was performed by Archydro tool in ArcGIS 9.3 platform, resulting in 227 interbasins for the catchment area of the Pedras Brancas reservoir, 1811 for Banabuiú reservoir, 2634 for Castanhão reservoir and 3263 for Orós reservoir. The daily runoff water depth in each interbasin, obtained by the Curve Number, was converted to flow and transferred by the Muskingum-Cunge method all the way to the reservoir as inflow. The evaporated volume was estimated from meteorological data obtained from Automatic Weather Stations, and the outflow volumes from reservoir releases. The precipitated volume was obtained by rain gauge data distributed near the reservoir. Interbasin runoff and the displacement of the hydrograph to the reservoir were computed using Microsoft Excel

software, with programming language Visual Basic for Application. The model was applied in the Pedras Brancas and Banabuiú reservoirs, in Ceará state, with storage capacity of 434 hm<sup>3</sup> and 1,700 hm<sup>3</sup>, and watersheds areas of 1,787 km<sup>2</sup> and 13,500 km<sup>2</sup>, respectively. The model was tested by comparing the daily observed and estimated volumes. Although the model has shown weak performance during the rainy season, suggesting overestimation of runoff using the curve number method associated with the presented methodology, the performed well during the dry season, with good estimates of evaporation.

## 1. INTRODUÇÃO

Em várias regiões do mundo os recursos hídricos tornam-se cada vez mais escassos devido à pressão do desenvolvimento econômico e do crescimento demográfico sobre os mesmos. Estima-se que, em 2025, 1,8 bilhão de pessoas vivam em países ou regiões com menos do que 500 m<sup>3</sup> de água renovável por ano *per capita* e dois terços da população mundial em condições de estresse (entre 500 e 1000 m<sup>3</sup> por ano *per capita*). Esta situação será agravada com o aumento da demanda devido ao rápido crescimento urbano, resultando em maior pressão sobre a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos (ONU, 2007).

Na sua estratégia para o setor de recursos hídricos, o Banco Mundial (WORLD BANK, 2003) cita a aritmética obscura da água (*gloomy arithmetic of water*) descrita pelo Comitê Mundial para a Água (World Commission on Water), referindo-se ao fato de que, no século passado, enquanto a população mundial triplicou, o uso da água aumentou seis vezes, a expensas de grande custo ambiental. Neste documento afirma-se que 16% do capital emprestado são voltados ao setor de recursos hídricos.

Os usos múltiplos e a escassez gerando conflitos de interesses, a poluição e a degradação decorrentes da utilização, a essencialidade da água no desenvolvimento econômico e social e o fato de a mesma se constituir em bem de consumo final, ou intermediário, para várias atividades humanas, conferem complexidade ao gerenciamento dos recursos hídricos e os tornam vulneráveis e estrategicamente importantes (LANNA 2004). Por isso, o Estado brasileiro, em sua Constituição, conferiu à União e aos Estados a propriedade dos recursos hídricos, impossibilitando a apropriação dos mesmos por instituições privadas.

Embora se afirme que o Brasil é o país mais dotado de recursos hídricos no mundo, sabe-se que a distribuição espacial da água proporciona regiões com escassez em contraste com regiões onde a água sobra. Por isso, enquanto nas regiões Norte e Centro-Oeste a demanda ainda está aquém da oferta, a escassez é presente na Região Nordeste, devido às características climáticas, geológicas, edáficas, dentre outras, e nas Regiões Sul e Sudeste devido à elevada densidade populacional e ao elevado nível industrial e de atividades agrícolas.

O Estado do Ceará encontra-se quase totalmente no semiárido brasileiro. A pluviosidade média anual é de 870 mm e, conforme a região, varia entre 1222 e 746 mm. Ocorrem anos extremamente secos e outros chuvosos, provocando secas em todo o

Estado e enchentes, principalmente nas áreas baixas das bacias do Jaguaribe e do Acaraú. Há um déficit hídrico devido à evaporação potencial média de 2.000 mm anuais (TEIXEIRA, 2004 e CEARÁ, 2005).

A bacia do rio Jaguaribe abrange metade do território cearense, com mais de 1/3 da população e apresenta um baixo rendimento hidrológico, resultante da heterogeneidade hidroclimatológica, tanto espacial como temporal, englobando regiões secas, como a dos Inhamuns (450 mm anuais), embora inclua também a região do Cariri (superior a 1.000 mm anuais). A demanda de água do rio Jaguaribe distribui-se entre irrigação (83%), consumo humano (12%) e industrial (5%). Incluindo-se o abastecimento da região metropolitana de Fortaleza, atualmente através do Canal do Trabalhador e, em um futuro próximo, também através do Eixo de Integração, a participação das demandas de consumo humano e industrial eleva-se para 32% e 21%, respectivamente, enquanto a da irrigação se reduz para 47% (CEARÁ, 2000). Tais números mostram a importância da irrigação e o risco desta atividade econômica em função da concorrência pelo uso da água com as atividades priorizadas pela legislação de recursos hídricos.

Além de todo o aparato legal, institucional e estrutural para a gestão dos recursos hídricos, também é imprescindível o maior número possível de informações visando a minimizar os erros quando das tomadas de decisões. Cada vez mais a pesquisa busca desenvolver modelos que possam simular diferentes cenários, avaliar previamente as consequências de decisões, bem como estimar os impactos de decisões alternativas, visando a aperfeiçoar os resultados. No caso dos recursos hídricos a pesquisa está voltada à obtenção de soluções que permitam o atendimento ao uso múltiplo, com o mínimo de desperdício. Para isso estudam-se ainda as formas de tornar este recurso disponível durante todas as fases dos processos produtivos.

Uma das formas mais comuns de armazenamento de água para os diversos usos consiste na construção de reservatórios. O manejo de sistemas de reservatórios é um componente-chave no gerenciamento de recursos hídricos (CASTELLETTI e SONCINI-SESSA, 2007), além de ser de natureza complexa por envolver uma grande variedade de fatores qualitativos ambientais, sociais, políticos (FU, 2008) e, ainda, econômicos. O balanço hídrico nos reservatórios é importante para o conhecimento do comportamento do reservatório o que, em última análise, determina o seu manejo.

A informática contribui significativamente para o manejo otimizado de sistemas de reservatórios, possibilitando rapidez nas respostas, padronização,

armazenamento e disponibilização dos dados, bem como simulação de cenários diversos, baseados na distribuição geográfica dos vários componentes dos recursos hídricos de uma região, por meio dos sistemas de informações geográficas (SIG), dos modelos computacionais voltados ao gerenciamento dos recursos hídricos e das técnicas de otimização desenvolvidas no campo da heurística.

O desenvolvimento do sensoriamento remoto, com o aperfeiçoamento cada vez maior dos sensores orbitais e dos programas de geoprocessamento, têm facilitado sobremaneira os gestores na difícil tarefa de planejar as atividades que demandam recursos naturais, proporcionando atitudes menos degradantes e possibilitando a exploração sustentável do ambiente.

É bastante comum a confusão quanto à distinção entre SIG e Geoprocessamento. Por geoprocessamento entendem-se as técnicas matemáticas e computacionais capazes de processar dados georreferenciados para geração de produtos diversos como mapas, arquivos e relatórios. Por sua vez, os Sistemas de Informações Geográficas são programas computacionais que permitem o armazenamento e associação de diversos dados georreferenciados, tornando possível a análise dos mesmos. Nos SIGs estão embutidas as ferramentas necessárias para o geoprocessamento.

Este trabalho teve como objetivos gerar uma base de dados georreferenciada para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, no Estado do Ceará e aplicar esta base de dados para modelagem hidrológica e simulação de balanço hídrico em reservatórios localizados nesta bacia.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Caracterização do semiárido brasileiro

O semiárido brasileiro, desde 1989, era delimitado por um critério único, baseado na precipitação média anual nos municípios que o compunham. O limite máximo de 800 mm de precipitação média anual para que o município fosse inserido no semiárido foi definido na Lei nº 7827, de 27 de dezembro de 1989, a qual estabeleceu as condições de aplicação dos recursos dos Fundos Constitucionais de Financiamento do Norte (FNO), do Nordeste (FNE) e Centro-Oeste (FCO). Constatada a contribuição de outros fatores como a má distribuição espaço-temporal das precipitações, a alta taxa evapotranspirométrica e o baixo índice pluviométrico para a formação dos fenômenos da seca que periodicamente assolam a região, os Ministérios da Integração Nacional e do Meio Ambiente, por meio da Portaria Interministerial nº 6, de 29 de março de 2004, instituiu o Grupo de Trabalho Interministerial (GTI) para a nova delimitação do semiárido brasileiro. Desta feita, para a inserção do município no semiárido adotaram-se três critérios técnicos, a saber (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2005 e PEREIRA JÚNIOR, 2007): I – precipitação pluvial média anual inferior a 800 mm; II – índice de aridez (relação entre precipitação e evapotranspiração potencial) até 0,5 no período entre 1961 e 1990 e III – risco de seca maior do que 60%, tomando por base o período entre 1970 e 1990.

O risco de seca, um dos critérios enumerados acima, baseia-se em um estudo técnico realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) que comparou os resultados do índice de aridez com valores médios de precipitações anuais de 1953 postos (PEREIRA JÚNIOR, 2007). A definição de aridez, para fins de aplicação do Plano de Ação de Combate à Desertificação, elaborado pelas Nações Unidas, baseou-se na metodologia desenvolvida por Thornthwaite em 1941 e posteriormente ajustada por Penman em 1953 que considera o índice de aridez (IA) como sendo a relação entre a precipitação média e a evapotranspiração potencial (SOUZA et al. 2004).

Como resultado dos trabalhos do GTI, em 10 de março de 2005, o Ministério da Integração Nacional assinou a Portaria que instituiu a nova delimitação do semiárido brasileiro o qual abrange 969.589,4 km<sup>2</sup>, 1.133 municípios e, total ou parcialmente, todos os Estados da região Nordeste, a exceção do Maranhão e, ainda,



parte do Estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Figura 1 (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2005).



Figura 1 – Mapa com a nova delimitação do Semiárido brasileiro, na cor escura Fonte: MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2005).

Ainda com vistas ao resultado da nova delimitação, encontra-se que o Estado de Minas Gerais, embora tenha apenas 17,66% do seu território inserido no semiárido, com 103.590 km<sup>2</sup>, contém a quarta maior área dentre os nove Estados que compõem o semiárido, aproximando-se da área abrangida pelos Municípios dos Estados do Rio Grande do Norte e de Pernambuco que juntos somam 136.300 km<sup>2</sup>, correspondentes a 93,93 e 88,20% dos seus respectivos territórios. O Estado que teve maior número de municípios inserido no semiárido após a nova delimitação foi o Estado de Minas Gerais (45), seguido pelo Piauí (18) e Ceará (16) (PEREIRA JÚNIOR, 2007).

As características climáticas apontam irregularidades espaço-temporal das precipitações pluviais médias de 600 mm anuais, concentradas em três ou quatro meses no ano e evapotranspiração potencial média de 2000 mm anuais, conferindo um acentuado déficit hídrico. Segundo Maltchik (1999), o clima do semiárido brasileiro é considerado um dos mais complexos do mundo, principalmente devido ao seu sistema de circulação atmosférica decorrente da proximidade da linha do Equador. Os índices pluviométricos variam entre 200 e 800 mm de precipitação anual, com importantes períodos de seca. Segundo Alves et al. (2009), a amplitude térmica é muito baixa com os limites de temperatura média variando entre 25 e 30 °C. Na maior parte do domínio do semiárido brasileiro chove menos de 750 mm anuais, concentrados e distribuídos irregularmente em três meses consecutivos no período de novembro a junho (verão ou verão-outono). As vertentes a barlavento das serras e chapadas, especialmente as situadas próximo da costa, recebem maior precipitação devido às chuvas de convecção forçada que causam as chamadas chuvas orográficas ou de relevo.

Segundo Queiroz et al. (2006), embora estejam presentes no semiárido brasileiro formações vegetais compostas por florestas estacionais, campos rupestres e cerrado, predomina a caatinga (do tupi, caa = mata, tinga = branca), que no auge da estação seca se apresenta na forma de árvores e arbustos secos e desfolhados, dando a desolada impressão de uma vegetação morta. Os referidos autores caracterizam a Caatinga como tendo um estrato arbóreo relativamente baixo (geralmente até 5 m de altura) sem formar um dossel contínuo, árvores e arbustos geralmente com troncos finos, frequentemente armados, com folhas pequenas e compostas e folhagem decídua na estação seca. Predominam as famílias Leguminosae, Euphorbiaceae, Cactaceae e Bignoniaceae. Cactos e bromélias terrestres são elementos importantes na Caatinga. O estrato herbáceo é efêmero e aparece apenas na curta estação chuvosa. Neste bioma, as primeiras chuvas são acompanhadas pela transformação de árvores e arbustos secos

com troncos e ramos desnudos e esbranquiçados em uma vegetação verde e luxuriante, com imensidão de cores pela floração quase simultânea das espécies, associada ao aparecimento de uma fauna espetacular.

Somam-se as características edáficas de solos rasos assentados sobre um escudo cristalino praticamente impermeável, garantindo um escoamento superficial maior do que a porção de água que se infiltra. Segundo Alves et al. (2009), a região se caracteriza por apresentar terrenos cristalinos praticamente impermeáveis e terrenos sedimentares que se apresentam com boa reserva de água subterrânea. Os solos, com raras exceções, são pouco desenvolvidos, ricos em minerais, pedregosos e pouco espessos e com fraca capacidade de retenção de água.

A principal característica hidrológica do semiárido brasileiro é o caráter intermitente de seus rios. Esta característica está diretamente relacionada com o regime pluvial na região e as condições edáficas. O escoamento nos rios e riachos desaparece no período de estiagem. Estes podem ser temporários, quando o fluxo de água superficial mais duradouro é interrompido por um período de seca estacional, ou efêmeros, quando o fluxo de água superficial ocorre apenas após uma precipitação (MALTCHICK, 1999).

As características descritas anteriormente sugerem intenso escoamento superficial, haja vista o elevado índice pluviométrico nos três meses que concentram a estação chuvosa e a baixa capacidade de retenção da água no solo raso e coberto por uma vegetação caducifólia, incapaz de garantir a proteção contra os impactos das primeiras gotas de chuva, nas primeiras precipitações, sobretudo nas áreas onde a folhagem seca é levada pelo vento, favorecendo, desta forma, um selamento superficial que reduz a infiltração.

Em sua principal obra, *Os Sertões*, publicado em 1902, Euclides da Cunha descreve o escoamento superficial que ocorre já nas primeiras precipitações no sertão semiárido. A transcrição de parte do texto onde se refletem todas as características do clima quente e seco, dos solos rasos, da intensa precipitação em pouco tempo é a seguinte:

“...as primeiras bategas despenhadas das alturas não atingem a terra. A meio caminho se evaporam entre as camadas referventes que sobem, e volvem, repelidas, às nuvens, para, outra vez condensando-se, precipitarem-se de novo e novamente refluírem; até tocarem o solo que a princípio não umedece, tornando ainda aos espaços com rapidez maior,

numa rapidez quase como se houvessem caído sobre chapas incandescentes, para mais uma vez descerem numa permuta rápida e contínua, até que se formem, afinal os primeiros fios de água derivando pelas pedras, as primeiras torrentes em despenho pelas encostas, afluindo em regatos já avolumados entre as quebradas, concentrando-se, tumultuariamente em ribeirões correntosos; adensando-se, estes em rios barrentos traçados ao acaso, à feição dos declives, em cujas correntezas passam velozmente os esgalhos das árvores arrancadas, rolando todos e arrebetando na mesma onda, no mesmo caos de águas revoltas e escuras...”

“...se sucedem as chuvas regulares, transmudam-se os sertões, revivescendo. Passam, porém não raro, num giro célere, de ciclone. A drenagem rápida do terreno e a evaporação, que se estabelece logo mais viva, tornam-os outra vez, desolados e áridos”.

## 2.2. A política de açudagem no Estado do Ceará e as alternativas de armazenamento.

O cristalino tão presente no Nordeste brasileiro constitui, segundo Teixeira (2004), o embasamento de cerca de 75% do território cearense. Acima deste a cobertura de um solo raso, sem espaço para armazenamento de intensas precipitações concentradas em três ou quatro meses. Como resultado, a água escoia superficialmente, indo com rapidez aos leitos dos rios e finalmente ao oceano, mesmo que se utilizem todas as alternativas de armazenamento existentes, como barragens subterrâneas, cisternas, terraços nas encostas, dentre outras. Nestas circunstâncias, a açudagem tem sido de grande valia para o Estado do Ceará onde uma infraestrutura já montada é capaz de distribuir água por quase todo o Estado.

A política de açudagem no Estado do Ceará remonta ao ano de 1877, desde a época do Império, quando D. Pedro II, afirmando que venderia até a última pedra de sua coroa para que nenhum nordestino morresse de fome, autorizou a construção do açude Cedro que se iniciou em 1882. Dessa época para cá a política de açudagem já produziu no Estado mais de 8.000 açudes entre os públicos e particulares. Considerando-se somente os 233 açudes geridos pelo Estado, houve uma evolução na capacidade de armazenamento da ordem de 125,7 para 18.000 hm<sup>3</sup> no período de 1906 a 2008 (CEARÁ, 2009).

Segundo Malveira (2009), para solucionar o déficit hídrico característico de regiões do semiárido nordestino, foram elaborados programas de construção de reservatórios artificiais, inicialmente por meio do DNOCS e, mais recentemente, por órgãos estaduais. E a política de implantação de reservatórios públicos de pequeno e médio porte foi intensificada no período de 2001 a 2004.

No início da política de açudagem, alguns entraves culturais impossibilitavam o uso adequado da água armazenada. Acreditava-se, por exemplo, que se deveria poupar a água dos reservatórios, principalmente os reservatórios particulares, para uma eventual seca. Contudo não se atentava para o problema da evaporação. Atualmente, com a política de manejo dos reservatórios, além do uso primordial que é a dessedentação humana e animal, preconiza-se o uso múltiplo das águas dos reservatórios, gerando-se renda e se diminuindo a perda por evaporação.

Considerando-se as estimativas de evaporação em superfícies líquidas, representando em torno de 75% do total de chuva na bacia continental que retorna para a atmosfera (SHIH, 1985 apud PEREIRA et al. 1997), cerca de 4,5 bilhões de m<sup>3</sup> ainda restariam da capacidade total de armazenamento para proporcionar ao Estado do Ceará a possibilidade de desenvolvimento econômico e social. Segundo Gianniu e Antonopoulos (2007), a evaporação é um dos principais componentes do balanço hídrico de reservatórios e a principal perda de água para muitos deles.

Estes e outros dados justificam uma análise criteriosa na decisão de construção de reservatórios, contrapondo-a a possíveis alternativas de retenção da água precipitada numa determinada região. São apontadas alternativas como a construção de terraços nas encostas, possibilitando maior tempo de oportunidade para que a água infiltre no solo das áreas mais altas e chegue aos leitos dos rios nos períodos de estiagem. Nesta mesma linha de raciocínio, figuram os sistemas de captação *in situ* como aração e plantio em nível, sulcos barrados e sulcos Guimarães Duque (sulcos intercalados por camalhões altos e largos, formados por meio de cortes efetuados no solo em curva de nível) (SILVA e BRITO, 2006). Outras formas de captação da água da chuva são apontadas alternativamente, como cisternas para captação da água da chuva coletada nos telhados das casas e construção de barragens subterrâneas (BRITO et al., 1999; SILVA et al., 2007).

Há ainda a possibilidade de construção de pequenas barragens ou barreiros para dessedentação dos animais e para irrigação complementar, principalmente no

semiárido brasileiro, onde após o plantio, com o início das chuvas podem ocorrer períodos de estiagens (SILVA e BRITO, 2006).

Todas estas alternativas são válidas e devem ser somadas, pois, embora retenham pouca água na propriedade, retêm o proprietário pela possibilidade de produção da agricultura familiar e garantia do consumo humano e animal.

Estes reservatórios alternativos, no entanto, não podem substituir os açudes que perenizam rios intermitentes, proporcionam água para aglomerados urbanos, favorecem a produção de culturas de alto valor econômico, em larga escala, bem como a piscicultura e a carcinicultura, impulsionam o comércio local e o turismo e tornam a industrialização regional possível, além de diminuírem os problemas das cheias em anos com precipitação acima da média.

### 2.3. Importância dos Reservatórios para o Estado do Ceará

O Estado do Ceará possui cerca de 85% de seu território inserido no Semiárido, com a mesma grande variabilidade temporal das vazões fluviais, ensejando a vazões mínimas em períodos de estiagem e vazões máximas associadas à ocorrência de uma chuva intensa ou uma sequência de chuvas. Nas condições cearenses onde os cursos d'água são intermitentes, exibindo o seu leito nos períodos de estiagem, ocorrendo “indisponibilidade hídrica”, faz-se necessária a adoção de medidas capazes de conter o escoamento e assegurar disponibilidade hídrica ao longo do período de estiagem por meio da regularização das vazões nos cursos d'água.

A regularização de vazão por meio da construção de barragens é uma das alternativas para aumentar a disponibilidade hídrica, conforme mencionado em Carvalho e Burnett (2004), citando um trabalho elaborado pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF).

Segundo Teixeira (2004), a incerteza e a irregularidade das chuvas, o baixo potencial em águas subterrâneas e a intermitência dos rios condicionaram o Governo Federal e os governos dos Estados no Nordeste semiárido, particularmente, o Governo do Estado do Ceará, a seguirem uma política com vistas à criação de uma infraestrutura hídrica, baseada na construção de açudes, como forma de garantir, no tempo e no espaço, o abastecimento das populações na região.

No Estado do Ceará, os açudes se constituem nas principais fontes capazes de ofertar água com garantia para a sobrevivência e desenvolvimento das diversas atividades da sociedade. Uma evidência da importância da construção de reservatórios na regularização de vazões de rios do semiárido brasileiro diz respeito ao rio Jaguaribe, importante curso de água com 633 km de extensão e que drena aproximadamente 48% da área do Estado do Ceará, outrora conhecido como “o maior rio seco do mundo”, por apresentar-se, pouco tempo após o período chuvoso no Estado, totalmente seco, e que hoje é perenizado desde a barragem do açude Orós, a 325 km da nascente, com uma vazão regularizada de  $20,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e passando, após a construção do açude Castanhão, a contar com uma vazão regularizada de  $29,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a jusante deste (CEARÁ, 2009).

A acumulação superficial é prática bastante difundida em todo o Estado. Os açudes representam as obras de acumulação que juntamente com as obras de distribuição e obras pontuais constituem a infraestrutura hídrica do Estado do Ceará. Há cerca de 30.000 açudes no Estado do Ceará, sendo a maioria deles particular, com pequena capacidade de acumulação, não possuindo vazão regularizada significativa para a oferta de água e tendo função restrita ao atendimento de parte da população rural e dos rebanhos. Cerca de 8.000 açudes são classificados quanto ao volume hidráulico acumulável, de acordo com Art. 3º do Decreto nº 23.068 de 11 de fevereiro de 1994, em: micro (até  $0,5 \text{ hm}^3$ ), pequeno (entre  $0,5 \text{ hm}^3$  e  $7,5 \text{ hm}^3$ ), médio (entre  $7,5 \text{ hm}^3$  e  $75 \text{ hm}^3$ ), grande (entre  $75 \text{ hm}^3$  e  $750 \text{ hm}^3$ ) e macro (acima de  $750 \text{ hm}^3$ ). Os açudes com capacidade de armazenamento abaixo de  $10 \text{ hm}^3$  têm como principal função fornecer água para a estação seca, após a estação chuvosa do mesmo ano, não servindo como reservas interanuais por secarem quando da ocorrência de anos secos consecutivos. Os açudes interanuais são capazes de armazenar água em determinado ano e guardar parte do acumulado para anos subsequentes e são operados de forma que somente haja falha no fornecimento de água em 10% do tempo. Esses são os que possuem capacidade de armazenamento acima de  $10 \text{ hm}^3$ . Há ainda os açudes Orós e Castanhão, com respectivas capacidades de armazenamento de  $1.940 \text{ hm}^3$  e  $6.700 \text{ hm}^3$ , considerados reservas estratégicas, com baixíssima probabilidade de secarem (CEARÁ, 2005).

## 2.4. Impactos na construção de reservatórios

O aumento da disponibilidade hídrica em regiões semiáridas, incluindo-se o Estado do Ceará e o Semi Árido brasileiro, produz benefícios indiscutíveis na qualidade de vida da população e na prosperidade econômica da área e das circunvizinhanças. No entanto os empreendimentos associados ao aumento da disponibilidade podem causar sérios impactos nos meios físico ou abiótico, biótico e antrópico.

Matos et al. (2003) apresentaram uma discussão sobre os aspectos positivos e negativos associados à construção de barragens. Nesta discussão os autores ressaltam que a formação de um reservatório de água para a produção de energia elétrica não deve ser avaliada da mesma forma que a construção de um reservatório para abastecimento público ou para a viabilização da atividade agropecuária, principalmente projetos de irrigação.

Segundo Pruski et al. (2005), a construção e o enchimento dos reservatórios de acumulação Sobradinho, Itaparica/Luiz Gonzaga, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó acarretaram um expressivo efeito da regularização das vazões, aumentando as vazões mínimas e as vazões associadas à permanência de 95% na estação fluviométrica Traipu, localizada a jusante destes reservatórios, quando comparados os estudos de vazão nos anos anteriores e posteriores à construção e enchimento dos mesmos.

Pruski et al. (2006) ressaltam a importância da regularização de vazão na promoção do acúmulo de excessos hídricos para aproveitamento em períodos cujas vazões naturais são menores do que a demanda.

Segundo Matos et al. (2003), os principais impactos positivos na construção de reservatórios são: regularização da vazão, armazenamento de água para abastecimento público e industrial, atenuação dos danos decorrentes de uma cheia, viabilização da agricultura e pecuária, criação de ambiente favorável ao desenvolvimento da piscicultura, disponibilização de água para animais domésticos e silvestres, aumento da recarga de água subterrânea e elevação do nível freático, maior facilidade de depuração de águas poluídas, criação de pontos de lazer e recreação e melhoria no micro clima local.

Os impactos negativos foram divididos segundo o meio em que atuam. No meio físico: perda de forma irreversível das áreas inundadas, degradação de áreas usadas para o empréstimo e o depósito de material rochoso e de bota-foras para a construção da barragem, instabilidade dos taludes marginais do reservatório, riscos de



eutrofização da água, aumento do potencial evaporativo da água, elevação no nível do lençol freático de áreas a montante do reservatório e risco de produção de metano que causa problemas de efeito estufa e alterações na paisagem regional. No meio biótico: perda de florestas e de espécies da flora, e diminuição de área para sobrevivência de animais terrestres de vida silvestre, modificação brusca de um ecossistema terrestre para aquático, alterações na composição da ictiofauna, interrupção da migração de peixes e riscos de proliferação de vetores de doenças associadas à água. Meio antrópico: prejuízos no uso da água para outros fins, necessidade de deslocamento de populações de áreas inundadas, perda, de forma irreversível, de sítios histórico-culturais e paisagens de grande valor ecológico, possível interrupção de rodovias, estradas rurais, etc. e inundações de cidades ou vilas, riscos de aumento da miserabilidade e de extermínio de grupos étnicos e aumento da taxa de desemprego rural (MATOS et al., 2003).

Carneiro e Campos (2006) encontraram 296 impactos nas áreas de inundação e influência do açude Atalho, em Brejo Santo-CE, sendo 111 benéficos, 158 adversos e 27 de caráter indefinido. Os principais efeitos adversos encontrados foram a degradação do solo no meio abiótico, a erradicação de parte da flora e fauna no meio biótico e no meio antrópico destacaram-se a paralisação de atividades produtivas, o desemprego, a ruptura de relações familiares e sociais, o choque cultural entre a população e o grupo de trabalhadores da obra. Os principais impactos positivos são desenvolvimento de atividades hidroagrícolas e piscícolas, possibilidade de abastecimento d'água para os municípios de Jati e Brejo Santo, fornecimento de água regularizada para os setores secundário e terciário.

## 2.5. Evaporação nos reservatórios.

A evaporação da água é um processo que consiste na transferência da mesma para a atmosfera, na forma de vapor de água, após a sua conversão a partir dos estados líquido ou sólido. Este processo, embora em nível global não seja considerado uma perda de água, consiste numa das saídas do balanço hídrico em termos locais.

É justamente neste nível local, e mais especificamente no nível de bacias hidrográficas, que a estimativa do balanço hídrico, e conseqüentemente de todos os seus componentes, é considerada de suma importância para estudos diversos. Dentre outros estudos, alguns citados em Burman e Pochop (1994), Pereira (2004), Gianniou e

Antonopoulos (2007) e Assouline et al. (2008) são: previsão de níveis de reservatórios, operação e manejo de recursos hídricos, campos irrigados e áreas vegetadas, impactos ambientais, qualidade de água e planejamento de obras hidráulicas.

Para que ocorra a evaporação ou a evapotranspiração há necessidade de um suprimento de energia, uma força propulsora para o deslocamento de vapor de água e a renovação do ar saturado na circunvizinhança da superfície evaporante, os quais, por sua vez, dependem de elementos do clima como temperatura, umidade relativa e velocidade do vento.

A síntese do processo evaporativo descrita a seguir também é encontrada em Burman e Pochop (1994), Allen et al. (1998) e Tucci e Beltrame (2004), além de em outras publicações. A radiação solar e, em menor proporção, a temperatura ambiente do ar, são as fontes de energia para o processo, capazes de garantir as 585 calorias necessárias à mudança do estado líquido para o estado gasoso de 1,0 g de água, a 25 °C, localizado na superfície evaporante. Esta mudança de estado aumenta a quantidade de vapor de água nas camadas de ar adjacentes à superfície, aumentando a pressão de vapor. O vapor de água desloca-se destas camadas de ar para as camadas mais distantes da superfície evaporante na medida que a pressão de vapor nestas é menor. Na proporção que ocorre a evaporação, as camadas de ar adjacentes à superfície líquida tornam-se saturadas em vapor de água e ocorre o equilíbrio entre o ar saturado e a superfície líquida, de modo que cessa a evaporação. Nesta fase do processo, torna-se importante a substituição da massa de ar saturada por outra massa com menor pressão de vapor. Esta renovação será tanto maior quanto maior for a velocidade do vento. Isto posto, justifica-se a importância das variáveis meteorológicas acima mencionadas.

Os métodos para estimativa da evaporação são classificados na literatura sobre o assunto, de acordo com os processos e/ou os instrumentos utilizados (BURMAN e POCHOP, 1994; PEREIRA et al., 1997; TUCCI e BELTRAME, 2004; PEREIRA, 2004 e GIANNIOU e ANTONOPOULOS, 2007). A seguir são descritos os principais métodos encontrados na literatura.

#### 2.5.1. Métodos da transferência de massa ou baseados na equação de Dalton

Estes métodos baseiam-se na primeira Lei de Dalton que relaciona evaporação e o déficit pressão de vapor:

$$E_{sl} = c_D (e_s - e_d) \quad (1)$$

em que:  $E_{sl}$  = evaporação na superfície líquida;  $c_D$  = coeficiente empírico;  $e_s$  = pressão de vapor de saturação, na temperatura da superfície líquida;  $e_d$  = pressão de vapor numa altura  $d$  acima da superfície líquida.

Por se tratar de um método semiempírico, os coeficientes de ajustes devem ser determinados para cada lago, variando conforme as condições locais e do próprio lago. Diversas equações já foram sugeridas para locais específicos, segundo o método de transferência de massa, algumas delas apresentadas em Pereira et al. (1997) e outras em Tucci e Beltrame (2004). Nestas equações, o coeficiente  $c_D$  passou a ser representado por uma função da velocidade do vento do tipo  $f(u) = a + bu_d$ , em que  $a$  e  $b$  são coeficientes de ajustes e  $u_d$  é a velocidade do vento tomada a uma distância  $d$  da superfície líquida, passando a evaporação na superfície líquida a ser representada da seguinte forma:

$$E_{sl} = f(u)(e_s - e_d) \quad (2)$$

### 2.5.2. Métodos baseados no Balanço Hídrico

Conforme se vê em Tucci e Beltrame (2004), os métodos baseados no balanço hídrico consideram a equação da continuidade do lago ou reservatório e são teoricamente precisos. A equação da continuidade é dada por:

$$\frac{dV}{dt} = I - O - E_{sl} A_R + Ppt A_R \quad (3)$$

em que:  $dV/dt$  = variação do volume  $V$  contido no reservatório com o tempo  $t$ ;  $I$  = vazão total de entrada no reservatório;  $O$  = Vazão efluente no reservatório;  $E_{sl}$  = evaporação;  $Ppt$  = precipitação pluvial sobre o reservatório e  $A_R$  = área do reservatório dada pela média da área no início e no final do período considerado.

Isolando-se a evaporação da equação (3), tem-se:

$$E_{sl} = \frac{I - O - \frac{dV}{dt}}{A_R} + Ppt \quad (4)$$

Segundo Tucci e Beltrame (2004), algumas fontes de erro decorrem da dificuldade de obtenção precisa dos dados como a vazão afluente para o lago e precipitação sobre o lago.

### 2.5.3. Métodos baseados no Balanço Energético

Estes métodos se baseiam na lei da conservação da energia para a qual a energia armazenada no sistema é o resultado da contabilidade entre as entradas e saídas de energia do sistema. Gianniu e Antonopoulos (2007) apresentam uma abordagem para determinação da evaporação por meio do balanço energético, considerando a seguinte equação:

$$\Delta S = R_s - R_{sr} + R_a - R_{ar} - R_b - H - LE + G + A_v \quad (5)$$

em que:  $\Delta S$  = variação de energia no reservatório ( $W.m^{-2}$ );  $R_s$  = radiação de ondas curtas incidente na superfície da água ( $W.m^{-2}$ );  $R_a$  = radiação de ondas longas proveniente da atmosfera e incidente na superfície da água ( $W.m^{-2}$ );  $R_{sr}$  = radiação de ondas curtas refletida ( $W.m^{-2}$ );  $R_{ar}$  = radiação de ondas longas refletida ( $W.m^{-2}$ );  $R_b$  = radiação de ondas longas emitida pelo corpo de água que retorna à atmosfera ( $W.m^{-2}$ );  $H$  = energia transmitida para a atmosfera, como calor sensível, pelos processos de condução e convecção ( $W.m^{-2}$ );  $LE$  = energia utilizada para a evaporação;  $G$  = transferência de calor entre a água do reservatório e o solo abaixo do mesmo ( $W.m^{-2}$ ) e  $A_v$  = energia advectiva no corpo de água ( $W.m^{-2}$ ).

Os autores mencionam ainda outros termos de energia que poderiam entrar na equação como os decorrentes da precipitação, evaporação, reações químicas e

biológicas no reservatório, mas que por serem de pouca expressão são ignorados. Ressaltam ainda que em alguns casos como em reservatórios grandes e profundos, os componentes  $G$  e  $A_v$ , considerando períodos diários, são muito pequenos e ignorados, sob a alegação de que não interferem no resultado do balanço, simplificando (5):

$$S = R_s - R_{sr} + R_a - R_{ar} - R_b - H - LE \quad (6)$$

A partir de (6), pode-se calcular a evaporação por meio do termo que representa a energia utilizada na evaporação,  $LE$ :

$$LE = \rho L_v E_{sl} \quad (7)$$

em que;  $\rho$  = densidade da água (=1000 kg.m<sup>-3</sup>);  $L_v$  = calor latente de vaporização (J.kg<sup>-1</sup>) e  $E_{sl}$  = evaporação na superfície de água livre (m.s<sup>-1</sup>).

Combinando-se as equações 6 e 7 e resolvendo em termos de  $E$ , tem-se:

$$E_{sl} = \frac{R_s - R_{sr} + R_a - R_{ar} - R_b - H - S}{\rho L_v} \quad (8)$$

Gianniou e Antonopoulos (2007) descrevem ainda a forma de obtenção dos termos localizados no numerador de (8).

#### 2.5.4. Métodos Empíricos

Burman e Pochop (1994) abordam os métodos empíricos baseados na equação da lei de Dalton e que utilizam elementos do clima. Os autores ressaltam que numerosos fatores devem ser considerados na estimativa da evaporação de uma superfície líquida por meio de métodos empíricos, destacando a extensão da área da superfície líquida, a profundidade do reservatório e as condições circundantes. Normalmente, as superfícies líquidas que abrangem grandes áreas têm reduzidas as taxas de evaporação porque o próprio vapor de água que passa ao ar através da

evaporação torna-o mais úmido. A profundidade do reservatório afeta a temperatura da água e em reservatórios de profundidades maiores as variações de temperatura da água ao longo de um ano levam a uma alteração na variação anual da temperatura do ar, nas proximidades da área do reservatório, quando comparadas a outras áreas de mesmas condições climáticas, mas afastadas do reservatório. Em ambientes áridos, as taxas de evaporação nas superfícies líquidas serão maiores do que em ambientes úmidos, especialmente em locais com considerável advecção.

Burman e Pochop (1994) mencionam que a maioria dos métodos combinados é derivada do método de Penman e visam à substituição de dados meteorológicos de difícil obtenção por outros de fácil obtenção.

#### 2.5.5. Métodos que utilizam tanque de evaporação ou evaporímetros

Os evaporímetros ou tanques de evaporação são bastante utilizados para a determinação da evaporação em lagos, uma vez que eliminam a necessidade de grandes quantidades de dados meteorológicos, sendo, segundo Pereira et al. (1997), aplicáveis tanto para estimativa em reservatórios já existentes quanto para a elaboração de projetos de construção de novos reservatórios.

Os tipos de tanques mais recomendados para comparação com a evaporação da água em lagos são os tanques GGI 3000 e o de 20 m<sup>2</sup>, ambos de origem russa e o tanque Classe “A”, de origem americana.

Segundo Volpe e Oliveira (2003) a utilização de tanques para estimar a evaporação em lagos e em culturas se deve à facilidade de medir-se a evaporação em tanques. Os autores afirmam que uma aproximação simples para se estimar a evaporação de lagos por meio da evaporação em tanques consiste na utilização de um coeficiente de tanque definido como a razão entre a evaporação do lago ou de um tanque com diâmetro igual ou superior a 3,60 m e a evaporação do tanque.

Segundo Pereira et al. (1997), uma forma prática de se estimar a evaporação no lago a partir da evaporação no tanque se dá a partir da seguinte equação:

$$E_{ls} = K_p E_p \quad (9)$$

em que:  $E_{ls}$  = evaporação no lago,  $K_p$  = coeficiente do tanque e  $E_p$  = evaporação no tanque.

Segundo Gangopadhyaya et al. (1966) *apud* Pereira (2004), o tanque Classe “A” é o mais utilizado para a estimativa de evaporação em lagos. Os autores mencionam que o clima pode afetar o coeficiente do tanque, devendo ser 0,7 em regiões onde as temperaturas do ar e da água no tanque são iguais. O coeficiente 0,6 deve ser utilizado em climas quentes e secos, quando a temperatura média da água no tanque for menor do que a temperatura média do ar. Em áreas úmidas, onde a temperatura média da água do tanque é maior do que a do ar, deve-se utilizar o coeficiente 0,8.

Brutsaert (1970) *apud* Pereira et al. (1997) afirma que os tanques fornecem medições grosseiras e são mais adequados à determinação da evaporação em períodos anuais.

Pereira (2004) apresenta trabalhos cujos resultados sugerem variações no coeficiente do tanque devido ao clima local, à sazonalidade, em um mesmo local, à variação no regime pluviométrico e às condições ambientais da localidade onde o lago ou reservatório se encontra.

## 2.6. Modelos computacionais em hidrologia

Além de todo um aparato legal, institucional e estrutural para a gestão dos recursos hídricos, deve-se promover a busca por soluções que otimizem a utilização dos mesmos.

Uma das formas mais comuns de armazenamento de água para os diversos usos consiste na construção de reservatórios. O manejo de sistemas de reservatórios é um componente-chave no gerenciamento de recursos hídricos (CASTELLETTI e SONCINI-SESSA, 2007), além de ser de natureza complexa por envolver uma grande variedade de fatores qualitativos ambientais, sociais, políticos (FU, 2008) e, ainda, econômicos. Resultados recentes de algumas pesquisas em otimização no manejo de reservatórios estão em Teixeira e Mariño (2002), Brandão (2004), Wurbs (2005), Kumar et al. (2006); Castelletti e Soncini-Sessa (2007), Afshar et al. (2007) e Fu (2008).

A informática contribui significativamente para os processos decisórios na gestão de reservatórios fornecendo subsídios para tal, através dos sistemas de informações geográficas (SIG) e dos modelos computacionais voltados ao gerenciamento dos recursos hídricos e ao comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Por modelos hidrológicos computacionais entendem-se aqueles representativos da hidrologia de uma determinada região cujas relações entre as variáveis de entrada e saída do modelo são processadas em programas computacionais.

As principais características dos modelos os classificam em *estocásticos* ou *determinísticos* se as variáveis envolvidas forem de natureza aleatória ou não; *empíricos* ou *conceituais* quando as relações entre as variáveis são baseadas em observações ou nos processos envolvidos; neste caso, alguns modelos podem conter ambos os tipos, sendo um misto entre os dois; *discretos* ou *contínuos* quando os dados representam fenômenos em intervalos de tempos pré-determinados ou quando representam fenômenos contínuos no tempo, sendo algumas vezes necessária a discretização de fenômenos contínuos para simplificação do modelo; *pontuais* ou *distribuídos* se os dados que alimentam o modelo variam apenas com o tempo ou quando possuem variabilidade espacial e temporal; *estáticos* ou *dinâmicos* quando o resultado produzido é decorrente de uma única aplicação do modelo ou quando o resultado produzido é decorrente de várias aplicações do modelo, cada uma fornecendo resultados que alimentam as aplicações posteriores, até que uma condição pré-estabelecida seja alcançada.

Há ainda a classificação dos modelos computacionais com base na técnica matemática empregada para a determinação dos parâmetros do modelo. Neste caso são *precisos* quando utilizam regras matemáticas precisas para a obtenção dos resultados, *heurísticos* quando a solução que se busca é alcançada por meio de procedimentos heurísticos ou, conforme Melián et al. (2003), procedimentos que, empregando conhecimento acerca de um problema e das técnicas aplicáveis, apontam soluções próximas da ideal.

Os sumários de alguns modelos computacionais encontram-se no Inventário de Modelos Hidrológicos mantido conjuntamente pelo Bureau of Reclamation e pela Texas A&M University, no sítio <http://hydrologicmodels.tamu.edu>. Neste inventário os modelos são classificados em modelos de chuva-vazão, os quais podem ser gerais, de multipropósito, de sedimentos e de qualidade da água; modelos hidráulicos; modelos hidroclimáticos; modelos estocásticos; modelos de manejo de bacias



hidrográficas/recursos hídricos; modelos baseados em sistemas de informações geográficas e modelos paramétricos.

Um exemplo de utilização de modelo computacional no auxílio ao manejo de recursos hídricos pode ser visto em Wurbs (2005), em que o autor apresenta um sistema de modelagem para avaliação da disponibilidade e garantia de uso dos recursos hídricos no atendimento aos diversos usuários do Estado do Texas, EUA, denominado modelo de simulação WRAP (Water Rights Analysis Package). Este modelo simula o manejo dos recursos hídricos de uma ou mais bacias hidrográficas com base em um sistema de prioridades de alocação de água. Os impactos nos recursos hídricos decorrentes de projetos desenvolvidos também podem ser avaliados. O modelo pode ser aplicado em qualquer sistema composto por rios e reservatórios, desde que os dados de entrada para o modelo sejam adaptados para o sistema que se deseja estudar. Os dados de entrada neste modelo são divididos em dados hidrológicos e de direito de uso. Os dados hidrológicos são séries históricas de vazões naturalizadas (sem as retiradas por parte dos usuários ou sem interferência de estruturas hídricas que alterem a vazão natural do rio) mensais cobrindo vários anos em locais designados como pontos de controle; parâmetros da bacia para possibilitar a atribuição da vazão em locais sem medição a partir da vazão dos locais com medição; fatores de perda em canais e sequências de taxas mensais de evaporação e precipitação nos reservatórios.

O modelo para política agrícola/ambiental, APEX (*Agricultural Policy/Environmental eXtender*), é um modelo agregado desenvolvido com o intuito de fornecer uma ferramenta para manejo de propriedades rurais ou para manejo de pequenas bacias hidrográficas com a finalidade de obtenção da máxima eficiência produtiva e manutenção da qualidade ambiental. Foi construído para avaliar várias estratégias de uso e ocupação do solo, contemplando a sustentabilidade, erodibilidade (pelo vento ou pela água), aspectos econômicos, disponibilidade e qualidade de água, qualidade do solo, competição entre plantas, aspectos climatológicos e fitossanitários. No uso em pequenas bacias hidrográficas, a área pode ser subdividida em tantas subáreas quantas forem necessárias para a homogeneidade em termos de solo, uso do solo, manejo e clima (TEXAS A & M UNIVERSITY e BUREAU OF RECLAMATION, 1999).

O Sistema Geral de Suporte à Decisão de Manejo de Bacias Hidrográficas ou MODSIM – *Generalized River Basin Management Decision Support System* está em contínuo desenvolvimento, desde 1979, pela Colorado State University, com o objetivo

de fornecer uma ferramenta capaz de simular tanto operações no sistema físico de bacias hidrográficas quanto no sistema administrativo de concessão e alocação do uso da água. Foi projetado para ser flexível e robusto, permitindo uma ampla gama de análises, desde períodos diários, requerendo vazões diárias em cursos de água, até períodos longos, como manejo e planejamento mensal em bacias hidrográficas. É um modelo capaz de modelar, em larga escala, sistemas hidrográficos empregando uma rede de fluxo de custo mínimo e um algoritmo de otimização para alocação de água de acordo com as concessões (direito à água), contratos de armazenamentos, acordos internacionais e avaliação econômica. Um importante objetivo do modelo tem sido o desenvolvimento de uma plataforma amigável para tomadores de decisão e administradores, por meio de uma interface gráfica para criação de rede de drenagem, importação de dados e impressão gráfica georreferenciada dos resultados. Este modelo é capaz de simular interações rios-aquíferos para uso em conjunto de águas superficiais e subterrâneas (TEXAS A & M UNIVERSITY, 2007).

O HYDROSS (*Hydrologic River Operations Study System*), desenvolvido pelo U. S. Bureau of Reclamation, trata-se de um modelo de distribuição de águas superficiais para estudos de planejamento e avaliação de demandas existentes e propostas em um sistema hidrográfico, por meio da simulação dos efeitos sobre a hidrologia histórica natural do sistema hídrico (TEXAS A & M UNIVERSITY e BUREAU OF RECLAMATION, 2007a).

Outro programa gerado para planejamento e manejo de bacias hidrográficas é o MIKE BASIN. Este modelo utiliza Arc View GIS como interface gráfica com o usuário, e ainda procedimentos de GIS, inclusive delineamento de bacias hidrográficas. O objetivo do modelo é a simulação de vazões naturais (vazões provenientes de áreas de drenagens onde não ocorrem intervenções artificiais como reservatórios, transposição e alterações na demanda causada pelo homem), operação de reservatórios para multiuso da água e alocação de água com base em prioridades e direito de uso. Permite o uso em conjunto de águas de superfície e subterrâneas. Uma extensão do programa permite simulações da qualidade da água com base em fontes de poluição pontuais e difusas (TEXAS A & M UNIVERSITY e BUREAU OF RECLAMATION, 1999b).

Malveira (2009) apresenta os modelos hidrológicos mais citados na literatura como, dentre outros, o IPH II, o qual tem sido utilizado para estimativa de hidrogramas de cheias em bacias urbanas; LARSIM, desenvolvido principalmente para hidrologia superficial; MODHAC, adotado para a geração de escoamento na fase de

diagnóstico do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará; SHE, desenvolvido por alguns centros de pesquisa da Europa, com base em equações físicas; e TOPMODEL, modelo hidrológico de base física de uso bastante difundido.

## 2.7. Escoamento Superficial

Segundo Chow et al. (1988) o espaço onde está toda a água da Terra é denominado hidrosfera e ocupa uma faixa de 15 km acima da superfície, na atmosfera, até 1 km abaixo da superfície, na litosfera. O movimento da água neste espaço é denominado ciclo hidrológico e ocorre continuamente.

O escoamento superficial é parte do ciclo hidrológico. Antes de se iniciar o escoamento superficial a água precipitada é interceptada pela vegetação; em seguida, esgotada a capacidade de interceptação, passa ao solo, infiltrando-se. Conforme se acumula a infiltração da água, a taxa de infiltração diminui e, tornando-se menor do que a intensidade da precipitação, favorece a formação do empoçamento, ou armazenamento superficial da água, conseqüente da rugosidade do solo. Decorridos esses processos, passa a ocorrer o escoamento superficial.

A determinação do volume escoado superficialmente em uma bacia hidrográfica pode ser realizada por estimativa ou por meio de individualizações do escoamento superficial de hidrogramas obtidos de estações fluviométricas instaladas no seu exutório. Pruski et al. (2006) detalham alguns métodos já consagrados para a estimativa do escoamento superficial como o Método Racional, o método do Número da Curva e o do balanço da água na superfície do solo. Silva (2002) descreve outros modelos para estimativa do escoamento superficial ou que contenham algum módulo para esta estimativa, inclusive aqueles desenvolvidos para uso em bacias hidrográficas, a saber: o WEPP (Water Erosion Prediction Project), utilizado em pequenas bacias, dividindo-as em regiões homogêneas de geração de escoamento superficial; o KINEROS (Kinematic Erosion), também utilizado em pequenas bacias, tanto em zona rural como urbana, o qual divide a bacia em um conjunto de encostas, permitindo a análise do escoamento em uma dimensão; o CASC2D (Cascade Two-Dimensions), no qual o escoamento superficial é analisado considerando o escoamento sobre o terreno e em canais; o TOPMODEL, que analisa o escoamento proveniente de áreas de contribuição a partir de um índice topográfico com variação espacial, considerando a

precipitação e a evapotranspiração potencial homogêneas em toda a bacia e adotando o valor médio e o HMS (Hydrological Model Systems) cujo módulo para estimativa do escoamento superficial modela o escoamento sobre o terreno pelo método de ondas cinemáticas e o escoamento em canais pelo método de Muskingun-Cunge.

O método do Número da Curva (CN), desenvolvido pelo Natural Resource Conservation Service (NRCS) dos Estados Unidos, é um método bastante utilizado pela maioria dos modelos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), segundo Silva (2002). Wurbs (2005), ao apresentar o modelo WRAP, mencionado anteriormente, cita o método CN como aquele utilizado na maioria das aplicações no Estado do Texas. No entanto afirmam que no modelo WRAP o método CN é aplicado de maneira diferente do convencional: primeiro é obtido o escoamento em uma estação fluviométrica e, a partir do método do NRCS, com o valor CN para a área de drenagem da estação fluviométrica, a precipitação é obtida. Após o ajuste da precipitação por uma média anual de longo prazo, este valor é substituído novamente na equação do método do NRCS com o valor CN para a área de drenagem sem estação fluviométrica, obtendo-se o escoamento superficial.

Kannan et al. (2008) citam ainda os métodos SWAT (Soil and Water Assessment Tool) e Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) como utilizando o método da CN, mas com modificações que contemplam a variação da umidade do solo, continuamente.

## 2.8. Escoamento em canais naturais

Os canais naturais existem na natureza como córregos, rios e estuários. Nestes canais, geralmente o escoamento se dá em condições de regime variado e não permanente, nos quais as características mudam em função do tempo e do espaço. A propagação do escoamento em um canal natural é complexa uma vez que há variação espacial da geometria da calha, da declividade e do coeficiente de rugosidade.

Tucci (2004) menciona quatro tipos de modelos utilizados para simulação do escoamento em canais naturais: armazenamento, o qual utiliza a equação da continuidade concentrada e a relação entre armazenamento e vazão efluente e afluente em um trecho para o escoamento em rio ou canal; onda cinemática, que utiliza a equação da continuidade distribuída e uma simplificação da equação da quantidade de

movimento, desprezando os termos de pressão e inércia; difusão, que adiciona o termo de pressão ao modelo anterior, podendo, assim, representar o efeito de jusante sobre o escoamento, permitindo considerar os efeitos de jusante que ocorre por exemplo na chegada de um reservatório e, por último, o modelo hidrodinâmico que considera, além do termo de pressão, o termo de inércia, podendo representar situações em que há grande variação temporal e espacial da velocidade do escoamento, necessitando de soluções numéricas para as equações diferenciais, tendo como desvantagem a maior quantidade de dados e como vantagem a melhor precisão na representação física do escoamento.

### 2.8.1. Modelo de armazenamento

Porto (2004) sugere que devido à complexidade da propagação do escoamento nos canais naturais, para a sua representação são utilizados métodos aproximados, genericamente denominados modelos hidrológicos ou de armazenamento, no qual somente se considera no processo de propagação e atenuação da onda o efeito do armazenamento temporário na calha principal e nas áreas de inundação.

Os modelos tipo armazenamento utilizam a equação da continuidade e uma relação entre o armazenamento e a vazão efluente e de entrada do trecho para simular o escoamento no rio ou canal. Neste modelo despreza-se a variação longitudinal da área e da vazão no canal.

Tucci (2004) afirma que os modelos deste tipo se diferenciam pela expressão usada na equação que relaciona o armazenamento com as vazões afluentes e efluentes e que, na fase de ajuste, estes modelos necessitam apenas dos hidrogramas de montante e de jusante, consistindo-se em vantagem, uma vez que, na prática, busca-se resposta rápida e há carência de dados.

McCarty (1938) *apud* Porto (2004) desenvolveu o método de Muskingum, como um modelo tipo armazenamento para propagação do escoamento no rio Muskingum, nos Estados Unidos. Neste método a relação linear simples entre armazenamento e vazão é dada por:

$$S = [XI + (1 - X)O]K \quad (10)$$

em que:  $K$  é uma constante de tempo de trânsito para o trecho considerado, em s e  $X$  é um fator de ponderação que relaciona as vazões afluente ( $I$ ) e efluente ( $O$ ) com o armazenamento no trecho.

Ainda segundo Porto (2004), é realizado um procedimento numérico utilizando a equação da continuidade, na forma de diferenças finitas, para intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) e que se resolvendo para a vazão efluente no tempo final obtém-se:

$$O_{t+1} = C_1 I_{t+1} + C_2 I_t + C_3 O_t \quad (11)$$

sendo:

$$C_1 = \frac{-KX + 0,5\Delta t}{K(1+X) + 0,5\Delta t} \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{KX + 0,5\Delta t}{K(1+X) + 0,5\Delta t} \quad (13)$$

$$C_3 = \frac{K(1-X) - 0,5\Delta t}{K(1+X) + 0,5\Delta t} \quad (14)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (15)$$

Para que não haja possibilidade de a vazão estimada ser negativa, devem ser observadas as seguintes relações entre  $K$ ,  $X$  e  $\Delta t$ :

$$X \leq \frac{\Delta t}{2K} \leq (1-X) \quad (16)$$

Cunge (1969) *apud* Tucci (2004) propôs um método baseado no método de Muskingun para estimativa do deslocamento da onda de cheia ao longo do curso d'água, desenvolvendo equações para estimativa de  $K$  e  $X$  que são propriedades hidráulicas de cada trecho de rio (Equações (17) e (18)). A derivação matemática é condensada e apresentada por Ponce (1981).

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q_0}{B S_0 C_K \Delta x} \right) \quad (17)$$

e

$$K = \frac{\Delta x}{C_K} \quad (18)$$

em que:  $Q_0$  = vazão média no trecho, em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;  $C_K$  = celeridade da onda de cheia, em  $\text{m s}^{-1}$ ;  $B$  = largura média do trecho na superfície, em m;  $S_0$  = declividade do trecho, e  $\text{m m}^{-1}$  e  $\Delta x$  = comprimento do trecho do canal, em m.

## 2.9. Sensoriamento remoto

Classicamente, sensoriamento remoto (SR) é definido como um conjunto de técnicas desenvolvidas com a finalidade de obter informações acerca de objetos sem que haja o contato direto com os mesmos.

Para que seja possível o SR são necessários: um sensor para captação de algum estímulo, um objeto de onde provém o estímulo para o sensor e uma fonte geradora do estímulo. Com o nível tecnológico atual, o SR tem por estímulo a radiação eletromagnética (REM). A fonte que emite radiação eletromagnética pode ser qualquer corpo que possua temperatura acima do zero absoluto (0 K). O Sol e a Terra são as principais fontes de energia eletromagnética para os estudos de sensoriamento remoto aplicados aos recursos naturais. Os sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação (MOREIRA, 2005). Os níveis de aquisição dos dados de sensoriamento remoto podem ser orbital, aéreo ou terrestre, conforme a localização dos sensores.

No nível do solo, os sensores são utilizados para obter dados de radiação refletida e/ou emitida por alvos na superfície terrestre, a curta distância e em pequenas áreas amostrais, permitindo maior fidelidade no resultado da investigação. Dois exemplos de aplicação do sensoriamento remoto no nível do solo podem ser vistos em Reis et al. (2006), que relacionaram o rendimento de grãos de trigo com a reflectância da radiação solar, e Demattê et al. (2005) que concluíram pela possibilidade de

diferenciação do solo quanto à textura e às alterações químicas devidas à aplicação de um subproduto da produção de açúcar e álcool, a torta de filtro.

Os sensores utilizados em nível suborbital são aqueles geralmente acoplados em aeronaves tripuladas e os principais são as câmeras fotográficas, os imageadores e os radares e, como exemplo, pode-se citar Carvalho Júnior et al. (2008) que utilizaram fotografias aéreas de 1999, na escala de 1:10.000, a fim de refinar e aprimorar a classificação de imagens de sensor em nível orbital. Os autores ressaltaram a importância das fotografias aéreas na identificação e separação de classes normalmente difíceis de ser detectadas por sensores orbitais com resolução espacial entre 20 e 30 m.

Os satélites artificiais são dispositivos que orbitam em torno da Terra ou de outro planeta ou satélite natural com a finalidade de obter informações acerca de sua superfície. Os dados obtidos são enviados para as estações na superfície da Terra que os transformam em dois tipos de produtos: fotografia e imagem digital. As fotografias são e são interpretadas por técnicas de interpretação visual e as imagens digitais, são, na maioria das vezes, analisadas por métodos computacionais, em sistemas de informações geográficas, por meio de técnicas de geoprocessamento.

### 2.9.1. Fotografias e Imagens Digitais de satélites

As fotografias são um produto obtido nas plataformas dos satélites e são interpretadas com base em certas características como padrão, tonalidade/cor, textura e sombra. O padrão refere-se à forma como se apresentam determinados alvos captados pela fotografia aérea; por exemplo, áreas agrícolas geralmente se apresentam como polígonos regulares ou como círculos quando da irrigação por pivô central. A tonalidade diz respeito à intensidade com que uma determinada cor se apresenta de modo que áreas cobertas por água apresentam-se no nível de cinza mais escuro em relação a áreas ocupadas por cidades, já que estas refletem e aquelas absorvem mais a radiação solar. A cor, por ser mais facilmente perceptível ao olho humano, é mais adequada para diferenciar áreas agrícolas, por exemplo, quanto à fenologia das culturas, quanto ao tipo de cultura. A textura dá uma idéia do tipo de vegetação presente; assim uma textura mais lisa pode indicar área com pastagem, enquanto uma textura rugosa, áreas florestadas. A presença de sombra permite a identificação de áreas com relevo



acidentado, ou com coberturas de nuvens. Estas características não devem ser utilizadas individualmente, mas em conjunto permitem melhor desempenho no trabalho de análise de fotografias de satélite.

Outros fatores que devem ser considerados na análise de imagens de satélite são a época de obtenção (SANCHES et al., 2005 e AGUIAR et al., 2009), o tipo de produto obtido (CARVALHO et al., 2009), as bandas espectrais, a escala de trabalho, o uso de imagens multitemporais e a experiência do fotointérprete (MOREIRA, 2005).

A utilização de bandas espectrais, segundo Moreira (2005) é outro fator muito importante para o sucesso da interpretação de imagens de satélites. O referido autor apresenta as principais aplicações das bandas do sensor TM do Landsat conforme a banda, indicando para estudos batimétricos a Banda 1 que permite boa penetração em corpos d'água com elevada transparência; a Banda 2, com sensibilidade à presença de sedimentos, para estudos de qualidade da água; a Banda 3, com forte absorção pela vegetação verde, para distinção das áreas ocupadas com vegetação daquelas sem vegetação; Banda 4 para o mapeamento dos corpos d'água, pela forte absorção de energia pela água nesta região do espectro; Banda 5 para observação do estresse hídrico na vegetação; a Banda 6 para detectar propriedades termais de rochas, solo, vegetação e água e a Banda 7 para obtenção de informações sobre geomorfologia, solos e geologia, além de alguns minerais.

Um segundo produto dos sensores orbitais são as imagens ou dados digitais. Estas imagens são obtidas em forma de matriz composta por linhas e colunas cujas interseções dão origem a células de tamanho variável com a resolução espacial dos sistemas sensores. Estas células possuem valores correspondentes à radiação refletida pelo alvo e captada pelo sensor em determinada faixa de frequência ou banda do espectro eletromagnético. Os alvos emitem diferentes respostas aos estímulos energéticos de acordo com a banda espectral em operação, gerando imagens digitais diferentes que são percebidas nos níveis de cinza apresentados por cada célula. As variações dos níveis de cinza apresentados pelas células de uma imagem digital resultante da operação do sensor em uma determinada banda expressam as variações das respostas dos alvos terrenos sobre a área abrangida por esta célula. As imagens digitais podem ser interpretadas de forma automatizada por meio de programas computacionais. Contudo, para a interpretação mais precisa a imagem deve passar por um pré-processamento que pode constar de várias técnicas como coloração, eliminação de

ruídos, realce do contraste, correção geométrica, correção radiométrica e redução da dimensionalidade.

A coloração das imagens digitais é realizada primordialmente para melhorar a interpretação pela visão humana. Sulsoft (2009) apresenta diferentes composições de cores, formadas por associações das respostas espectrais do sensor TM do satélite Landsat às cores primárias no sistema RGB, com diferentes finalidades: R3G2B1 fornece composição de cores naturais; R7G4B1 e R7G4B3 fornecem imagens adequadas à interpretação geológica; R4G3B2 fornece a vegetação em diferentes tonalidades de vermelho; R4G5B3 fornece imagens adequadas à diferenciação do uso da terra.

Sousa et al. (2007) utilizaram a coloração na associação R4G3B2 para classificação de imagens obtidas no sensor CCD do satélite CBERS-2 visando à determinação do uso e ocupação do solo em 2004 e 2005 na bacia hidrográfica do Alto Piauí, no Estado do Piauí.

Moreira (2005) cita ainda dois tratamentos como pré-processamento que é a eliminação de ruídos, falta de informação causada por falha momentânea no sensor orbital, e a ampliação do contraste para corrigir contraste de baixa qualidade visual. No primeiro tratamento o valor zero do ruído é substituído pelo valor médio das células vizinhas e no segundo os valores mínimos são aproximados do nível mínimo de cinza (zero) e os valores máximos são aproximados do nível máximo de cinza (255).

A correção geométrica é utilizada para corrigir erros geométricos nas imagens devido à rotação e curvatura da Terra, movimento do espelho de imageamento, variações de altitude, posição e velocidade da plataforma, distorção de panorama e distorção topográfica (SULSOFT, 2009). O registro da imagem consiste em associá-la a um sistema de coordenadas geográficas e pode ser feito com base em cartas topográficas, identificando-se os pontos correspondentes entre as imagens e as cartas, em coordenadas obtidas por receptores de GPS ou com base em outras imagens já registradas.

Redução da dimensionalidade é o tratamento dado de forma a extrair da imagem obtida apenas porção correspondente à área de interesse. Este tratamento é muito útil porque reduz a quantidade de dados a ser processados e armazenados nos computadores.

A correção radiométrica é o ajuste dos níveis de cinza contidos nas imagens obtidas em diferentes datas de passagem do satélite, assegurando que as mudanças

observadas no comportamento espectral, no tempo e no espaço, são estritamente ligadas à interação da radiação eletromagnética com o alvo, eliminando quaisquer contribuições do ambiente na reflectância do alvo (MOREIRA, 2005).

As transformações nas imagens podem ser realizadas com segurança após o tratamento. Consistem no processamento das imagens, propriamente dito.

### 2.9.2 Dados topográficos da missão SRTM

O delineamento automático de bacias é realizado a partir de um Modelo Numérico do Terreno (MNT), sendo este, na definição de Felgueiras (2001), uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial (relevo, geologia, dados batimétricos, geoquímicos e geofísicos) em uma área da superfície terrestre. A forma de modelagem do terreno mais comum para utilização em sistemas computacionais é a matricial (BORROUGH, 1984). Quando o relevo é o fenômeno espacial representado no MNT, em forma matricial, o modelo pode ser denominado matriz de altitude ou modelo digital de elevação (MDE). O MDE consiste, portanto, em um sistema tridimensional de coordenadas (X-Y-Z) no qual as duas primeiras (X-Y) localizam o ponto no terreno, segundo um sistema de coordenadas, e a terceira (Z) fornece o valor do atributo representado, o qual, no caso de MDE, é a altitude.

Existem várias formas de obtenção do MDE, sendo mais comumente utilizada a interpolação entre curvas de nível, previamente digitalizadas em mesa digitalizadora, como em Baena et al. (2004); a interpolação entre curva de nível de mapas planialtimétricos, como foi utilizada em Leão et al. (2004); a determinação de pontos no campo por meio de nível topográfico, e ainda por meio de sensoriamento remoto, a exemplo de Costa et al. (2010).

O projeto internacional Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), encabeçado pela National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) e pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), obteve dados de elevação de aproximadamente 80% da superfície terrestre, gerando o mais completo banco de dados topográficos digital de alta resolução da Terra. Os dados topográficos da América do Sul coletados pela missão SRTM, com resolução de 92 m, estão disponíveis no sítio <[ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/South\\_America/](ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/South_America/)>.

Os dados de elevação provenientes do sensor SRTM foram testados em vários trabalhos. Sun et al. (2003) realizaram um estudo para validar os dados de altitude do SRTM, utilizando os dados de altitude do *Shuttle Laser Altimeter mission* (SLA-02).

Schumann et al. (2007) ao realizarem um estudo comparativo do uso potencial de diferentes MDEs no fornecimento de informações hidrológicas como, por exemplo, nível da água no leito de um rio, afirmaram que devido à baixa resolução vertical e espacial, os dados SRTM podem não ser os mais adequados para estudos de enchentes. Ressaltam, no entanto, que uma grande variação encontrada na literatura quanto à precisão vertical dos dados SRTM indica dependência considerável em relação ao local, às características do terreno, às propriedades das feições da superfície, merecendo, portanto, mais estudos.

Schietti et al. (2007) avaliaram o uso dos dados SRTM na Amazônia central, em duas áreas com formações florestais distintas, comparando-os com medidas de elevação determinadas no campo. A análise feita pelos autores aponta possíveis causas tanto para a superestimativa como para a subestimativa da superfície por parte dos dados SRTM, sendo, no primeiro caso, devido à reflexão da cobertura vegetal e no segundo, devido à reflexão de áreas úmidas, de baixada ou mesmo declivosas. Os autores concluem pela potencialidade de utilização dos dados de altitude gerados pelo SRTM em estudos ecológicos na Amazônia.

Costa et al. (2010) avaliaram a acurácia dos dados SRTM para as condições do semiárido brasileiro, considerando os efeitos do clima na paisagem e da vegetação típica na resposta do sinal do RADAR e concluíram que, apesar da influência da cobertura vegetal na variação altimétrica, os dados SRTM apresentaram-se confiáveis para regiões com vegetação típica do semiárido, apresentando um erro médio de 7,7 m.

A partir do MDE podem ser obtidas as características morfométricas da superfície terrestre ou os parâmetros de uma bacia hidrográfica necessários ao estudo hidrológico da mesma, submetendo-os a um dos diversos algoritmos existentes nos Sistemas de Informações Geográficas desenvolvidos para tal fim.

Um dos algoritmos existentes é a extensão ArcHydro desenvolvida pelo Centro de Pesquisas em Recursos Hídricos-CRWR da Universidade do Texas, em Austin.

## 2.10. Sistemas de Informações Geográficas

Qualquer sistema é um composto de entidades que se inter-relacionam, produzindo resultados conforme os estímulos que se lhe apresentam. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) integram pessoas, dados, programas computacionais e equipamentos para a captura, manejo, análise e disponibilidade de informações geograficamente referenciadas. Os SIGs fornecem informações em forma de mapas ou cartas, contendo informações a elas associadas. A quantidade de informações gráficas pode ser de tal monta que surgiu nos SIGs a concepção de camadas (“layers”) para exposição de grande quantidade de informações.

O exemplo clássico citado por Câmara e Medeiros (1998) e pela maioria dos trabalhos científicos como sendo o precursor dos trabalhos de análise espacial de fenômenos e da decisão adotada a partir dos dados observados refere-se ao procedimento realizado pelo médico John Snow, em 1854, na cidade de Londres, quando e onde se verificou uma epidemia de cólera. O referido médico teve a idéia de marcar sobre o mapa de ruas (este mapa seria a primeira camada ou “Layer” dos trabalhos atuais em SIG) as residências com casos confirmados da doença (segunda camada) e as fontes de água (terceira camada). Com isto, foi possível observar que os casos da doença concentravam-se em torno de uma determinada fonte de água a qual foi fechada, após o quê passou-se a constatar a diminuição dos casos de cólera até o fim da epidemia.

Este trabalho foi realizado manualmente e a interpretação realizada pelo médico foi visual. Contudo, a definição dos SIGs acima sugere que o desenvolvimento tecnológico como os computadores, os sensores diversos, os sistemas de localização por satélite, as imagens de satélites, dentre outras, além das técnicas de geoprocessamento como geoestatística, classificação de imagens, análise espectral, álgebra de mapas, para citar algumas incluídas no bojo de programas, também conhecidos como SIGs, propiciaram o incremento no uso dos SIGs em uma ampla variedade de aplicações, manipulando, muitas destas, grandes quantidades de dados. Os dados nos SIGs são armazenados em um Sistema Gerenciador de Banco de Dados relacional (SGBD relacional) que relaciona os atributos não gráficos com os componentes gráficos (imagens) dos dados.

Conforme Câmara e Davis (1999), a primeira tentativa de automatizar parte do processamento de dados com características espaciais ocorreu na Inglaterra e nos Estados Unidos, nos anos 50, com a finalidade de reduzir os custos de produção e armazenamento de dados.

Nos anos 60, poucos geocientistas utilizavam computadores para manipulação de dados espacializados (BONHAM-CARTER, 1997), mas por não existirem monitores gráficos de alta resolução, pelos elevados custos dos computadores e mão de obra que deveria ser altamente especializada e, ainda, por não existirem programas computacionais prontos para o uso, carecendo do desenvolvimento por parte do usuário, os primeiros SIGs eram de utilização muito difícil (CÂMARA e DAVIS, 1999)

Segundo Bonham-Carter (1997), a partir dos anos 80, com o rápido desenvolvimento dos computadores, houve um grande incremento no uso de SIGs, principalmente devido à maior velocidade de processamento e capacidade de armazenamento, bem como ao desenvolvimento de programas computacionais para manejo de dados espacializados.

Os SIGs podem ser utilizados em qualquer campo em que seja necessária a espacialização da informação. Desta forma podem ser vistos trabalhos utilizando SIGs nas áreas de hidrologia, recursos hídricos, agricultura, pecuária, meio ambiente, eletricidade, transportes, turismo e saúde pública, somente para citar alguns exemplos.

## 2.11. Geoprocessamento

Combinando-se as definições apresentadas em Mendes e Cirilo (2001), Câmara et al. (2001) e McCoy (2004) chega-se a uma definição mais completa de geoprocessamento como sendo o processamento de informações geográficas pré-existentes, por meio de técnicas matemáticas e computacionais, com a finalidade de obtenção de novas informações desejadas e/ou da apresentação destas de modo a permitir uma visão geral e simplificada, do espaço geográfico real representado.

As questões básicas do geoprocessamento, segundo Câmara et al. (2001) são: Como representar em computadores os dados geográficos? Como as estruturas geométricas e alfanuméricas de dados se relacionam com os dados do mundo real? Que alternativas de representação computacional existem para dados geográficos? Esta

referência classifica os tipos de dados geográficos a ser representados em geoprocessamento como temáticos, cadastrais, redes, modelos numéricos do terreno ou imagens; as formas de modelagem desses dados como campos, objetos ou objetos não espaciais; e a forma de representação dos dados geográficos como matricial ou vetorial, aos quais, pode-se acrescentar a forma tabular.

Quanto aos tipos de dados, os temáticos são aqueles que descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica, expressa de forma qualitativa, como os mapas de pedologia e a aptidão agrícola de uma região. Estes dados, obtidos a partir de levantamentos de campo, são inseridos no sistema por digitalização ou, de forma mais automatizada, a partir da classificação de imagens. Dados cadastrais são aqueles cujos elementos constituem objetos geográficos que possuem atributos e podem estar associados a várias representações gráficas, como, por exemplo, os lotes de uma cidade que possuem atributos (dono, localização, valor venal, IPTU devido, etc.), podendo ter representações gráficas diferentes, conforme a escala do mapa e os atributos são armazenados num sistema gerenciador de banco de dados.

Os dados do tipo redes são armazenados em coordenadas vetoriais, com topologia arco-nó, contendo informações sobre recursos que fluem entre localizações geográficas distintas, como por exemplo, rodovias, drenos naturais ou rios em bacias hidrográficas, serviços de utilidade pública como distribuição de água, luz e telefone. Os modelos numéricos do terreno (MNT) são os que representam quantitativamente uma grandeza que varia continuamente no espaço como, por exemplo, altitude, declividade, uso e ocupação do solo. Já os dados do tipo imagens são aqueles com informações distribuídas espacialmente, obtidos de forma indireta por meio de sensores (satélites, fotografias aéreas, scanners, etc.) e armazenados na forma de matrizes, com cada elemento da matriz, denominado pixel, contendo um valor, associado a uma cor, que varia conforme a resposta do objeto à radiação incidente no mesmo (CÂMARA et al. 2001).

Quanto à forma de modelagem, os campos representam a distribuição espacial de uma variável que possui valores em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica, num dado tempo; os objetos representam elementos únicos, distinguíveis da circunvizinhança, com atributos não espaciais e associados a múltiplas localizações geográficas; e um objeto não espacial é o que não tem uma localização espacial associada.

Na representação matricial, os dados geográficos apresentam-se como uma matriz onde as linhas e colunas fornecem a localização da célula, segundo um determinado sistema de coordenadas, à qual um terceiro valor associado corresponde à classe que ele representa. Uma representação matricial pode ser uma grade regular onde o terceiro valor associado representa a altitude média ou o teor médio de umidade da área real representada pela célula; pode ser uma imagem temática onde um determinado valor representa um determinado tema, como por exemplo, o valor 1 pode estar associado à existência de um curso de água, ou uma determinada cobertura do solo, como área antropizada, área com vegetação, etc.; pode ainda ser uma imagem sintética ou codificada onde o valor associado à célula reflete a resposta de um objeto captada por um sensor. Segundo Mendes e Cirilo (2001) a representação matricial é mais adequada à manipulação de dados provenientes de imagens de sensoriamento remoto orbital, no tratamento do produto de operações de interpolação espacial, aplicações integradas a modelos matemáticos e ainda na operação algébrica de mapas e, em contrapartida, exigem maior capacidade de armazenamento de dados e a precisão na representação dos elementos espaciais está intimamente relacionada ao tamanho da célula, tornando menos precisa a representação de entidades lineares como rios, rodovias, linhas férreas, sistemas de drenagem, etc.

A representação vetorial pode ser composta por três tipos de elementos: polígonos, linhas e pontos. Pontos são pares de coordenadas espaciais (x, y) aos quais outros dados não espaciais (atributos) são associados, permitindo o armazenamento de tantas informações quantas forem desejadas acerca dos objetos geográficos por eles representados; as linhas poligonais, arcos ou elementos lineares são conjuntos de pontos conectados e da mesma forma possuem atributos associados que os identificam; os polígonos são regiões limitadas por uma ou mais linhas poligonais conectadas de tal forma que o último ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro ponto da linha seguinte. Mendes e Cirilo (2001) afirmam que a representação vetorial é mais precisa do que a representação matricial, representando qualquer elemento geográfico por meio de qualquer uma das formas acima descritas.



### 2.11.1 Classificação de imagens digitais

A atribuição de uma representação para cada unidade (pixel) da imagem digital é o resultado da classificação da imagem. Ou seja, a classificação consiste em analisar e agrupar, em classes, os elementos da imagem digital que representam características semelhantes distribuídas no espaço real abrangido pela imagem.

Várias ferramentas computacionais desenvolvidas especificamente para a classificação de imagens digitais facilitam a obtenção rápida e de custo reduzido dos mapas de uso do solo, os quais são bastante úteis em várias aplicações como no gerenciamento dos recursos naturais, na avaliação de impactos decorrentes de variações no uso da terra e no melhor entendimento dos processos ecológicos em determinada área (LANG et al., 2008).

Os métodos aplicados na classificação de imagens digitais dividem-se em duas categorias: supervisionada e não supervisionada, conforme haja ou não o conhecimento prévio sobre os atributos das classes pertinentes à imagem. Assim, na classificação supervisionada, as classes nas quais a imagem será dividida são previamente conhecidas e, antes do processo de classificação propriamente dito, há o treinamento que consiste na identificação da imagem, de áreas representativas das classes que se deseja obter. Identificadas estas áreas, as características (ou valores espectrais) dos elementos da imagem (*pixels*) que as compõem são captadas e utilizadas na identificação e separação, em toda a imagem, das áreas com características semelhantes. A classificação não supervisionada não possui a etapa de treinamento, pois não há o conhecimento prévio das classes que se deseja obter. Nesta categoria, no entanto, o técnico define um número máximo e mínimo de classes a ser obtidas no processo de classificação que agrupa os elementos da figura com valores espectrais semelhantes, segundo um procedimento estatístico.

Pode-se utilizar a classificação supervisionada para classificar toda a imagem, quando se conhece todas as classes de cobertura que a compõem completamente ou para identificar a distribuição espacial, dentro da imagem completa, de áreas cobertas pelas classes desejadas. A classificação não supervisionada é mais adequada quando se deseja classificar toda a cena, sem que haja um controle de quais classes deverão surgir. Nesta categoria, o operador define o número de classes que se deseja obter e o algoritmo de classificação agrupa os elementos da imagem, segundo suas características, dividindo-os em tantas classes quantas forem requeridas.

As duas categorias de classificação possuem diferentes métodos e em Moreira (2004) e Sulsoft (2004) são apresentados alguns como Isodata e K-means (não supervisionadas) e paralelepípedo, distância mínima, máxima verossimilhança, mapeador de ângulo espectral e distância de Mahalanobis (supervisionada).

O algoritmo Isodata (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm*) utiliza a distância euclidiana no espaço de valores espectrais dos elementos da imagem para distribuí-los no grupo a que se assemelham, após certo número de iterações. Neste método ocorre certa subjetividade devido ao fato de que o usuário define o número de classes espectrais que deseja obter, um limite de convergência e o número de iterações (LANG et al., 2008).

A avaliação da classificação pode ser realizada por meio dos coeficientes de exatidão global (EG), de exatidão específica (EE) e coeficiente de Kappa (K), calculados a partir da matriz de confusão, cuja forma de obtenção está descrita em Sousa (2009) que apresenta as seguintes equações:

$$EG = 100 \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \quad (19)$$

$$EE = 100 \frac{x_{ii}}{N} \quad (19)$$

$$K_a = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (20)$$

em que:  $EG$  é a exatidão global;  $EE$  é a exatidão específica;  $K_a$  é o coeficiente Kappa;  $r$  é o número de linhas ou colunas da matriz;  $N$  é o número de elementos da matriz;  $x_{ii}$  é o elemento da interseção  $i$ -ésima linha com a  $i$ -ésima coluna;  $x_{i+}$  é o total da linha  $i$  e  $x_{+i}$  é o total da coluna  $i$ .

Os trabalhos de Amaral et al. (2009) e Sousa (2009) são exemplos recentes com avaliação de classificação de imagens que utilizaram o coeficiente Kappa para validação dos métodos de classificação empregados. Estes autores apresentam a tabela

lançada por Landis e Koch em 1977 que conceitua o nível de exatidão de uma classificação de imagem de acordo com o coeficiente Kappa, para os quais, abaixo de 0,2 ocorre uma classificação de qualidade Ruim; acima de 0,2 até 0,4 uma classificação Razoável; maior que 0,4 até 0,6 ocorre uma classificação conceituada como Boa; maior que 0,6 até 0,8 ocorre em um nível Muito bom e maior que 0,8 resulta numa classificação com nível Excelente.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Obtenção da base de dados georreferenciados.

No primeiro momento buscou-se estabelecer uma base de dados georreferenciados para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, juntando-se em um SIG as informações disponíveis e as elaboradas através das diversas técnicas de geoprocessamento. Parte da base de dados foi utilizada como dados de entrada para o desenvolvimento de um modelo hidrológico para balanço hídrico de reservatórios.

##### 3.1.1. Caracterização da Área de Estudo

O rio Jaguaribe é o principal rio do Estado do Ceará, com 633 km de extensão e tem como principais afluentes pela margem direita os rios Cariús, Salgado e Figueiredo e pela margem esquerda o riacho do Sangue e os rios Banabuiú e Palhano. A sua bacia hidrográfica, com 72.645 km<sup>2</sup>, abrange 48% do Estado e se localiza entre as latitudes 4° 30' e 7° 45' S e as longitudes 37° 30' e 41° 00' W. É subdividida em cinco regiões hidrográficas: Alto Jaguaribe, Salgado, Médio Jaguaribe, Banabuiú e Baixo Jaguaribe (Figura 2). O rio Banabuiú é o principal tributário do rio Jaguaribe, com extensão de 314 km, drenando uma área de 19.314 km<sup>2</sup>.

Predominam a formação vegetal Savana Estépica (Caatinga) e as de Tensão Ecológica, do tipo contato Savana-Estepe na região da Serra do Pereiro e Estepe-Floresta Estacional no setor extremo sul (GATTO, 1999). Costa (2008), a partir do levantamento realizado pelo convênio FUNCEME/SEPLAN, apresentou o mapa de vegetação para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, com 11 classes de vegetação: Caatinga arbustiva aberta; Caatinga arbustiva densa; Carrasco; Cerrado; Complexo vegetacional da zona litorânea; Caatinga arbórea; Mata ciliar com carnaúba; Floresta perenifólia paludosa marítima; Mata seca; Cerradão e Matas úmidas.

Na bacia do Jaguaribe são constatados quatro tipos climáticos, conforme a metodologia adotada pelo IBGE: úmido, subúmido, semiárido e árido, além de três tipos de transição: úmido a subúmido, subúmido a semiárido e semiárido a árido. No entanto,

60% da bacia são abrangidos pelo clima semiárido que ocorre no sentido NE-SO, desde a proximidade do litoral até o extremo sudoeste (GATTO, 1999).

O relevo é predominantemente dissecado, no sentido SO-NE, principalmente no Planalto Sertanejo. Há ainda áreas planas em toda a bacia, mas isoladas como a Chapada do Araripe, a Planície do Jaguaribe, os Tabuleiros do Baixo Jaguaribe, os Tabuleiros Costeiros, a Depressão do Iguatu e a Chapada do Apodi. Outra formação são os conjuntos de serras com altitude de até 1000 m (GATTO, 1999).

Os solos são geralmente pouco profundos, pedregosos, com fertilidade média a alta. Predominam os podzólicos vermelho-amarelos eutróficos, os litólicos eutróficos, os planossolos solódicos e os brunos não cálcicos (GATTO, 1999), conforme a nova nomenclatura dos solos, respectivamente, os argissolos vermelhos, eutróficos, os neossolos litólicos, eutróficos, os planossolos háplicos e os luvisolos crômicos (LEITE, 2007 e LEITE, 2007). O regime hidrológico é caracterizado pelos cursos de água efêmeros ou intermitentes na condição natural, com os cursos principais contando com vazão regularizada pelas barragens construídas.

O sistema hídrico Jaguaribe/Banabuiú abrange os principais reservatórios da bacia do Jaguaribe (Figura 2): Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão. O volume acumulado nestes reservatórios perfaz 84% do volume máximo acumulável nesta região hidrográfica. Estes reservatórios e outros, em bacias secundárias, são responsáveis pelo abastecimento da população da bacia do rio Jaguaribe e pelas atividades da agricultura irrigada. Outros dados dos referidos reservatórios estão na Tabela 1.

Tabela 1 . Características dos principais reservatórios do sistema Jaguaribe/Banbauíú

Reservatório		Banabuiú	Castanhão	Orós	Pedras Brancas
Coordenadas (UTM)	E	508724	560594	508313	513370
Datum SAD69 Zona 24	N	9411109	9393237	9310493	9430607
Capacidade (hm <sup>3</sup> )		1.700	6.700	2.100	434
Vazão regularizada(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )		12,93	29,00	20,40	3,20
Cota da soleira (m)		142,50	106,00	199,50	127,00
Bacia hidráulica (ha)		10.200,00	32.500,00	35.000,00	7.288,00
Bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> )		13.500,00	44.800,00	25.000,00	1.787,00
Bacia		Banabuiú	Medio Jaguaribe	Alto Jaguaribe	Banabuiú
Ano de conclusão		1966	2003	1961	1978
Rio/Riacho barrado		Rio Banabuiu	Rio Jaguaribe	Rio Jaguaribe	Riacho Sitia

Fonte: CEARÁ-SRH (2009)

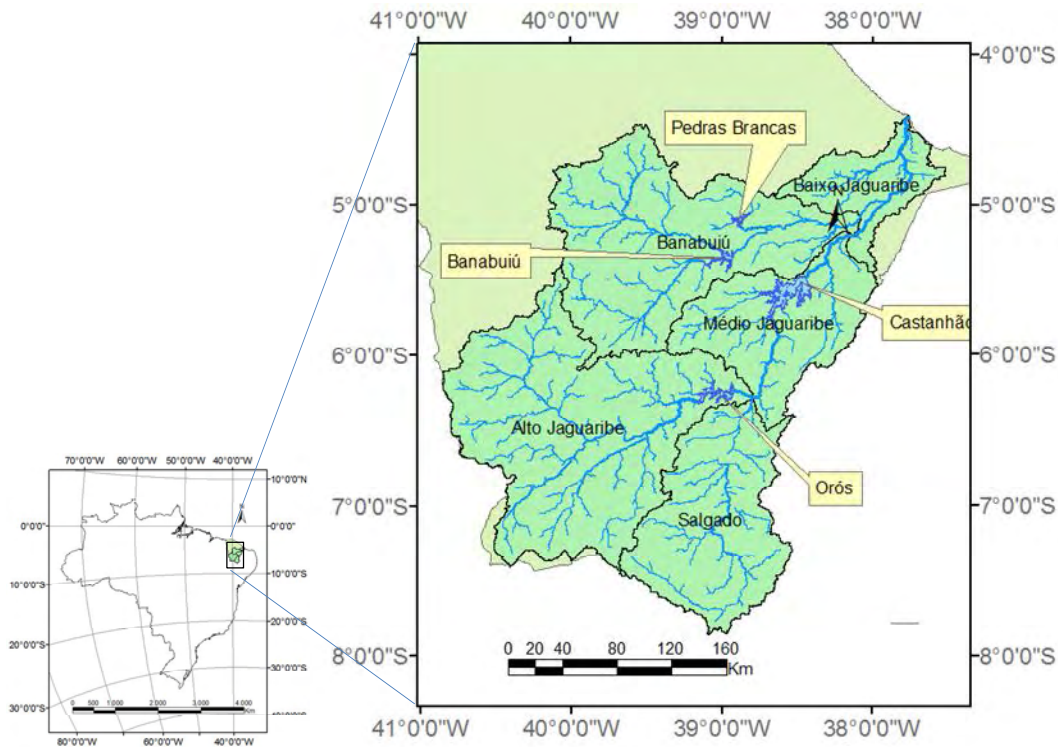


Figura 2 - Bacia hidrográfica do rio Jaguaribe com identificação das regiões hidrográficas e dos reservatórios.

### 3.1.2. Modelo digital de elevação e delineamento automático da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe

Para a delimitação automática da bacia do rio Jaguaribe, foi obtido primeiramente o modelo digital de elevação (MDE) a partir dos arquivos fornecidos pelo U.S. Geological Survey via Protocolo de Transferência de Arquivos (ftp): [ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/South\\_America/](ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/South_America/). Os arquivos de dados necessários para a referida bacia são: S05W038.hgt, S05W039.hgt, S05W040.hgt, S05W041.hgt, S06W038.hgt, S06W039.hgt, S06W040.hgt, S06W041.hgt, S07W039.hgt, S07W040.hgt, S07W041.hgt, S08W039.hgt, S08W040.hgt e S08W041.hgt. Os nomes dos arquivos significam as coordenadas em latitude e longitude, do canto inferior esquerdo de cada arquivo. Assim S05W038.hgt é o arquivo cujo canto inferior esquerdo está situado a 5°S e 38°W.

Estes arquivos foram executados no software Global Mapper 8.01 para conversão em sistema de coordenadas planas da projeção Universal Transverse Mercator (UTM) e Datum South American 1969 (SAD69), Zona 24 S, bem como para a conversão dos dados no formato ASCII, possível de ser importado pelo software ArcGIS 9.3.

No software ArcGIS 9.3 foi gerado um MDE que se apresenta na forma de *grid*, em que cada pixel representa uma área de aproximadamente 8.464 m<sup>2</sup> (92 x 92 m), com coordenadas X, Y e Z, sendo X e Y as coordenadas Leste e Norte da projeção UTM, Datum SAD69, Zona 24 S, enquanto Z é a altitude representativa do pixel ou da área por ele representada, a qual por ter sido obtida no radar da missão SRTM, diz respeito à altitude em relação ao geóide de referência WGS84.

Este MDE foi submetido às ferramentas do modelo ArcHydro desenvolvidas pelo Centro de Pesquisa em Recursos Hídricos, em inglês: *Center for Research in Water Resources (CRWR)* da *University of Texas at Austin*, para implementação no ambiente ArcGIS. O algoritmo permitiu a obtenção de um modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC), bem como o delineamento automático das bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos seus cursos de água. Na Figura 3 está apresentado o mosaico dos arquivos provenientes da missão SRTM para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. Na legenda desta figura, observam-se valores negativos de altitude que foram corrigidos no geoprocessamento.

A primeira ferramenta utilizada da extensão ArcHydro utilizada foi a *Fill Sinks (Terrain Preprocessing/DEM Manipulation/Fill Sinks)*, modificando o valor de altitude de uma célula rodeada de outras células com altitudes superiores. Esta condição implica um erro que não permite que a água retida nesta célula flua para outras células.

Em seguida, a ferramenta *Flow Direction (Terrain Preprocessing/Flow Direction)* avalia todas as células da vizinhança, atribuindo um valor conforme a direção do fluxo a partir desta célula. Os píxeis, nesta grade, recebem valores 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ou 128, para as direções Leste (E), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SO), Oeste (O), Noroeste (NO), Norte (N) ou Nordeste (NE), respectivamente.

*Flow Accumulation (Terrain Preprocessing/Flow Accumulation)* é a terceira ferramenta do algoritmo e é utilizada para atribuir a cada pixel o valor correspondente ao acúmulo do número de píxeis convergentes para esta célula, equivalendo à sua área de drenagem, em número de células.

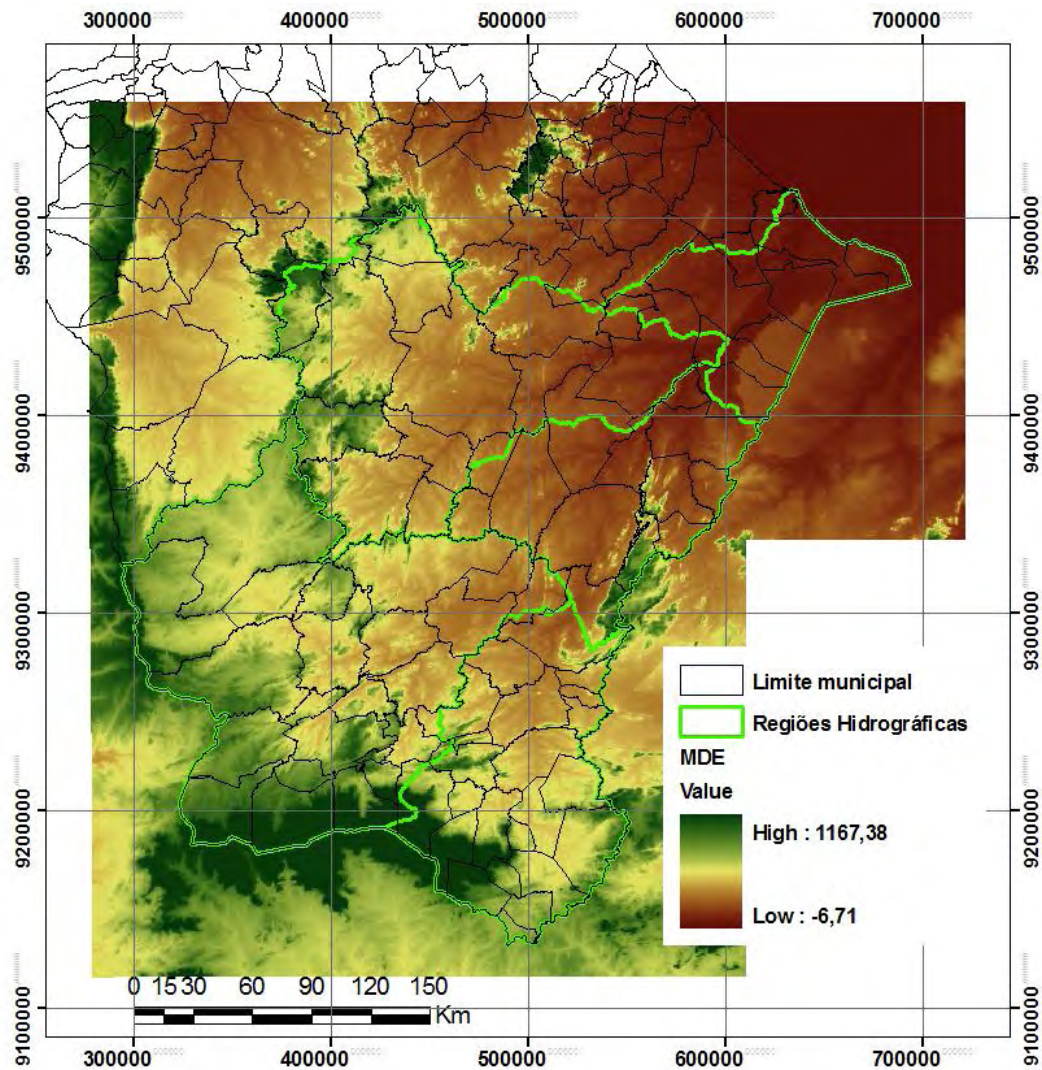


Figura 3 - Mosaico de arquivos SRTM compondo o MDE da bacia do rio Jaguaribe, com as regiões hidrográficas e os limites dos municípios que compõem a referida a bacia.

Seguindo o algoritmo, a ferramenta *Stream Definition (Terrain Preprocessing/Stream Definition)* gera uma grade com o valor 1 para as células que compõem um curso de água. Neste passo ocorre uma interação com o usuário que define um número mínimo de células que contribui com o fluxo (*threshold*) para que uma determinada célula receba o valor 1, figurando como uma célula que compõe um curso de água. Neste trabalho, o número mínimo de 500 píxeis mostrou-se o mais adequado.

Em seguida, por meio da ferramenta *Stream Segmentation (Terrain Preprocessing/Stream Segmentation)*, elabora-se uma nova grade cujos píxeis que



formam um segmento de curso de água (assim definido o segmento entre bifurcações) recebem um mesmo valor.

Em sequência, a ferramenta *Catchment Grid Delineation (Terrain Preprocessing/ Catchment Grid Delineation)* cria uma nova grade onde aos píxeis são atribuídos valores de modo que todos aqueles que compõem uma área de drenagem para um segmento de curso de água recebem os mesmos valores.

Na Figura 4 está exposta a sequência de execução das ferramentas descritas anteriormente, desde o MDE obtido dos arquivos SRTM até à segmentação do MDEHC em áreas de drenagens para trechos de rios entre as bifurcações. Estas áreas de drenagens, neste trabalho, são denominadas interbacias.

Pode-se observar na Figura 4 B, o preenchimento das depressões espúrias existentes no MDE gerado dos arquivos SRTM. Em C, observa-se que a direção do fluxo aponta sempre para a direção da maior declividade. Em D pode-se ver a soma do acumulado em cada célula, gerando um valor maior na célula subsequente, segundo a direção do fluxo. A identificação das células que formam o curso de água a partir do fluxo acumulado mínimo de 500 está apresentada em E e, finalmente, em F, pode-se ver que a partir da direção de fluxo e da célula de maior acúmulo para cada trecho de rio as células que compõem cada interbacia são identificadas com um único valor (cor).

Os dados gerados na sequência no algoritmo apresentado estão todos em formato matricial. Na sequência, os dados são convertidos para o tipo vetor, no qual os píxeis que compõem as interbacias são convertidos em polígonos e os que constituem os rios são convertidos em polilinhas (Figura 5).

A hidrografia gerada automaticamente foi comparada com as imagens de satélite fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio da Divisão de Geração de Imagens (DGI), no sítio <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>.

Além da análise visual o delineamento automático foi analisado comparando-se os comprimentos dos trechos de rios obtidos e os comprimentos medidos em imagem de satélite do programa Google Earth. A avaliação pela comparação dos comprimentos de rios gerados e de outra fonte de hidrografia também foi realizada em Colombo et al. (2007) e Paz et al. (2008).

A extensão XTools Pro, desenvolvida pela Data East a partir da extensão XTools, criada originariamente para utilização no programa ArcView 3.x, foi utilizada para cálculo de área, perímetro das interbacias e do comprimento dos trechos de rio gerados.

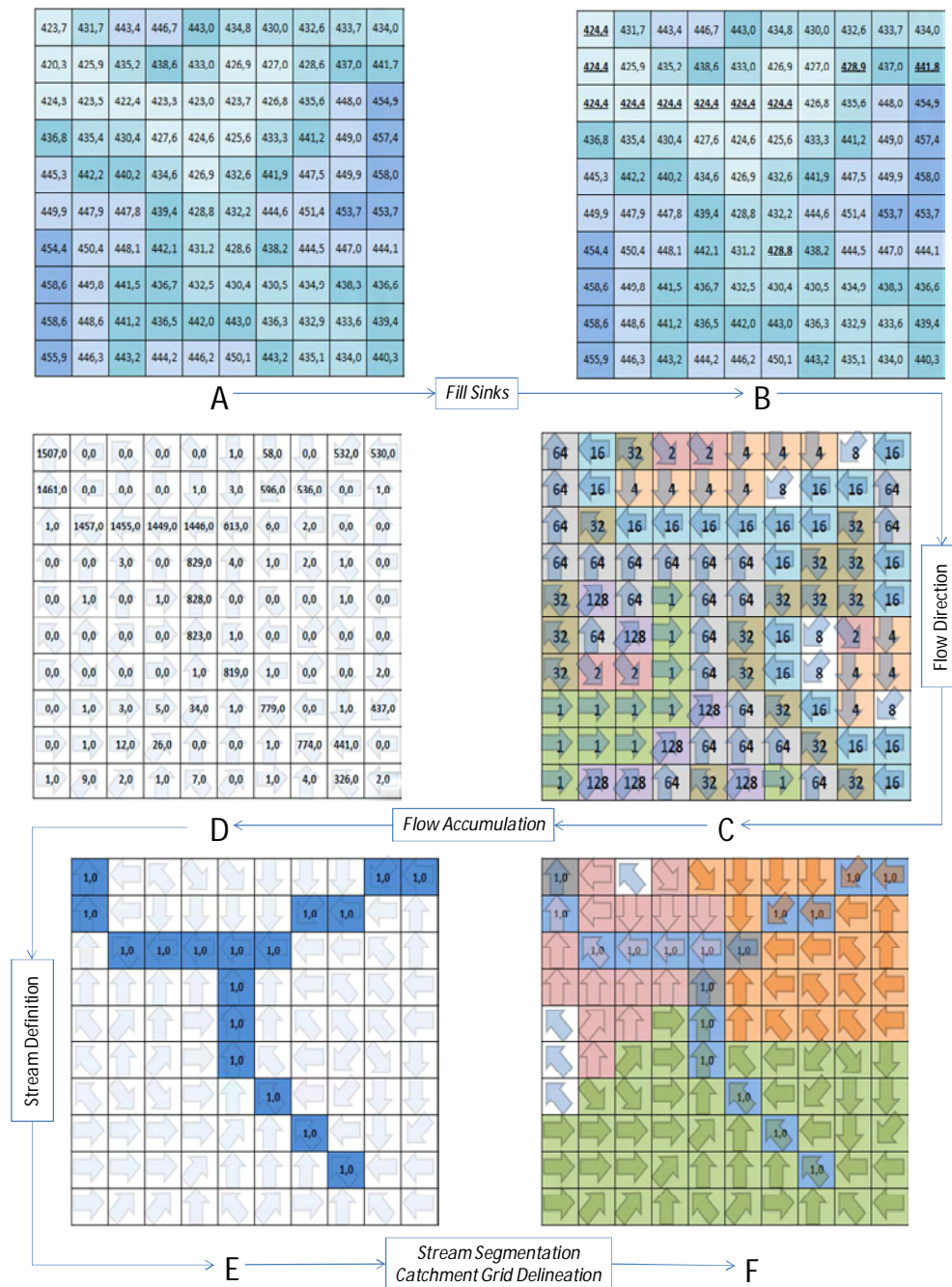


Figura 4 - Fluxograma com os resultados, em uma pequena parte da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, do algoritmo de delineamento automático de bacias hidrográficas. A – Parte do MDE; B – Preenchimento das depressões; C – Direção do fluxo, no sentido da maior declividade; D – Acúmulo do fluxo pela soma das contribuições provenientes de células vizinhas, E – Identificação do curso de água e F – Delineamento de áreas de drenagem.

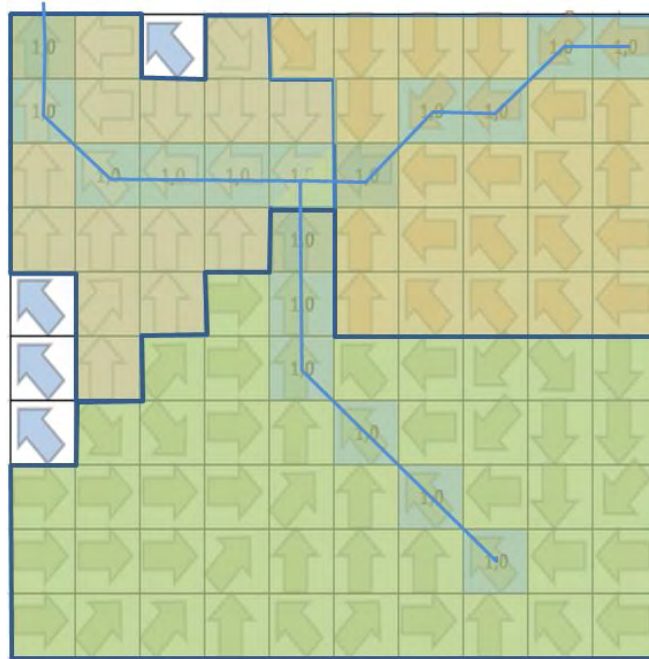


Figura 5 - Sobreposição das áreas de drenagens e cursos de água no formato vetorial sobre o formato matricial.

O modelo ArcHydro foi utilizado para obtenção da rede de drenagem vetorial em três dimensões, por meio da ferramenta *Construct 3D Line (Watershed Processing/Construct 3D Line)*, possibilitando estabelecer a declividade dos rios e trechos de rios.

Após o delineamento automático da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, a mesma foi subdividida em quatro bacias hidrográficas correspondentes às áreas de drenagem dos açudes principais (Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão). A área de drenagem do açude Castanhão engloba a área de drenagem do açude Orós, uma vez que este barra o rio Jaguaribe a montante daquele. No entanto, como o açude Orós é um dos quatro principais na bacia do rio Jaguaribe, optou-se por dividir a área de drenagem do açude Castanhão em duas, sendo toda a área a montante do Orós denominada bacia hidrográfica do açude Orós e a área remanescente, bacia hidrográfica do açude Castanhão.

Foram contempladas no trabalho apenas as características fisiográficas mais relevantes para gerar dados de entrada para o modelo desenvolvido. Ressalte-se o número limite (Threshold) de 500 células contribuindo para se iniciar um trecho de rio. Conforme mencionado anteriormente, apenas por convenção, foram interbacias as áreas

de drenagem que têm como exutório uma bifurcação dentro da rede de drenagem gerada no delineamento automático.

Foi realizado um levantamento estatístico das interbacias geradas no delineamento automático e apresentada a estatística descritiva para cada bacia hidrográfica dos reservatórios.

No estudo das interbacias geradas no delineamento automático, as características fisiográficas das interbacias como área ( $A_{ib}$ ), perímetro ( $P_{ib}$ ), comprimento do curso principal ( $Lc_{ib}$ ) e declividade do curso principal ( $S_0c_{ib}$ ) de cada interbacia foram fornecidas diretamente no delineamento automático, por meio da extensão ArcHydro. As demais características foram calculadas em planilha do Excel.

A equação de Ven Te Chow foi escolhida para este trabalho por ter sido obtida para bacias de até 24,28 km<sup>2</sup> (Pruski et al., 2006), extensão de área apresentada em mais de 97% das interbacias geradas no delineamento automático, como será verificado mais adiante. Esta equação é dada por:

$$Tc = 52,64 \left( \frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,64} \quad (21)$$

em que:  $Tc$  - tempo de concentração, min;  $L$  - comprimento do talvegue, km  $S_0$  - declividade média do talvegue, m km<sup>-1</sup>.

O tempo de pico da interbacia ( $Tp_{ib}$ ) foi determinado segundo a sua relação com o tempo de concentração, conforme apresentada em Tucci (2004), em que:

$$Tp = 0,6Tc \quad (22)$$

em que:  $Tp$  - tempo de pico, min.

Para as bacias hidrográficas dos reservatórios, a área de drenagem ( $A_{bh}$ ), o perímetro ( $P_{bh}$ ), o comprimento do curso principal ( $Lc_{bh}$ ), o comprimento do eixo da bacia ( $Le_{bh}$ ) a declividade do curso principal ( $S_0c_{bh}$ ) e o comprimento total dos cursos ( $Lt_{bh}$ ) são obtidos diretamente pelo SIG.

Para determinação do  $Le_{bh}$ , o perímetro da bacia apresentada na feição de polígono foi transformada, por meio da extensão XTools Pro, na feição pontos. Com a mesma extensão obtiveram-se as coordenadas geográficas de todos os pontos. Com a operação na tabela de atributos gerou-se uma coluna com a distância entre cada ponto ao longo do polígono e a foz da bacia. A maior distância corresponde ao  $Le_{bh}$ .

Realizou-se a ordenação dos cursos de água segundo a classificação proposta por Strahler em 1952. Nessa classificação, os cursos sem afluentes são classificados como de primeira ordem. Da junção de dois cursos de primeira ordem surge um curso de segunda ordem. Um curso de segunda ordem assim permanecerá enquanto receber somente cursos de primeira ordem como afluentes. Quando um curso de segunda ordem recebe outro também de segunda ordem, surge o de terceira ordem que pode receber afluentes de primeira e de segunda ordens sem que se altere a sua ordem. E assim sucessivamente, a ordem de um rio se altera quando ocorre a junção de dois cursos de mesma ordem.

Para a ordenação dos cursos de água foi desenvolvido um programa em linguagem VBA (*Visual Basic for Application*) em uma planilha do Excel contendo a identificação de todos os trechos de rios das bacias hidrográficas dos açudes. Os trechos de rios foram gerados no delineamento automático e como resultado a tabela apresenta, além da identificação desses trechos, a conectividade com os outros trechos a jusante. Após a execução do programa, a hierarquização gerada é levada para a tabela de atributos da rede de drenagem no SIG.

A declividade da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e das bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão foram determinadas a partir do MDEHC, por meio da ferramenta *slope* da extensão *Spatial Analyst Tools (Spatial Analyst Tools/Surface/Slope)* no programa ArcGIS 9.3. O *grid* gerado no processo apresenta valores contínuos de declividade os quais são posteriormente discretizados por meio da *Single Output Map Algebra* da mesma ferramenta acima referida (*Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Single Output Map Algebra*).

### 3.1.3. Georreferenciamento das imagens de satélite e montagem do mosaico de imagens para a composição da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe

O mosaico das imagens foi realizado por meio do programa ENVI 3.6. Para abrangência da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e dos seus principais reservatórios, Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão, foram utilizadas as imagens do Landsat5, órbitas 216 e 217, pontos 063, 064 e 065 e órbita 218, pontos 064 e 065. As datas de passagem do satélite foram 23/07/2006 para as imagens da órbita 216, 14/07/2006 para as da órbita 217 e 21/07/2006 para as da órbita 218.

O georreferenciamento foi realizado primeiramente na banda espectral 4 da imagem central (órbita 217, ponto 064), com base em pontos com coordenadas geográficas conhecidas e de fácil identificação na imagem. Esta banda espectral possui faixa de comprimento de onda variando de 760 a 900 nm, correspondente no espectro ao IV próximo, região na qual a água absorve maior quantidade de radiação, refletindo muito pouco e por isso aparecendo na imagem em nível de cinza próximo ao preto, facilitando a identificação de corpos de água. Por este motivo, fica mais visível a identificação dos corpos de água cujas coordenadas serviram como pontos de controle para o registro da imagem. As demais bandas desta imagem, bem como todas as das outras imagens que compuseram o mosaico, foram registradas imagem para imagem, com base na imagem central, identificando-se os elementos comuns às imagens base e em processo de registro.

De acordo com o restante da base de dados, as imagens foram georreferenciadas na projeção UTM, Datum SAD69, Zona 24 S, com tamanho de pixel de 30 x 30 m. O ajuste das imagens, tanto no georreferenciamento como no registro, foi realizado pelo algoritmo Rotação, Escalonamento e Translação (RST do inglês *Resampling, Scaling and Translation*) e a reamostragem pelo método Convolução Cúbica (*Cubic Convolution*).

Após o georreferenciamento das bandas B3, B4 e B5 de todas as imagens, foi realizada a composição colorida das bandas no sistema RGB, sendo a banda 5 em R, 4 em G e 3 em B (R5G4B3). Na Figura 6 está apresentada parte da imagem 217/064 que compõe o mosaico da bacia do rio Jaguaribe, nesta composição. Esta imagem já se apresenta corrigida geometricamente. Nela se observa o açude Banabuiú, na cor escura e a vegetação, na cor verde, tanto da mata ciliar, ao longo do rio Banabuiú, a jusante do açude, como da formação geológica onde está a garganta onde foi feito o barramento do

rio. Pode-se observar a cor rosada no solo descoberto característico da vegetação Caatinga que perde as folhas no período seco (14/07/2006). A transição do rosado para o verde evidencia a vegetação com alguma folhagem ainda verde, mas em processo de secagem e a coloração de cinza claro a branco é sugestiva de elevado antropismo, com ausência de cobertura vegetal e/ou afloramento de rocha à superfície do solo. Estas características foram observadas *in loco*.

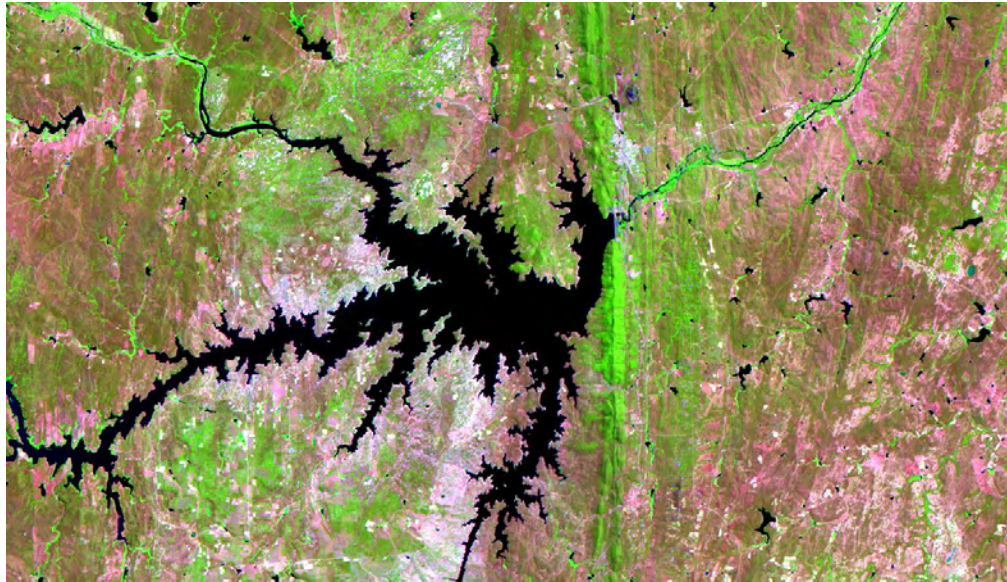


Figura 6 - Parte da imagem (217/064) do satélite Landsat5, na composição R5G4B3, destacando o reservatório Banabuiú na cor preta.

O mosaico foi montando imagem a imagem, primeiramente as imagens com sobreposição à 217/064 e depois as demais (Figura 7). Antes da adição de cada imagem, por meio de uma análise visual, escolheu-se aquela cujos elementos conhecidos apresentavam coloração mais adequada. Esta imagem foi então adotada como referência para ajuste do histograma das outras imagens. Para a adição de cada imagem ao mosaico foi realizado o esmaecimento, isto é a suavização na sobreposição da imagem de 100 píxeis, ignorando-se os píxeis de valor zero.

O ajuste do histograma das imagens é importante para que o mosaico fique uniforme, o que facilita a sua classificação. A sequência de passos realizados no programa ENVI 3.6 foi a seguinte: 1) abriram-se as duas imagens (mosaico incompleto e a próxima cena a ser adicionada); 2) com as duas imagens abertas fez-se a ligação entre as duas janelas de modo que a mesma área fosse visualizada em ambas. Escolheu-se a melhor imagem como imagem de referência; 3) abriu-se o histograma de cada uma,

separadamente, zerou-se o histograma das duas imagens, modificando-se o contraste linearmente de 0 a 255; 4) finalmente, salvou-se a imagem com o histograma ajustado, para então proceder à união da mesma ao mosaico de imagens.

Na Figura 7 observa-se a mudança na tonalidade de cores do mosaico devido aos sucessivos ajustes dos histogramas. Após composto o mosaico, ajustou-se finalmente o histograma do mosaico ao histograma da imagem 217/063.

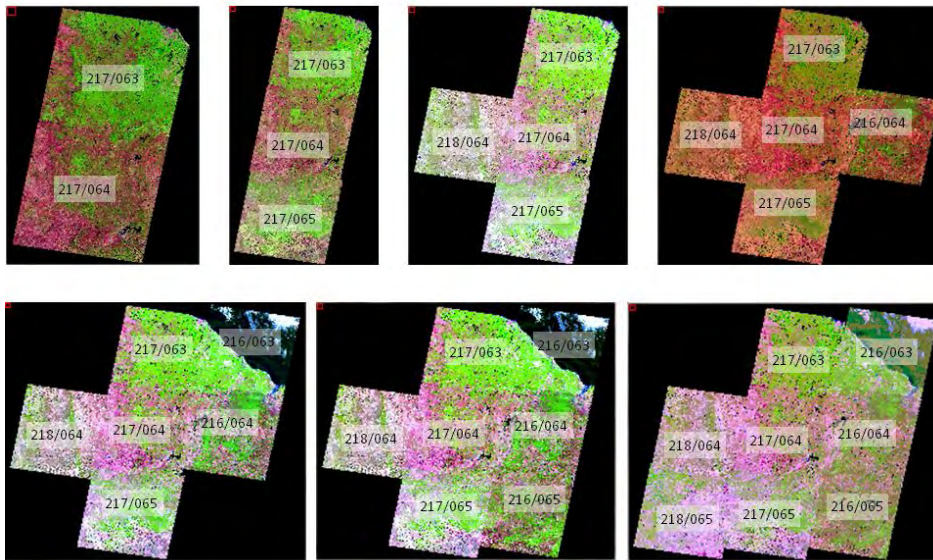


Figura 7 - Sequência de adição de imagens formando o mosaico de imagens da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

#### 3.1.4. Levantamento de dados dos reservatórios, dados pluviométricos e dados climatológicos

A localização e caracterização dos reservatórios foram realizadas segundo informações da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, por meio dos Sistemas de Informações dos Recursos Hídricos – SIRH (<http://atlas.srh.ce.gov.br/>) e, ainda, junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos-COGERH, *in loco*, e foram confirmadas por meio da classificação do mosaico das imagens de satélite. Os dados fornecidos pela COGERH com as principais características dos reservatórios, incluindo-se a  $Q_{90reg}$  e as coordenadas geográficas dos reservatórios juntamente com a imagem do



mosaico de imagens Landsat constituíram os dados de entrada para a geração do referido mapa. Da imagem classificada foram isoladas as áreas cobertas com água e com os dados fornecidos pela COGERH foram identificadas aquelas correspondentes aos reservatórios com vazão regularizada e com  $Q_{90reg}$  maior ou igual a  $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Junto à COGERH foram ainda coletados os dados das curvas cota-área-volume (CAV) dos reservatórios Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão, além da vazão liberada e nível diário dos reservatórios.

Os dados climatológicos diários provenientes das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) e os de precipitação pluvial provenientes dos Postos pluviométricos, bem como as coordenadas geográficas das PCDs e Postos foram coletados junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

### 3.1.5. Digitalização dos dados de Solos, Relevo e Vegetação

O mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe foi elaborado a partir do georreferenciamento do mapa de solos do Estado do Ceará (BRASIL, 1972), o qual foi elaborado a partir de Jacomine et al. (1973). Este mapa, na escala 1:600.000, foi resgatado da página do Arquivo Digital Europeu de Mapas de Solos (European Digital Archive of Soil Maps – EuDASM) <[http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb\\_archive/EuDASM/latinamerica/maps/br13007\\_so.htm](http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/EuDASM/latinamerica/maps/br13007_so.htm)>.

O mapa de vegetação para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe foi gerado a partir do mapa das unidades fitoecológicas do Estado do Ceará, obtido junto à COGERH, e que, segundo Costa (2008), provém de um convênio realizado entre a FUNCEME e a SEPLAN com a finalidade de identificação, caracterização e mapeamento, na escala 1:250.000.

O mapa de relevo da bacia do Jaguaribe foi digitalizado a partir do Mapa de Unidades de Relevo do Brasil (BRASIL, 2006), na escala 1:5.000.000, disponível para resgate, em arquivo com extensão pdf (portable document format), no sítio do IBGE <[http://www.ibge.gov.br/mapas\\_ibge/tem.php](http://www.ibge.gov.br/mapas_ibge/tem.php)>. O mapa foi convertido em imagem no formato tif, possível de ser georreferenciado no ENVI 3.6. Após georreferenciado, o mapa foi digitalizado no software ArgGIS 9.3.

### 3.1.6. Classificação do mosaico de imagens de satélite para uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão

O mosaico das imagens Landsat 5, georreferenciado, foi submetido, no programa computacional ENVI 3.6, ao método isodata de classificação não supervisionada de imagens. Foram definidos os parâmetros número mínimo de cinco e máximo de 20 classes, e máximo de três iterações. Após este procedimento, as classes geradas foram agrupadas em cinco classes de cobertura do solo: Água, Área antropizada, Solo descoberto, Vegetação densa e Vegetação rala. O agrupamento foi realizado com base no conhecimento prévio da área em estudo e em comparação com imagens bem definidas no Google Earth 5.0.

Nas classes Vegetação densa e Vegetação rala estão incluídos os solos ocupados com vegetação nativa, principalmente a caatinga hipo e hiperxerófila, predominante na região, conforme descrito em Jacomini et al., (1973). Em Solo descoberto incluem-se as áreas de pouquíssima vegetação, ou solo agrícola em período de pousio. Incluem-se na classe Área antropizada as áreas urbanas e as adensadas, com baixa capacidade de infiltração, degradadas pela ação humana ou com afloramento da rocha matriz típico dos solos litólicos ou neossolos litólicos, com difícil infiltração. Em Água estão incluídos os corpos de água como rios, açudes e lagoas.

A avaliação da classificação foi realizada por meio do coeficiente de Kappa. A matriz de confusão gerada para determinação deste índice foi obtida pela comparação entre os elementos classificados e os observados em imagens bem definidas no Google Earth. Na Figura 8 estão cinco dos pontos amostrais utilizados na avaliação da classificação.

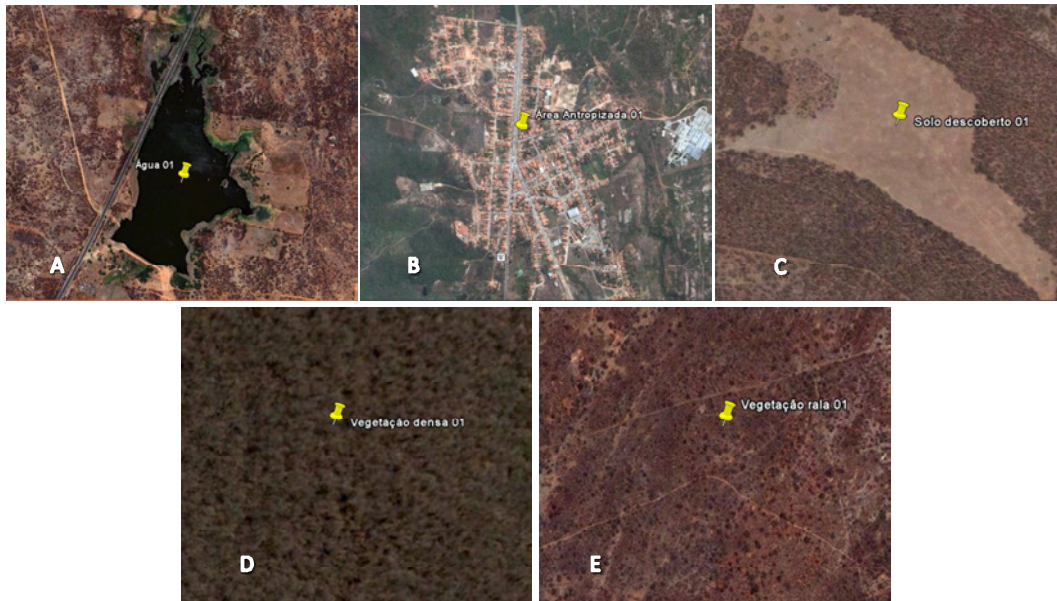


Figura 8 – Imagens do Google Earth com resolução bem definida, representativa de cada classe de cobertura do solo, utilizadas como amostras para avaliação da classificação das imagens de satélite. A – Classe água; B – Área antropizada; C – Solo descoberto; D – Vegetação densa e E) – Vegetação rala.

### 3.2 Desenvolvimento do Modelo Hidrológico

Buscou-se desenvolver um modelo hidrológico que permitisse a realização do balanço hídrico diário em reservatórios do semiárido brasileiro, tendo como dados de entrada a precipitação e as características físicas das bacias hidrográficas dos referidos reservatórios. O modelo baseou-se no método do Número da Curva (CN) para estimativa do escoamento superficial e de Muskingun-Cunge (M-C) para propagação do escoamento em canais naturais até os reservatórios.

O modelo foi implementado em planilhas do software Excel da Microsoft, com a linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA). Nas Figuras 9 a 11 estão os fluxogramas dos módulos de balanço hídrico do reservatório, do módulo Número da Curva para obtenção do escoamento superficial e do módulo Muskingun-Cunge para deslocamento do hidrograma desde a interbacia até o reservatório e nas seções seguintes o detalhamento do desenvolvimento do modelo.

## Balanco hídrico em reservatórios

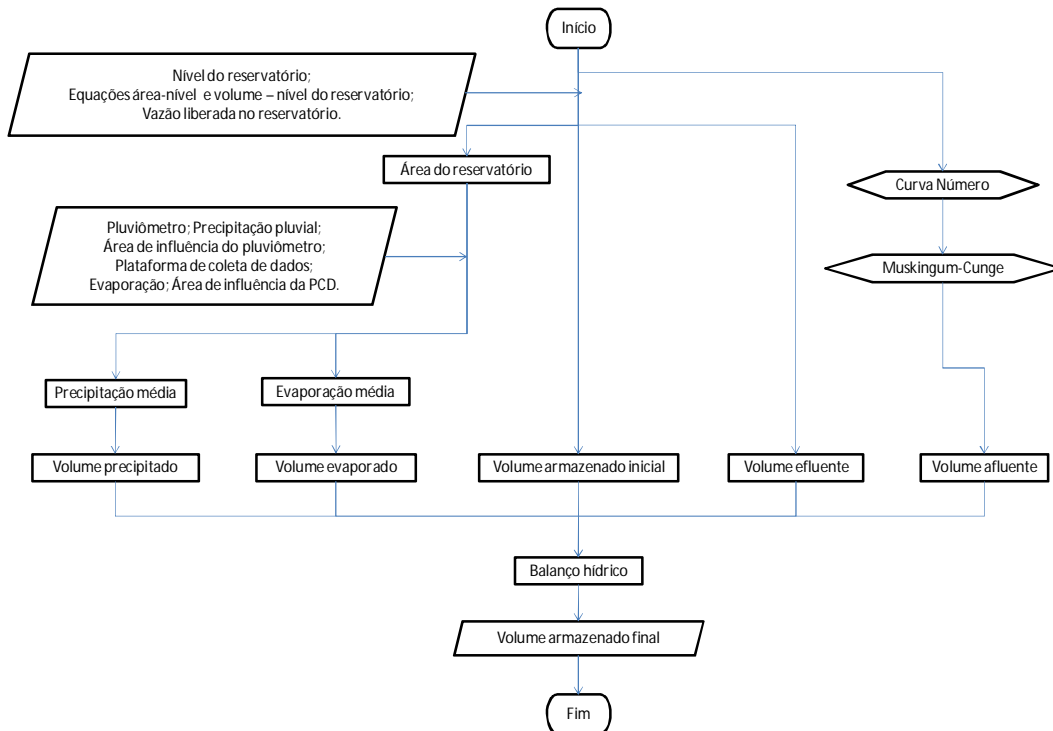


Figura 9 – Fluxograma do módulo Balanço Hídrico

## Número da Curva

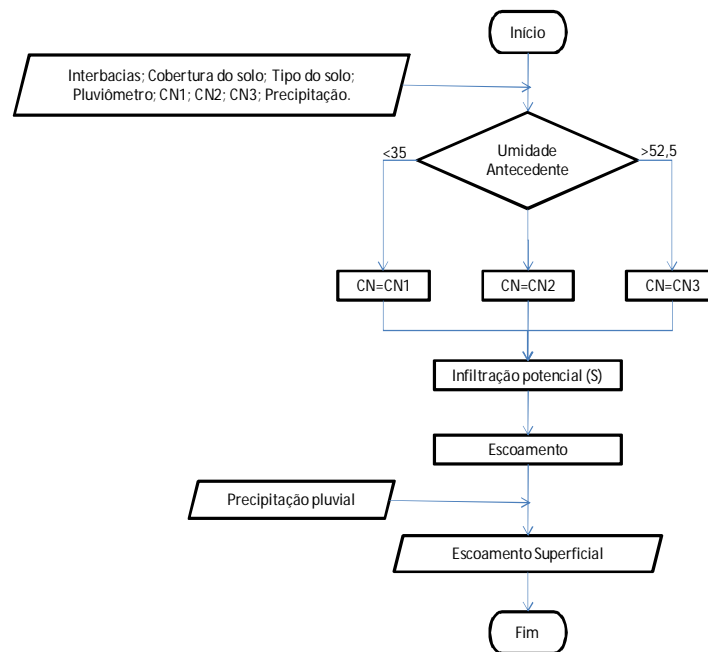


Figura 10 – Fluxograma do módulo Número da Curva para obtenção do escoamento superficial.

## Muskingum-Cunge

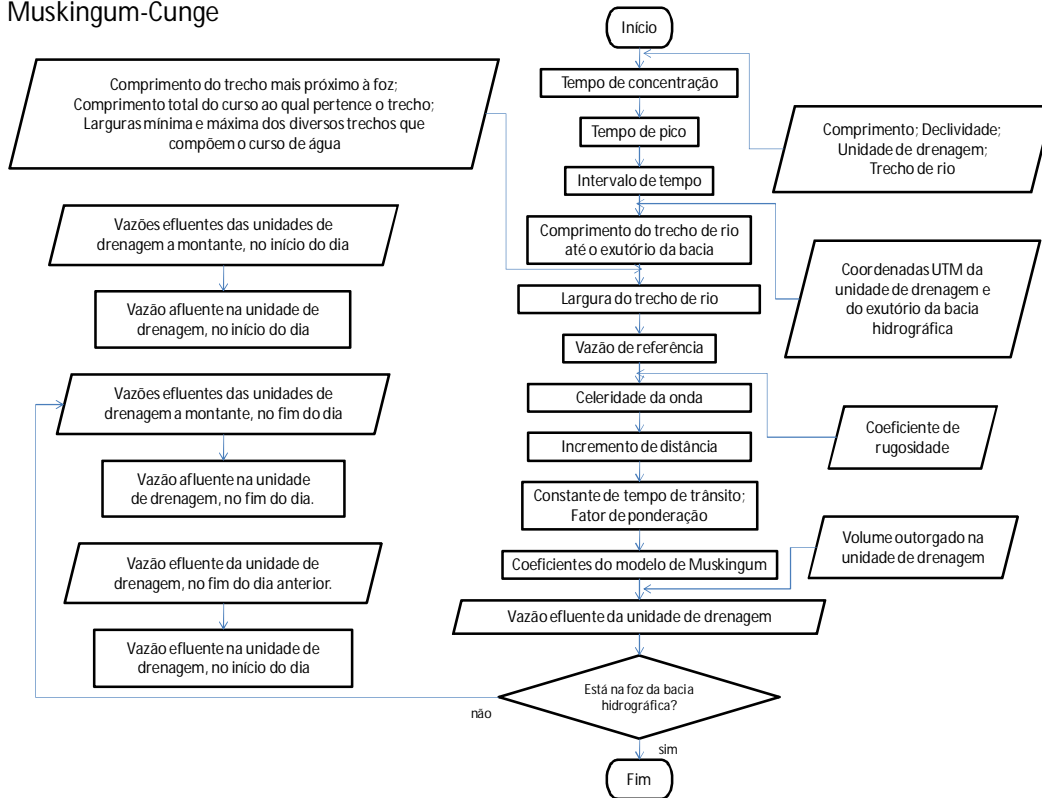


Figura 11 – Fluxograma do módulo Muskingum-Cunge para o deslocamento do hidrograma até o reservatório.

### 3.2.1. Balanço Hídrico nos Reservatórios

Neste trabalho adotou-se o balanço hídrico no reservatório com base na conservação da massa, segundo a seguinte equação:

$$Varm_{t+1} = Varm_t + Vprec_t + Vaf_t - Vef_t - Vev_t \quad (23)$$

em que  $Varm_{t+1}$  e  $Varm_t$  são, respectivamente, os volumes armazenados no final e no início do dia, em  $hm^3$ ;  $Vprec_t$ ,  $Vaf_t$ ,  $Vef_t$  e  $Vev_t$  são, respectivamente, os volumes precipitado, afluyente, efluente e evaporado no dia  $t$ , em  $hm^3$ .

### 3.2.1.1. Volumes Armazenados

Os termos  $Varm_{t+1}$  e  $Varm_t$  para cada reservatório foram determinados por meio de dados de nível da água medidos no reservatório e nas curvas cota-volume dos reservatórios, ambos fornecidos pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH. As curvas cota-volume foram determinadas por meio do ajuste de um polinômio de quarto grau realizado com o uso do software Excel. Os dados necessários para este ajuste (nível do reservatório e volume) estão expostos no Anexo A.

### 3.2.1.2. Volume Precipitado

O termo  $Vprec_t$  em cada reservatório foi determinado com base na precipitação média diária ocorrida no reservatório. Para determinação da precipitação média diária sobre os reservatórios, utilizou-se a técnica do polígono de Thiessen. Nesta técnica é obtida a área do reservatório que corresponde ao polígono de influência de cada estação pluviométrica e a precipitação média é calculada pela média ponderada da precipitação, sendo o fator de ponderação a área de influência do pluviômetro. As equações seguintes foram utilizadas:

$$Vprec_t = 10 \cdot \overline{Ppt}_t \cdot Ar_t \quad (24)$$

$$\overline{Ppt}_t = \frac{1}{Ar_t} \sum_{pp=1}^{np} A_{pp} \cdot Ppt_{pp,t} \quad (25)$$

em que  $\overline{Ppt}_t$  é a precipitação média, em mm, ocorrida sobre o reservatório, no dia  $t$ ;  $Ar_t$  é a área total do reservatório, no dia  $t$ ;  $A_{pp}$  é a área, em ha, do  $pp$ -ésimo posto pluviométrico sobre o reservatório e  $Ppt_{pp,t}$  é a precipitação pluvial, em mm, registrada no dia  $t$ , no  $pp$ -ésimo posto pluviométrico.

A área total do reservatório no dia  $t$  foi determinada com base no nível medido do reservatório e curva cota-área do mesmo. Esta curva foi obtida por meio do ajuste de um polinômio do quarto grau, no software Excel. Os dados necessários fornecidos pela COGERH estão no Anexo A. Para a determinação do  $Vprec$

diariamente, em cada reservatório estudado, foram considerados os postos pluviométricos com dados completos no período.

Na Figura 12 está ilustrada a obtenção da precipitação média sobre o reservatório Banabuiú, com as áreas de influência A1, A2 e A3, respectivamente dos postos pluviométricos 212 (P1), 427 (P2) e 494 (P3) sobre o reservatório Banabuiú.

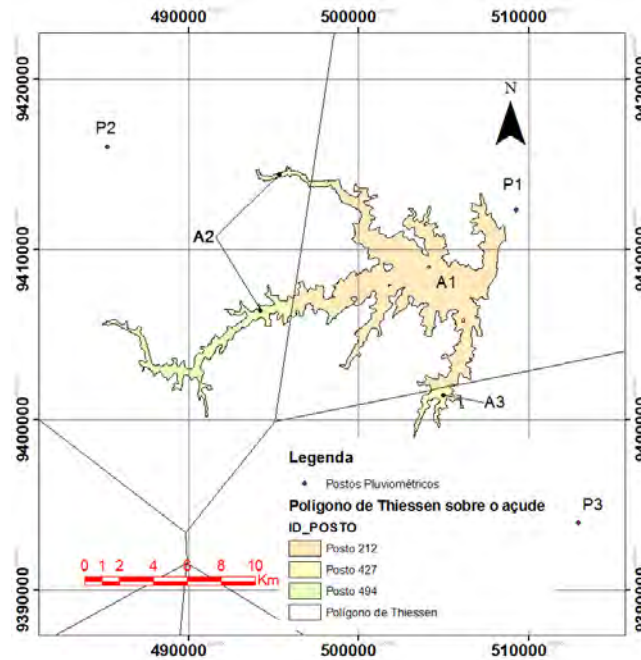


Figura 12 - Áreas de influência A1, A2 e A3, sobre o açude Banabuiú, dos postos pluviométricos 212 (P1), 427 (P2) e 494 (P3).

### 3.2.1.3. Volume Efluente

Os valores diários do termo  $V_{ef,t}$  foram obtidos com base nos valores de vazão diária liberada pela COGERH (Anexo B). Para o cálculo utilizou-se a seguinte equação:

$$V_{ef,t} = 86400 Q_{r,t} \quad (26)$$

em que:  $Q_{r,t}$  = vazão liberada, em  $m^3 s^{-1}$ ; 86400 = fator para converter em unidade de volume,  $m^3$ , o volume efluente correspondente a 24 horas em cada reservatório.

### 3.2.1.4. Volume Evaporado

O termo  $VEv_t$  em cada reservatório foi determinado com base na média ponderada da evaporação diária ocorrida no reservatório, a qual foi determinada por poligonização de Thiessen. Nesta técnica é obtida a área de influência da plataforma de coleta de dados (PCD) com influência sobre o reservatório e a evaporação média é calculada pela média ponderada da evaporação, sendo o fator de ponderação esta área de influência. Os cálculos são realizados segundo as equações seguintes:

$$VEv_t = 10 \cdot \overline{Ev}_t \cdot Ar_t \quad (27)$$

$$\overline{Ev}_t = \frac{1}{Ar_t} \sum_{pcd=1}^{npcd} A_{pcd} \cdot Ev_{pcd,t} \quad (28)$$

em que:  $\overline{Ev}_t$  = evaporação média no início do período;  $A_{pcd}$  = área de influência, sobre o reservatório, da plataforma de coleta de dados  $pcd$  ;  $Ev_{pcd,t}$  = evaporação, no início do período, estimada a partir dos dados da plataforma de coleta de dados  $pcd$  .

A evaporação em cada reservatório foi estimada por seis diferentes métodos semiempíricos: Penman (P), Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), deBruin-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruin (dB). Posteriormente, foi realizada uma avaliação para determinação do método mais adequado à área de estudo.

Foi desenvolvida uma planilha no Software Excel para o cálculo da estimativa da evaporação nos reservatórios. Os dados obtidos nas plataformas de coleta de dados foram radiação solar incidente, temperatura, umidade relativa, e velocidade do vento a 10 m de altura, fornecidos em periodicidade horária. A partir destes dados foram gerados os dados intermediários, com periodicidade diária, necessários para obtenção dos termos das equações dos diferentes métodos utilizados para a estimativa da evaporação. Os dados intermediários utilizados foram radiação solar incidente ( $Rs$ ), correspondendo à soma dos 24 dados fornecidos para o dia; temperatura máxima e mínima do dia ( $Tmáx$  e  $Tmín$ , respectivamente), correspondentes aos valores máximo e mínimo registrados entre os 24 dados de temperatura fornecidos para o dia; umidade relativa máxima e mínima do dia ( $URmáx$  e  $URmín$ , respectivamente), correspondentes aos valores máximo e mínimo registrados nos 24 dados de umidade relativa fornecidos



para o dia e velocidade do vento a 10 m de altura ( $U_{10}$ ), correspondente à média dos valores de velocidade do vento fornecido para o dia. As conversões de unidades necessárias e os cálculos intermediários conforme Allen et al. (1998) estão expostos no Apêndice C.

A partir dos dados intermediários, são obtidos os termos das equações dos diferentes métodos. Com exceção dos método K-N-F, para o qual os termos da equação foram obtidos conforme descritos em Burman e Pochop (1994), os termos das equações dos demais métodos foram obtidos a partir dos dados intermediários, conforme a metodologia apresentada em Allen et al. (1998). A seguir estão descritos os métodos utilizados.

Os diferentes métodos foram avaliados por meio do índice de confiança ou desempenho ( $c$ ) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), o qual é o produto do coeficiente de correlação ( $r$ ) e o de concordância ( $d$ ) de Willmot. Segundo estes autores, um modelo apresenta ótimo desempenho quando  $c$  for maior que 0,85; Muito bom quando  $c$  estiver entre 0,76 e 0,85; Bom, entre 0,66 e 0,75; Mediano, entre 0,61 e 0,65; Ruim, entre 0,51 e 0,60; Mau, entre 0,41 e 0,50 e péssimo quando  $c$  for menor que 0,41.

#### 3.2.1.4.1. Método de Penman (P)

Penman (1948) propôs um método de determinação da evaporação em superfícies saturadas que combinasse as duas abordagens teóricas até então existentes: a de base aerodinâmica, na qual a evaporação ocorre em decorrência do transporte de massa do vapor de água e a de base energética, para a qual a evaporação é um dos meios de degradação da energia proveniente da radiação. Atualmente conhecidos como termos adiabático e diabático, respectivamente. A equação de Penman, segundo Rosenberry et al., (2007) é a seguinte:

$$E_{sl} = \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left( \frac{R_n + G}{\lambda \rho} \right) 86,4 + \left( \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) [0,26(0,5 + 0,54U_2)(e_s - e_a)] \quad (29)$$

em que:  $\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor de saturação vs temperatura, em Pa °C<sup>-1</sup>;  $\gamma$  = coeficiente psicrométrico, em Pa.°C<sup>-1</sup>;  $R_n$  = saldo de radiação, em W m<sup>2</sup>;  $G$  = fluxo de calor para o fundo do reservatório, em W m<sup>2</sup>,  $\lambda$  = calor latente de vaporização, em MJ kg<sup>-1</sup>;  $\rho$  = massa específica da água, 1000 kg m<sup>-3</sup>;  $u_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura do tanque, em m s<sup>-1</sup>,  $e_s$  = pressão de saturação de vapor, em mbar;  $e_a$  = pressão real de vapor, em mbar.

#### 3.2.1.4.2. Método de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F)

Segundo Burman e Pochop (1994) talvez seja este o método mais utilizado para estimativa da evaporação. Para a evaporação em reservatórios, os autores do método assumem que a evaporação no lago é 70% da evaporação no tanque Classe A, resultando então na seguinte equação:

$$E_{sl} = 0,7 \left[ \frac{(\Delta R_n + \gamma_l E_a)}{(\Delta + \gamma_l)} \right] \quad (30)$$

em que:  $E_{sl}$  = evaporação no lago, em mm.d<sup>-1</sup>;  $\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor de saturação vs temperatura, em kPa.°C<sup>-1</sup>;  $R_n$  = saldo de radiação, em mm.d<sup>-1</sup>;  $\gamma_l$  é o coeficiente psicrométrico, em kPa.°C<sup>-1</sup> e  $E_a$  é a função aerodinâmica, mm.d<sup>-1</sup>.

O coeficiente psicrométrico é dado por:

$$\gamma_l = 0,000661 P \quad (31)$$

em que  $P$  é a pressão atmosférica em kPa.

A função aerodinâmica é determinada de forma empírica, pelo ajuste de equações com base em dados experimentais para um local específico. No Kohler-Nordenson-Fox a função utilizada foi obtida através de dados de tanques de evaporação espalhados pelos Estados Unidos:

$$E_a = 25,4 \left[ 0,296 \left( e_a - e_{po} \right)^{0,88} \left( 0,37 + 0,00255 u_p \right) \right] \quad (32)$$

em que:  $E_a$  é expressa em  $\text{mm.d}^{-1}$ ;  $e_a$  = pressão de vapor na temperatura do ar, em kPa;  $e_{po}$  = pressão de saturação do vapor na temperatura do ponto de orvalho, em kPa e  $u_p$  = velocidade do vento a 0,152 metros acima do tanque Classe A, em  $\text{km.d}^{-1}$ .

O saldo de radiação para o tanque classe “A” considera os efeitos da transferência de calor sensível através dos lados e da base do tanque e foi determinado pelo rearranjo da equação de evaporação no tanque para solução de mesma:

$$R_n = \frac{154,4 \exp \left[ (1,8T_a - 180) (0,1024 - 0,01066 \ln(0,239R_s)) \right] - 0,01544}{\Delta} \quad (33)$$

em que:  $T_a$  = temperatura do ar, em °C;  $R_s$  = radiação solar incidente, em  $\text{J.cm}^{-2}.\text{d}^{-1}$ .

A declividade da curva de pressão de vapor vs temperatura é dada por:

$$\Delta = \frac{(e_s - e_a)}{(T_a - T_{po})} \quad (34)$$

em que  $T_{po}$  é a temperatura do ponto de orvalho, °C.

#### 3.2.1.4.3. Método de Priestley-Taylor (P-T)

Neste método é considerada a condição de equilíbrio, isto é, quando o ar em contato com a superfície molhada está saturado, condição em que a energia radiante governa o processo evaporativo e o termo adiabático torna-se nulo. Para solucionar o fato de que esta condição não pode ser satisfeita, os autores introduziram um coeficiente empírico definido como a taxa de evaporação de uma superfície úmida sob condições mínimas de advecção. O método resultou na seguinte equação:

$$E_{sl} = \alpha_{PT} \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n + G) \quad (35)$$

em que:  $\alpha_{PT}$  = constante empírica de Priestley-Taylor, adimensional, e igual a 1,26 e os demais termos são os mesmos apresentados em (9).

#### 3.2.1.4.4. Método de deBruin-Keijman (dB-K)

Este método estima a evaporação em função da umidade relativa do ar sobre o reservatório, o calor armazenado no reservatório e o coeficiente psicrométrico o qual é função da pressão atmosférica e do calor latente de vaporização. Rosenberry et al (2007) apresenta a seguinte equação para o método:

$$E_{sl} = \left( \frac{\Delta}{0,85\Delta + 0,63\gamma} \right) \left( \frac{R_n - G}{\lambda \rho} \right) 86,4 \quad (36)$$

em que os termos são os mesmos descritos em (9).

#### 3.2.1.4.5. Método de Brutsaert-Stricker (B-S)

A abordagem de Brutsaert-Stricker baseia-se em um modelo conceitual que envolve o efeito de advecção regional sobre a evaporação potencial e uma simetria assumida entre evaporação potencial e a evaporação real com relação ao poder evaporante do ar na ausência de advecção (Brutsaert e Stricker, 1979). Então, Brutsaert-Stricker consideram que a evaporação no lago determinada pela equação de Priestley-Taylor, com o termo aerodinâmico sendo nulo, corresponde à média entre a evaporação real e a evaporação potencial determinada pela equação de Penman. A equação deste método é apresentada em Rosenberry et al (2007) como segue:

$$E_{sl} = (2\alpha_{PT} - 1) \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left( \frac{R_n + G}{\lambda \rho} \right) 86,4 - \left( \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) [0,26(0,5 + 0,54u_2)(e_s - e_a)] \quad (37)$$

em que todos os termos possuem a mesma definição que em equações anteriores.

#### 3.2.1.4.6. Método de deBruin (dB)

Este método foi desenvolvido para estimar a evaporação em reservatórios rasos ou lagoas, resultando na seguinte equação:

$$E_{sl} = \left[ \frac{\alpha_{PT}}{\alpha_{PT} - 1} \right] \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] f(u)(e_s - e_a) \quad (38)$$

em que todos os termos possuem a mesma definição que em equações anteriores, sendo  $f(u)$ , neste caso expresso pela seguinte equação:

$$f(u) = 2506 + 21,0u_2 \quad (39)$$

em que:  $f(u)$  é expressa em  $\text{mm.cm}^{-2}.\text{kPa}^{-1}.\text{d}^{-1}$  e  $u_2$  = velocidade do vento a 2 metros de altura, em  $\text{km.d}^{-1}$ .

#### 3.2.1.5 Volume Afluyente

Para a estimativa do volume afluyente dos reservatórios foram desenvolvidos dois módulos para o modelo, sendo um para estimar o escoamento superficial nas interbacias que compõem as bacias hidrográficas dos reservatórios, por meio do método do Número da Curva (CN) e outro para transportar o escoamento superficial até o reservatório, por meio do método de Muskingum-Cunge (M-C).

### 3.2.1.5.1. Escoamento superficial

Desenvolveu-se uma metodologia baseada em Sistemas de Informações Geográficas para estimativa do escoamento superficial. Utilizou-se o método do Número da Curva, diariamente, considerando a precipitação pluvial diária observada nos pluviômetros e distribuída nas interbacias de acordo com o método dos polígonos de Thiessen, estabelecidos por meio do software ArcGIS 9.3, para determinação da área de influência dos pluviômetros.

O escoamento superficial em cada interbacia ( $ES_{ib}$ ) é dado pela soma do escoamento superficial em cada subárea ( $ES_{sa}$ ) da interbacia, limitada pelas mesmas condições de cobertura e tipo do solo, as quais neste modelo são consideradas constantes, e ainda condições de precipitação e de umidade antecedente (variáveis ao longo do período), segundo o método do Número da Curva, cujas equações são as seguintes:

$$ES_{ib} = \sum_{sa=1}^{ns} ES_{sa} \quad (40)$$

$$ES_{sa} = \begin{cases} \frac{(Ppt_{sa} - 0,2 S_{sa})^2}{Ppt_j + 0,8 S_j} & \text{se } Ppt_{sa} \geq 0,2 S_{sa} \\ 0 & \text{se } Ppt_{sa} < 0,2 S_{sa} \end{cases} \quad (41)$$

$$S_{sa} = \frac{25400}{CN_{sa}} - 254 \quad (42)$$

em que:  $Ppt_{sa}$  = precipitação ocorrida na  $sa$ -ésima subárea, em mm;  $S_{sa}$  = infiltração potencial da  $sa$ -ésima sub-área, em mm;  $CN_{sa}$  = parâmetro curva-número da  $sa$ -ésima sub-área,  $ns$  = número de subáreas que compõem a interbacia.

Para seleção dos parâmetros  $CN_{sa}$  de cada subárea, realizou-se a combinação dos arquivos em forma de raster da ocupação de solo, do tipo de solo e da área de influência dos pluviômetros.

A grade de cobertura do solo contém cinco classes, as quais foram definidas anteriormente (Seção 3.1.6). A grade com o tipo do solo, conforme definidos pelo *Soil*

*Conservation Service* do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA), foram estabelecidos para a bacia em estudo por meio do mapa do levantamento exploratório do Estado do Ceará (BRASIL, 1972), considerando-se como solo do tipo A o solo de textura arenosa e o solo de textura arenosa e média; do tipo B aquele definido como solo de textura média; do tipo C aquele definido como solo de textura média a argilosa e solo do tipo D o solo de textura argilosa.

Obtido o mapa com o tipo de solo, após a digitalização e atribuição do tipo representativo de cada polígono, fez-se a conversão da representação vetorial deste mapa para a representação matricial. Nesta conversão, adotou-se o tamanho da célula de 92 m, mesmo tamanho das células da matriz de cobertura do solo obtida com a classificação das imagens digitais de satélite. Com isso foi possível a combinação das duas matrizes, por meio da álgebra de mapas, resultando na matriz de distribuição espacial dos parâmetros  $CN$ . Estes parâmetros foram determinados conforme sugerido em Tucci (2004) e em Pruski et al. (2006), utilizando-se as tabelas apresentadas nestas referências. Desta forma, a cobertura Área antropizada foi considerada semelhante a zonas residenciais com lotes de 1000 m<sup>2</sup> e 38% de área impermeável, Solo descoberto, equivalente a solo lavrado com sulcos retilíneos, Vegetação densa equivalente a floresta sob condição hidrológica regular e Vegetação rala equivalente a campos permanentes com vegetação esparsa, de baixa transpiração. Na Tabela 2 estão expostos os parâmetros para a combinação da cobertura e do tipo de solo.

Após obtido o escoamento superficial diário em cada interbacia, o mesmo foi convertido para volume escoado diariamente por meio da seguinte equação:

$$VE_{ib} = 10 ES_{ib} A_{ib} \quad (43)$$

em que:  $VE_{ib}$  = volume escoado na  $ib$ -ésima interbacia (m<sup>3</sup>),  $ES_{ib}$  = escoamento superficial obtido na  $ib$ -ésima interbacia (mm) e  $A_{ib}$  é a área da  $ib$ -ésima interbacia (ha).

Tabela 2 - Valores de CN em função da ocupação do solo, tipo de solo e condição de umidade antecedente.

Ocupação do solo	Tipo de solo	Umidade antecedente*		
		UA-II	UA-I	UA-III
Vegetação densa	A	26	13	44
	B	52	33	72
	C	62	42	80
	D	69	50	84
Vegetação rala	A	45	26	65
	B	66	46	83
	C	77	59	89
	D	83	67	93
Solo descoberto	A	70	51	85
	B	80	63	91
	C	87	73	95
	D	90	78	96
Área antropizada	A	61	41	79
	B	75	57	88
	C	83	67	93
	D	87	73	95

Adaptado de Tucci et al. (2004) e Pruski et al. (2006).

\* UA-I quando a precipitação total nos cinco dias menor ou igual 35 mm; UA-II, maior que 35 e menor ou igual a 52,5 mm e UA-III quando a precipitação acumulada é maior que 52,5 mm.

### 3.2.1.5.2. Deslocamento do volume escoado

Para determinação do volume afluyente no reservatório utilizou-se o método de Muskingun-Cunge na simulação do deslocamento do volume gerado em cada interbacia até os respectivos reservatórios. Os cálculos necessários foram realizados em planilha Excel e o código do programa em linguagem *Visual Basic for Application* (VBA) utilizado está apresentado no Anexo B.

As estimativas do fator de ponderação ( $X$ ) e da constante de tempo de trânsito ( $K$ ) do método de Muskingun para cada trecho de rio foram obtidas em planilha eletrônica Excel, com base nas Equações (17) e (18), respectivamente.

A vazão de referência ( $Q_0$ ) consistiu na média dos valores conhecidos de vazão:



$$Q_0 = \frac{I_t + I_{t+1} + O_t}{3} \quad (44)$$

em que:  $I_t$  = vazão de entrada no início do trecho, no tempo inicial;  $I_{t+1}$  = vazão de entrada no início do trecho, no tempo final e  $O_t$  = Vazão efluente no final do trecho, no tempo inicial, conforme Ponce e Yevjevich (1978), citado por Tucci (2004).

Para a implementação do caminhamento no modelo computacional, observam-se as seguintes relações e respectivas equações:

- A entrada ( $I$ ) em um determinado trecho ( $m$ ), no início do dia [ $t(d)$ ] é igual às saídas ( $O$ ), no início do dia [ $t(d)$ ], nos trechos a montante deste [ $(m-1)1$ ] e [ $(m-1)2$ ];

$$I_{t(d)}^m = O_{t(d)}^{(m-1)1} + O_{t(d)}^{(m-1)2} \quad (45)$$

- A entrada ( $I$ ) em um determinado trecho ( $m$ ), no fim do dia [ $t+1(d)$ ] é igual às saídas ( $O$ ), no fim do dia [ $t+1(d)$ ], nos trechos a montante deste [ $(m-1)1$ ] e [ $(m-1)2$ ];

$$I_{t+1(d)}^m = O_{t+1(d)}^{(m-1)1} + O_{t+1(d)}^{(m-1)2} + QES_d^m \quad (46)$$

- A saída ( $O$ ) de um determinado trecho ( $m$ ), no início do dia [ $t(d)$ ] é igual à saída ( $O$ ), no fim do dia anterior [ $t+1(d-1)$ ], do mesmo trecho;

$$O_{t(d)}^m = O_{t+1(d-1)}^m \quad (47)$$

- A saída ( $O$ ) de um determinado trecho ( $m$ ), no fim do dia [ $t+1(d)$ ], é estimada pelo método de Muskingum-Cunge, em função das três vazões anteriores.

$$O_{t+1(d)}^m = MC_d^m \quad (48)$$

A vazão  $I_{t+1}$  é estimada pela soma das vazões efluentes das interbacias a montante, no instante  $t+1$ , adicionada vazão decorrente do escoamento superficial gerado devido à precipitação pluvial medida em um período de 24 horas em uma

interbacia ( $Q_{es_{ib}}$ ), quando não é de cabeceira ou somente pelo segundo quando o é. O  $Q_{es_{ib}}$  é estimado pela seguinte equação:

$$Q_{es_{ib}} = \frac{ES_{ib} A_{ib}}{86400} \quad (49)$$

em que:  $ES_{ib}$  é a lâmina escoada na interbacia, em mm;  $A_{ib}$  é a área da interbacia, em ha.

Devido à grande quantidade de trechos e à dificuldade de verificação da largura da superfície do canal ( $B$ ) para cada trecho, a mesma foi estimada interpolando-se, linearmente pela distância euclidiana entre o centro de massa da interbacia à qual pertence o trecho em análise e o centro de massa da interbacia onde se localiza o exutório da bacia hidrográfica do reservatório, considerando-se a largura mínima de 2 m, no início de cada curso e 50 m no final do rio principal (Equações 94 e 95).

$$B_{ib} = \frac{(L_{mi} - L_{ma})(D_i - D_{mi})}{D_{ma} - D_{mi}} + L_{ma} \quad (50)$$

$$D_{ib} = \sqrt{(CX_i - CX_{ex})^2 + (CY_i - CY_{ex})^2} \quad (51)$$

em que:  $B_{ib}$  é a largura do curso de água da interbacia  $ib$ , em m;  $D_{ib}$  é a distância euclidiana entre o centro de massa da interbacia  $ib$  e o da interbacia da foz da bacia hidrográfica do reservatório, em m;  $L_{mi}$  e  $L_{ma}$  são as larguras mínima e máxima, respectivamente, do rio ou curso de água ao qual pertence o curso de água da interbacia  $ib$ , em m, e definidas neste trabalho como 2 e 50 m, respectivamente;  $D_{mi}$  e  $D_{ma}$  são as distâncias mínima e máxima definidas, respectivamente, como o comprimento do trecho de rio da interbacia do exutório da bacia hidrográfica e o comprimento total de todos os trechos que compõem o curso ao qual pertence o curso de água da interbacia  $ib$ , em m;  $CX_i$  e  $CX_{ex}$  são as coordenadas Leste, na projeção UTM, do centro de massa da interbacia  $ib$  e da interbacia do exutório da bacia hidrográfica, respectivamente, em m;  $CY_i$  e  $CY_{ex}$  são as coordenadas Norte, na projeção UTM, do centro de massa da interbacia  $ib$  e da interbacia do exutório da bacia hidrográfica, respectivamente, em m.

Todos os comprimentos de trecho necessários para a obtenção de  $D_{mi}$  e  $D_{ma}$  são obtidos pela extensão ArcHydro. Todas as coordenadas (Leste e Norte), na projeção UTM, do centro de massa das interbacias foram obtidas pela extensão X-Tools, utilizada na plataforma ArcGIS 9.3.

A declividade de cada trecho ( $S_0$ ) é obtida por meio da ferramenta ArcHydro e corrigida em planilha Excel. A correção se deve ao fato de que em alguns trechos, principalmente aqueles de pequeno comprimento, a declividade foi zero, pois a altitude na entrada da interbacia foi a mesma encontrada na saída. Esta correção foi realizada considerando a declividade deste pequeno trecho como a média das declividades dos dois trechos a montante. Houve casos ainda em que estes últimos também foram iguais a zero. Então, obteve-se a declividade do trecho em questão pela declividade média de todos os cursos encontrados na bacia hidrográfica do reservatório.

A celeridade da onda de cheia  $c_0$  foi feita a partir da equação de Manning, considerando-se o coeficiente de rugosidade em todos os trechos de rios na bacia como sendo  $n = 0,035$ . A equação para a determinação da celeridade da onda foi a mesma apresentada em Tucci (2004):

$$c_0 = \frac{1,67 S_0^{0,3} Q_0^{0,4}}{n^{0,6} B^{0,4}} \quad (52)$$

em que  $S_0$  = declividade do trecho de rio;  $Q_0$  = vazão de referência no trecho de rio;  $n$  = coeficiente de rugosidade e  $B$  largura do trecho de rio.

O incremento da distância ( $\Delta x$ ) em cada trecho, para implementação do método de Muskingun-Cunge foi determinado pela equação não linear apresentada em Tucci (2004), através do método iterativo de Newton-Rapson:

$$\Delta x = \frac{0,761 c_0 \Delta t}{\left[ 1 - \frac{Q_0}{B_0 c_0 S_0 \Delta x} \right]^{1,25}} \quad (53)$$

em que  $\Delta t$  é o intervalo de tempo para determinação do incremento de distância, em minutos.

Segundo Tucci (2004), quando  $\Delta x$  é fixado em função dos dados (largura, declividade e rugosidade),  $\Delta t$  é determinado fixando-o como sendo menor ou igual a 1/5 do tempo de pico  $t_p$  da interbacia. O tempo de pico é calculado pela equação  $T_p = 0,6T_c$  (22) e o tempo de concentração foi obtido pela equação de Ven te Chow para pequenas bacias até 24,28 km<sup>2</sup>, conforme a equação (21).

Após obtidos os valores de  $K$  e  $X$ , os coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  puderam ser calculados conforme as equações (12) a (14).

Finalmente, por meio da equação (11) foi determinada a vazão efluente na interbacia, no final do período, considerando-se os hidrogramas afluentes na interbacia, no início e no fim do período e o hidrograma efluente, no início do período.

### 3.2.2. Aplicação do Modelo Desenvolvido

Embora toda a base de dados tenha sido desenvolvida para a totalidade da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, devido à grande extensão das áreas de drenagem dos reservatórios Orós e Castanhão, resultando em maior número de variáveis que interferem no desempenho do modelo, como por exemplo, quantidade de reservatórios sem dados disponíveis e retiradas não outorgadas de água do sistema, tanto nos reservatórios quanto ao longo dos cursos, o modelo desenvolvido foi testado apenas para as bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas e Banabuiú (Tabela 1).

A validação da metodologia foi realizada comparando-se os resultados de volume armazenado estimado por meio do balanço hídrico, Equação (23), com o volume armazenado obtido por meio do nível medido do reservatório e a relação entre nível e volume armazenado. O modelo desenvolvido foi avaliado por meio do índice de confiança ou desempenho ( $c$ ). Os dados estimados foram comparados com os observados também por meio do coeficiente de eficiência de Nash e Stouffle ( $NS$ ) que segundo Malveira (2009) é dado pela seguinte equação:

$$NS = 1 - \frac{\sum (V_o - V_e)^2}{\sum (V_o - \bar{V}_o)^2} \quad (54)$$

em que  $V_o$  é o volume observado no reservatório conforme dados fornecidos pela Cogerh,  $V_e$  é o volume estimado pelo modelo e  $\overline{V_o}$  é a média dos volumes medidos no reservatório.

Segundo Silva et al. (2008), o coeficiente  $NS$  pode variar do negativo infinito até 1, sendo, neste caso, o ajuste perfeito. O desempenho do modelo é considerado bom se o valor de  $NS$  supera 0,75 e aceitável se fica entre 0,36 e 0,75.

### 3.2.2.1. Caracterização da Região Hidrográfica Banabuiú

A região hidrográfica Banabuiú abrange as bacias hidrográficas dos açudes Orós e Pedras Brancas. O rio Banabuiú, com 314 km de extensão, drena uma área de 19.314 km<sup>2</sup> e é o principal tributário do rio Jaguaribe. Desenvolve-se no sentido Oeste-Leste, tendo sua foz próximo ao município de Limoero do Norte. São seus afluentes pelo lado esquerdo os rios Patu, Quixeramobim e Sitiá (barrado pelo Pedras Brancas) e pela margem direita destaca-se o riacho Livramento. O rio Sitiá desemboca no rio Banabuiú a jusante da barragem do açude Banabuiú. Existem 17 açudes monitorados, totalizando 2.775.909.000 m<sup>3</sup> em capacidade de armazenamento. Os maiores reservatórios presentes são o Banabuiú, o Pedras Brancas o Cedro e o Fogareiro. Estão inseridos 12 municípios na região hidrográfica Banabuiú. Os cursos de água são intermitentes e o potencial de águas subterrâneas é baixo e ocorre em sistemas de fraturas.

O clima é Tropical Quente Semiárido com temperaturas médias anuais em torno de 26°C a 28°C. A média pluviométrica é de 725,4 mm. O padrão geológico é simples, com 96,5 % de rochas do embasamento cristalino recoberto por solos rasos, prevalecendo os Neossolos Litólicos, Planossolos e Vertissolos e ainda Neossolos flúvicos nos aluviões do Rio Banabuiú, Planossolos Solódicos e Argissolos Eutróficos. Predominam os tipos de vegetação Caatinga Arbustiva Aberta e Caatinga Arbustiva Densa (CEARÁ, 2009).

Devido a elevadas temperaturas e altas taxas de evaporação, aliadas à baixa pluviosidade, ocorre considerável déficit hídrico e o escoamento da rede de drenagem natural fica praticamente restrito aos períodos chuvosos (CEARÁ, 2009).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Delineamento automático

O delineamento automático da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe foi realizado com sucesso por meio do algoritmo empregado e gerou áreas de drenagens (denominadas neste trabalho de interbacias, em analogia ao termo utilizado na ottocodificação, embora os códigos para tais áreas de drenagem tenham sido estabelecidos no algoritmo de delineamento automático empregado pelo SIG) e drenos naturais condizentes com os apresentados nas imagens de satélite como podem ser vistos na Figura 13. Esta figura apresenta ainda, em detalhe, uma pequena área da bacia do rio Jaguaribe com e sem os divisores e cursos de água gerados.

Na imagem superior (Figura 13 - A) observa-se parte da imagem Landsat-5, órbita 217, ponto 063, com passagem no dia 14/07/2006, com composição colorida, R5, G4 e B3. Nesta imagem podem ser vistos os drenos naturais (1 e 2 na figura são detalhes de dois trechos de rios) e divisores de água (3 e 4 na figura são detalhes de divisores de água). Na imagem inferior (Figura 13 - B) está apresentada a mesma imagem com a sobreposição da rede de drenagem e os divisores obtidos no delineamento automático com destaque para os mesmos elementos. Esta figura mostra uma boa coincidência da rede de drenagem e dos divisores de água, validando a utilização dos dados SRTM no delineamento automático de bacias hidrográficas e redes de drenagem.

O sucesso do algoritmo pode ser constatado também pelo coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (Equação 54),  $NS = 0,99$ , o que o classifica como muito bom, uma vez que unidade corresponde ao ajuste perfeito. Também o índice de concordância  $c = 0,99$  permite afirmar que o delineamento automático apresentou ótimo desempenho. Na Tabela 3 estão os comprimentos de diferentes trechos de rios obtidos com o delineamento automático e medidos na plataforma Google Earth, em imagens de boa definição.

Paz et al. (2008), mesmo admitindo que devam aparecer várias diferenças quando comparados aos cursos d'água delineados pela digitalização a partir de imagens de satélite, consideraram os dados SRTM adequados para a obtenção dos cursos d'água com finalidade de estudos hidrológicos e ambientais.

Tabela 3. – Comprimentos, em km, de trechos de rios na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe obtidos com o delineamento automático (SRTM) e medidos na plataforma Google Earth.

Trecho de rio	SRTM	Google Earth	Diferença absoluta	Diferença relativa
Entre os açudes Patu e Banabuiú	53,05	54,07	-1,02	-1,92%
Entre os açudes Quixeramobim e Banabuiú	38,18	35,24	2,94	7,70%
Entre os açudes Serafim Dias e Banabuiú	103,01	103,32	-0,31	-0,30%
Entre os açudes Trapiá II e Patu	49,4	47,5	1,9	3,85%
Entre os açudes Vieirão e Fogareiro	28,52	26,89	1,63	5,72%
Entre os açudes Trussu e Orós	59,17	54,91	4,26	7,20%
Entre o açude Lima Campos e o rio Jaguaribe	35,88	33,29	2,59	7,22%
Entre os açudes Riacho do Sangue e Castanhão	49,25	46,47	2,78	5,64%
Entre o açude Cachoeira e o rio Salgado	9,94	10,22	-0,28	-2,82%
Entre o açude Rosário e o rio Salgado	28,49	32,17	-3,68	-12,92%

Costa (2008) encontrou erro médio de 7 m na precisão vertical dos dados SRTM comparando-os com os dados de níveis de referência (RNs) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em estudo realizado na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. O referido autor menciona ainda a interferência da altura média da vegetação no erro vertical médio dos dados SRTM, indicando que, com a altura média da vegetação variando entre 3 e 5 m, os erros apresentados pelos dados da missão SRTM variaram de 6 a 10 m e com a altura média de vegetação de 6 m, os dados da SRTM apresentaram erro médio em torno de 14 m.

Pinheiro (2006) encontrou superestimativa dos dados da missão SRTM em relação a dados obtidos em GPS no Planalto das Araucárias, no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, na área do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza PRÓ-MATA, um local escarpado e com grandes declividades. O autor observou que no planalto a superestimativa foi, em média, em torno de 6,0 m e nos vales de 4,2 m.

Outra evidência da aplicabilidade dos SRTM neste trabalho está apresentada na Figura 14 que consiste no mosaico de imagens Landsat da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, sobposto à rede de drenagem, e onde se observa a consistência da rede de drenagem pela coincidência com os afluentes aos reservatórios principais.

O modelo digital de elevação está apresentado na Figura 15, juntamente com a rede de drenagem. Pode-se observar nesta figura a direção predominante dos cursos de água na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, no sentido SO-NE, compatível com a descrição do relevo segundo Gatto (1999) e citado na página 55 deste trabalho.

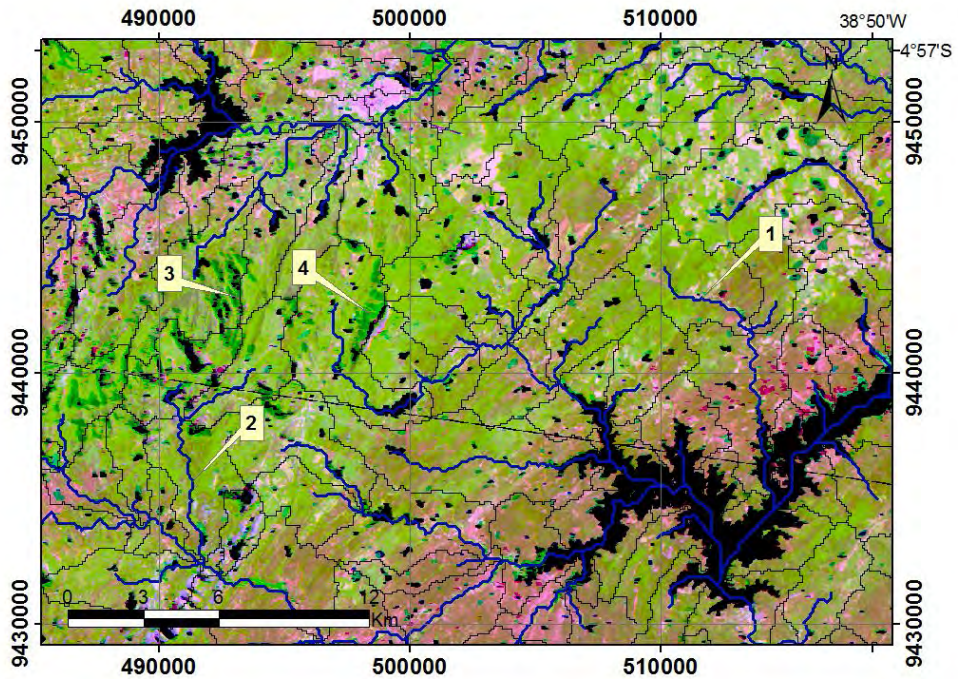
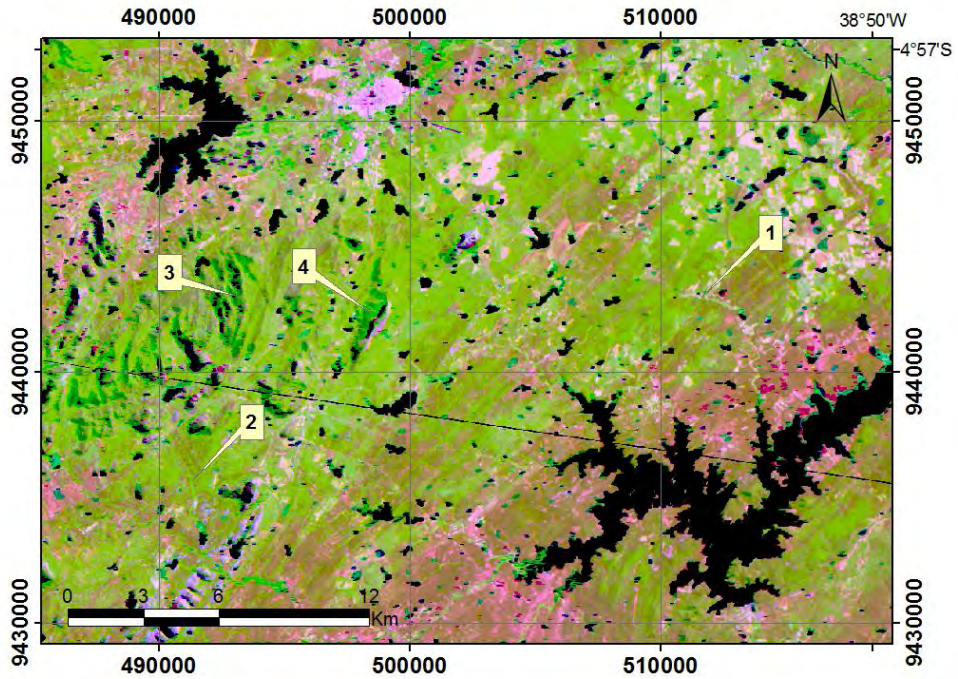


Figura 13 - A) Imagem de satélite Landsat TM, com passagem no dia 14/07/2006, composição R5, G4, B3. B) Mesma imagem com sobreposição de rede de drenagem e divisores delineados automaticamente por meio das extensão ArcHydro, no aplicativo ArcGis 9.3.



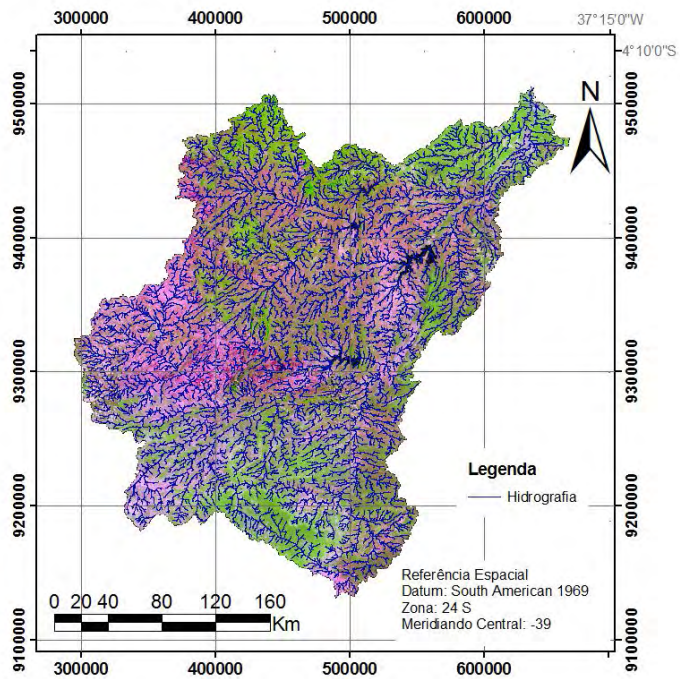


Figura 14 – Mosaico de imagens Landsat 5 e rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe obtida no delineamento automático.

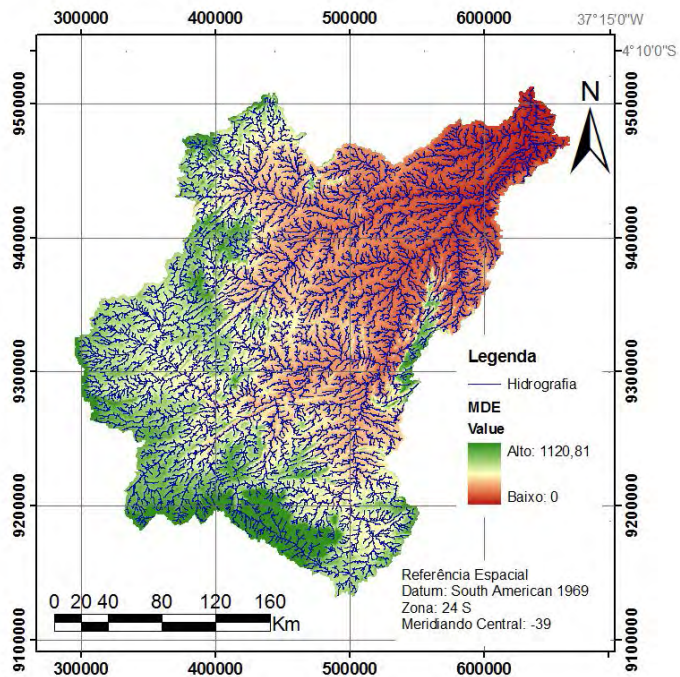


Figura 15 – Modelo digital de elevação e rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe obtida no delineamento automático.

4.1.1. Delineamento automático da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e das bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

O delineamento automático da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe resultou, em 9440 interbacias e trechos de rios. A Tabela 4 fornece a estatística descritiva das interbacias geradas quanto aos parâmetros área de drenagem da interbacia ( $A_{IB}$ ); perímetro da área de drenagem da interbacia ( $P_{IB}$ ); comprimento do curso principal da interbacia ( $L_{CIB}$ ); declividade do curso principal da interbacia ( $So_{IB}$ ); tempo de concentração da interbacia ( $Tc_{IB}$ ) e tempo de pico da interbacia ( $Tp_{IB}$ ), e a Figura 16 apresenta a distribuição das interbacias na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, com detalhe para uma pequena área, permitindo a visualização mais detalhada do resultado.

Tabela 4- Estatística descritiva das interbacias componentes da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe

Estatística	$A_{IB}$	$P_{IB}$	$L_{CIB}$	$So_{IB}$	$Tc_{IB}$	$Tp_{IB}$
Descritiva	(ha)	(m)	(m)	(m m <sup>-1</sup> )	(min)	(min)
Máximo	6520,67	73600,00	25144,4	0,16960	6143,7	3686,2
Interbacia-ID	17258	4611	6971	13002,	3921	3921
Mínimo	0,85	368,00	92,0	0,00001	28,0	16,8
Interbacia-ID	3552	3552	6273	3584	12188	12188
Percentil 25%	425,7392	11960,0	1286,6	0,00222	331,2	198,7
Percentil 50%	636,4928	15824,0	2459,4	0,00433	544,8	326,9
Percentil 75%	1016,5264	20792,0	4107,1	0,00797	819,7	491,8
Percentil 90%	1530,2912	26128,0	6296,6	0,01472	1143,5	686,1

Legenda –  $A_{IB}$  – área da interbacia;  $P_{IB}$  – perímetro da interbacia;  $L_{CIB}$  – comprimento do curso principal da interbacia;  $So_{IB}$  – declividade do curso principal da interbacia;  $Tc_{IB}$  – tempo de concentração da interbacia e  $Tp_{IB}$  – tempo de pico da interbacia.

Com vistas à Tabela 4, observa-se que a maior área correspondeu a 65,2 km<sup>2</sup>, e que mais de 90% das interbacias apresentaram áreas inferiores a 15,3 km<sup>2</sup>. Para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, cerca 97,9% das interbacias apresentaram área de drenagem inferior à área das bacias estudadas por Ven Te Chow (24,28 km<sup>2</sup>) quando o

mesmo determinou a Equação 57 para o tempo de concentração ( $T_c$ ), tornando, portanto, aplicável a equação no presente estudo.

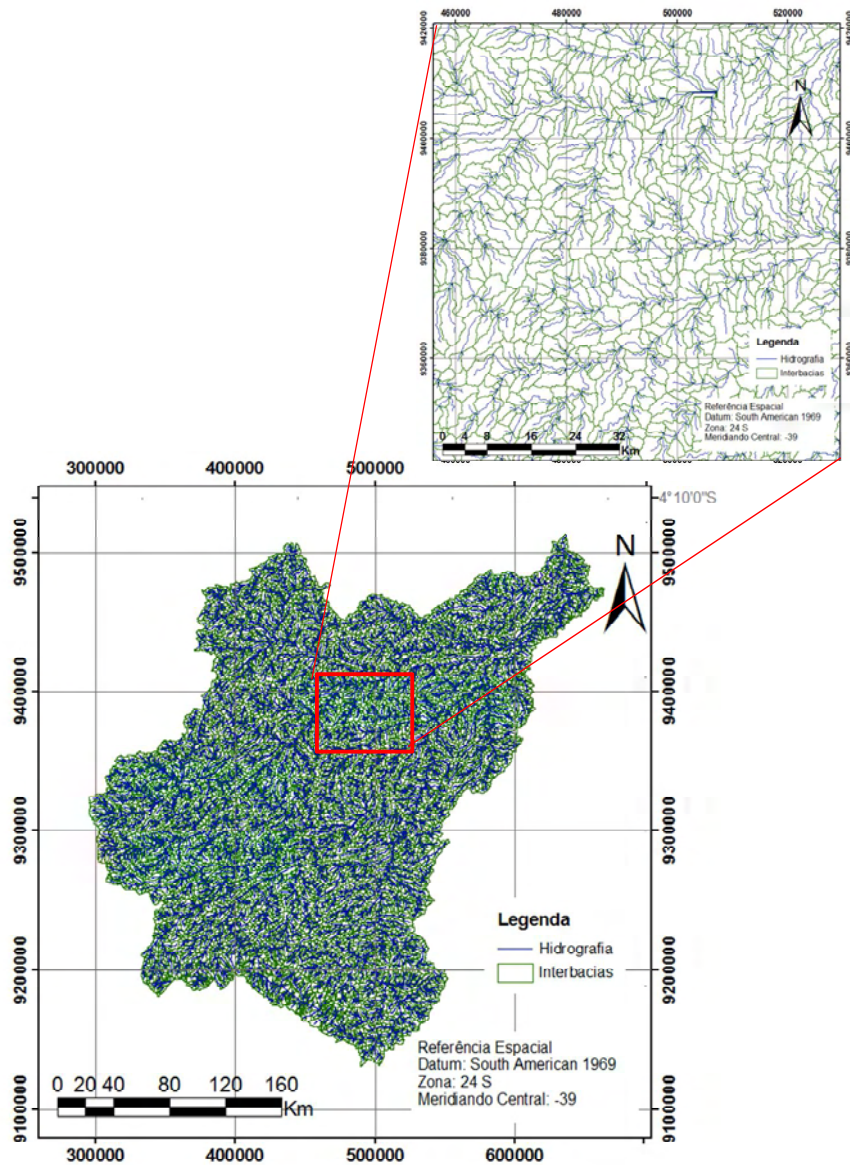


Figura 16 – Interbacias componentes da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

A área de drenagem mínima e o perímetro mínimo das interbacias, o comprimento mínimo dos trechos de rio, foram apresentados por 13 interbacias, não necessariamente as mesmas para todas as variáveis. A declividade mínima para os trechos de rios foi apresentada por cinco interbacias. Consta da Tabela 4 somente a que tem o código de identificação menor.

O delineamento automático resultou na geração de 227 interbacias para a bacia hidrográfica do açude Pedras Brancas; 1.811 para a do Banabuiú; 2.633 para a do Castanhão e 3.263 para a do Orós. O resultado do delineamento automático por bacia hidrográfica dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão está exposto na Figura 17.

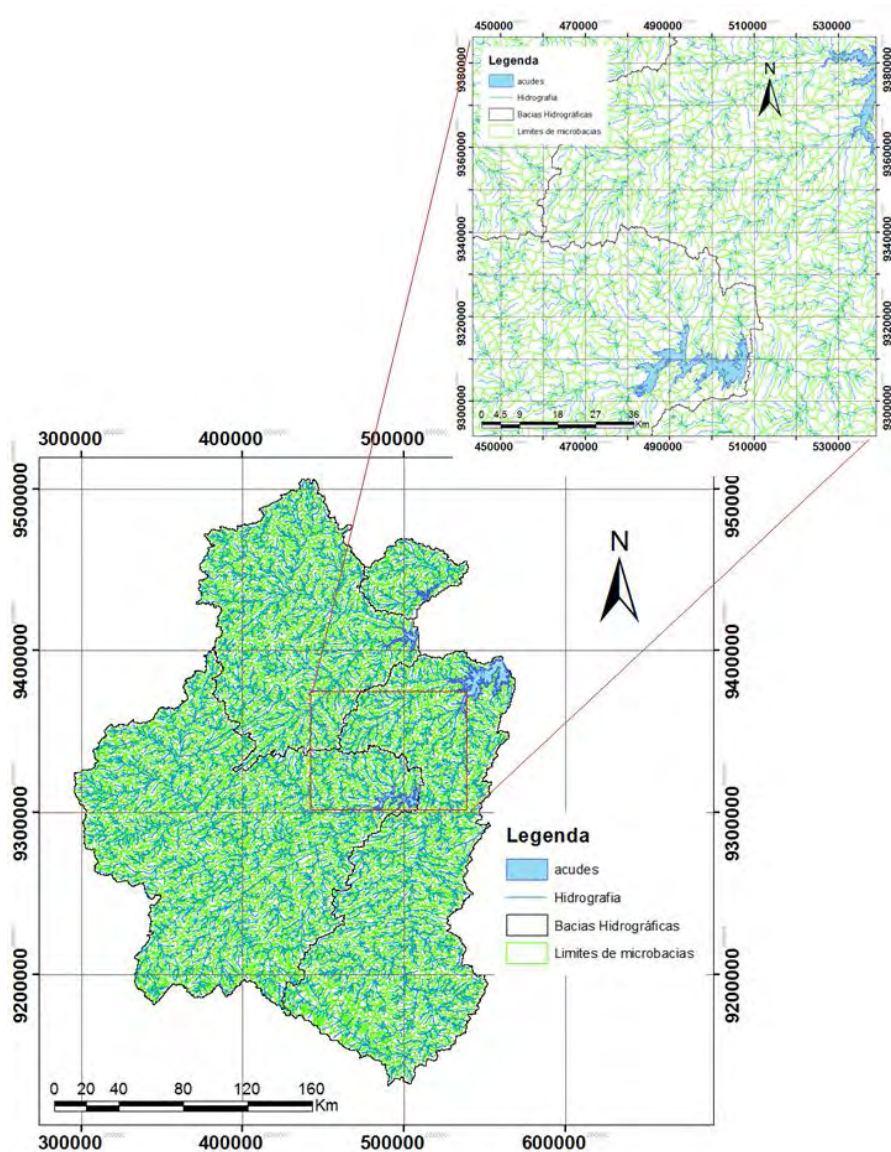


Figura 17 – Interbacias componentes das bacias hidrográficas do açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Nas Tabelas 5, 6, 7 e 8 constam as estatísticas descritivas das interbacias geradas quanto aos parâmetros  $A_{IB}$ ,  $P_{IB}$ ,  $L_{CIB}$ ,  $So_{IB}$ ,  $Tc_{IB}$  e  $Tp_{IB}$  para os açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão, respectivamente.

Tabela 5- Estatística descritiva para o resultado do delineamento automático da bacia hidrográfica do açude Pedras Brancas.

Estatística Descritiva	$A_{IB}$ (ha)	$P_{IB}$ (m)	$L_{CIB}$ (m)	$So_{IB}$ (m m <sup>-1</sup> )	$Tc_{IB}$ (min)	$Tp_{IB}$ (min)
Máximo	3881,59	50048	14917,4	0,05519	2030,9	1218,5
Interbacia-ID	6234	6234	6234	6311	4745	4745
Mínimo	6,77	1288	130,1	0,00011	94,6	56,8
Interbacia-ID	6579	6767	5490	5864	5490	5490
Percentil 25%	476,5232	12806,4	1723,1	0,00182	480,2	288,1
Percentil 50%	782,0736	17766,2	2895,3	0,00304	678,5	407,1
Percentil 75%	1198,3331	22039,1	4451,6	0,00450	952,2	571,3
Percentil 90%	1595,8872	27702,2	6616,3	0,00627	1282,0	769,2

Legenda –  $A_{IB}$  – área da interbacia;  $P_{IB}$  – perímetro da interbacia;  $L_{CIB}$  – comprimento do curso principal da interbacia;  $So_{IB}$  – declividade do curso principal da interbacia;  $Tc_{IB}$  – tempo de concentração da interbacia e  $Tp_{IB}$  – tempo de pico da interbacia.

Tabela 6 - Estatística descritiva para o resultado do delineamento automático da bacia hidrográfica do açude Banabuiú.

Estatística Descritiva	$A_{IB}$ (ha)	$P_{IB}$ (m)	$L_{CIB}$ (m)	$So_{IB}$ (m m <sup>-1</sup> )	$Tc_{IB}$ (min)	$Tp_{IB}$ (min)
Máximo	5547,3056	73600,0	23528,4	0,12530	2779,1	1667,5
Interbacia-ID	10897	4611	4611	7809	10146	10146
Mínimo	0,8464	368,0	92,0	0,00002	46,7	28,0
Interbacia-ID	8896	3552	6273	10902	4692	4692
Percentil 25%	431,6640	12103,1	1954,9	0,00274	325,0	195,0
Percentil 50%	653,4208	15750,4	2558,9	0,00499	527,7	316,6
Percentil 75%	1019,9120	20260,4	4243,7	0,00829	791,5	474,9
Percentil 90%	1530,2912	25870,4	6320,3	0,01395	1067,8	640,7

Legenda –  $A_{IB}$  – área da interbacia;  $P_{IB}$  – perímetro da interbacia;  $L_{CIB}$  – comprimento do curso principal da interbacia;  $So_{IB}$  – declividade do curso principal da interbacia;  $Tc_{IB}$  – tempo de concentração da interbacia e  $Tp_{IB}$  – tempo de pico da interbacia.

Tabela 7 - Estatística descritiva para o resultado do delineamento automático da bacia hidrográfica do açude Orós.

Estatística Descritiva	$A_{IB}$ (ha)	$P_{IB}$ (m)	$L_{CIB}$ (m)	$So_{IB}$ (m m <sup>-1</sup> )	$Tc_{IB}$ (min)	$Tp_{IB}$ (min)
Máximo	6520,6656	69368,00	21691,7	0,16960	4809,0	2885,4
Interbacia-ID	17258	17258	17258	13002	14566	14566
Mínimo	0,8464	368,00	92,0	*0,00001	29,4	17,6
Interbacia-ID	13474	13474	13186	14566	17873	17873
Percentil 25%	415,58	12052,0	1272,2	0,00262	312,4	187,4
Percentil 50%	628,03	15857,5	2397,2	0,00519	508,0	304,8
Percentil 75%	997,9056	20755,2	4015,1	0,00944	759,5	455,7
Percentil 90%	1531,1376	26220,0	6198,0	0,01751	1073,6	644,2

Legenda –  $A_{IB}$  – área da interbacia;  $P_{IB}$  – perímetro da interbacia;  $L_{CIB}$  – comprimento do curso principal da interbacia;  $So_{IB}$  – declividade do curso principal da interbacia;  $Tc_{IB}$  – tempo de concentração da interbacia e  $Tp_{IB}$  – tempo de pico da interbacia.

Tabela 8 - Estatística descritiva para o resultado do delineamento automático da bacia hidrográfica do açude Castanhão.

Estatística Descritiva	$A_{IB}$ (ha)	$P_{IB}$ (m)	$L_{CIB}$ (m)	$So_{IB}$ (m m <sup>-1</sup> )	$Tc_{IB}$ (min)	$Tp_{IB}$ (min)
Máximo	4072,0304	60904,0	19341,1	1,22464	2674,2	1604,5
Interbacia-ID	19274	17924	17924	9021	12606	12606
Mínimo	0,8464	368,0	92,0	0,00002	13,9	8,3
Interbacia-ID	19270	3552	13923	15056	9021	9021
Percentil 25%	406,2720	11960,0	1248,5	0,00240	287,8	172,7
Percentil 50%	619,5648	15696,6	2368,3	0,00488	489,6	293,8
Percentil 75%	1014,8336	20765,7	4031,4	0,01129	766,1	459,7
Percentil 90%	1508,2848	25944,0	6250,6	0,03783	1072,4	643,4

Legenda –  $A_{IB}$  – área da interbacia;  $P_{IB}$  – perímetro da interbacia;  $L_{CIB}$  – comprimento do curso principal da interbacia;  $So_{IB}$  – declividade do curso principal da interbacia;  $Tc_{IB}$  – tempo de concentração da interbacia e  $Tp_{IB}$  – tempo de pico da interbacia.

#### 4.1.3. Relevo

Na Figura 18 pode-se observar a distribuição espacial da altitude na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. Observa-se que grande parte da bacia possui altitude variando de 0 a 480 m. As altitudes máxima, mínima e média na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe são, respectivamente, 1120,8 m, 0,0 m e 355,8 m. Para as bacias hidrográficas dos principais açudes, estas altitudes são, respectivamente: 771,0 m, 133,6 m e 209,6 m, para o Pedras Brancas; 1120,8 m, 131,7 m e 360,6 m, para o Banabuiú; 958,9 m, 196,9 m e 471,5 m, para o Orós e 1004,0 m, 58,6 m e 369,9 m, para o Castanhão.

As relações hipsométricas das bacias hidrográficas estão na Tabela 9. Observa-se que 50% da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe possuem altitude abaixo de 363,8 m. A mediana para a altitude da bacia hidrográfica do açude Pedras Brancas é 230,1 m; para a do Banabuiú é 354,7 m; para a do Orós, 490,6 m e para a do Castanhão, 347,9 m.

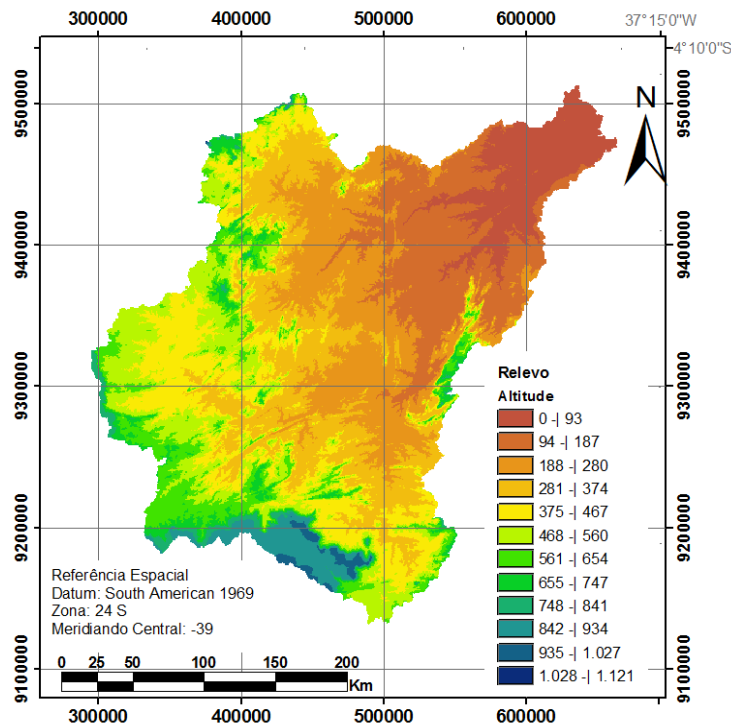


Figura 18 – Classificação do relevo conforme a altitude da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

Tabela 9 – Relações hipsométricas das bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Classes de altitude (m)	Rio Jaguaribe	Açudes			
		Pedras Brancas	Banabuiú	Orós	Castanhão
1080- 1140	0,00017%	-	0,00089%	-	-
1020- 1080	0,00100%	-	0,00511%	-	-
960- 1020	0,10008%	-	0,01497%	-	0,35479%
900- 960	1,77104%	-	0,04485%	0,831119%	5,40068%
840- 900	3,18015%	-	0,11157%	3,062132%	7,72201%
780- 840	4,00953%	-	0,32800%	5,029849%	8,14714%
720- 780	4,95588%	0,01235%	1,26449%	6,468799%	9,08731%
660- 720	7,13069%	0,07753%	3,91960%	9,746878%	10,87310%
600- 660	11,41094%	0,21811%	7,51381%	17,915305%	13,51347%
540- 600	17,28092%	0,66797%	13,07950%	28,889606%	16,81723%
480- 540	25,73660%	1,52466%	20,48138%	44,402888%	22,81677%
420- 480	35,53149%	2,84186%	29,12577%	61,752172%	30,53239%
360- 420	45,30238%	4,56801%	39,39682%	74,917546%	42,14590%
300- 360	56,05972%	7,01454%	57,42609%	86,762055%	53,34206%
240- 300	68,02710%	16,43641%	81,90680%	95,513636%	67,18629%
180- 240	78,69835%	66,91971%	96,26243%	100,000000%	82,06473%
120- 180	88,58348%	100,00000%	100,00000%	-	96,46540%
60- 120	95,25783%	-	-	-	99,99429%
0- 60	100,00000%	-	-	-	100,00000%

O mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe com a classificação sugerida em Embrapa (1979) *apud* Cardoso et al. (2006) está apresentado na Figura 19. Nesta figura observa-se a distribuição espacial da declividade na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, com grande predominância de relevo plano e suavemente ondulado.



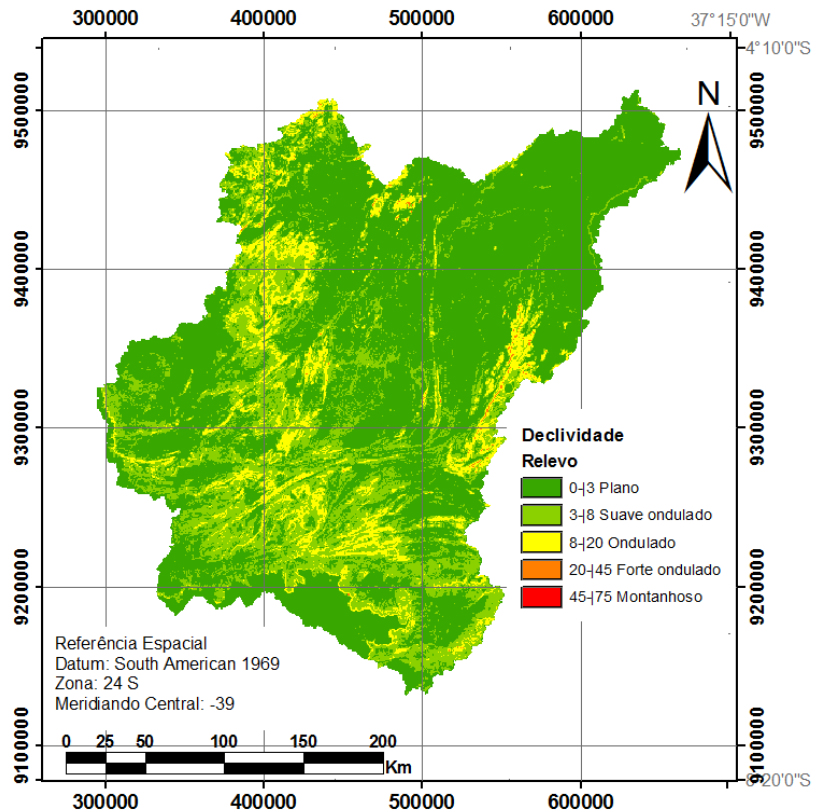


Figura 19 – Classificação do relevo conforme a declividade da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

Na Tabela 10, onde estão expostas as distribuições absoluta e percentual das declividades nas bacias hidrográficas dos principais açudes e do rio Jaguaribe, observa-se que 90,9% da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe possuem relevo plano ou suavemente ondulado, enquanto menos de 1,0% possui relevo de fortemente ondulado a montanhoso.

Observa-se ainda que, dentre as bacias hidrográficas dos reservatórios, a do Pedras Brancas é a que possui o relevo mais plano, com 81,8% de sua área, seguida pelas bacias do Castanhão (62,4%), do Banabuiú (58,0%) e do Orós(57,4%). A diferença diminui quando se considera o relevo de plano a suavemente ondulado, com a bacia hidrográfica do Pedras Brancas apresentando 91,2%; a do Banabuiú, 87%; a do Orós, 90,3 e a do Castanhão, 90,6. O relevo acidentado, variando de fortemente

ondulado a montanhoso ocorre em cerca de 2,1% da bacia hidrográfica do Pedras Brancas; 1,5% do Banabuiú; 1,1% do Castanhão e 0,6 do Orós.

Tabela 18 – Distribuição absoluta e percentual da declividade, segundo a classificação da Embrapa, nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Classe de Declividade	Valor	Bacia Hidrográfica				
		Jaguaribe	Pedras Brancas	Banabuiú	Orós	Castanhão
0- 3	Abs. (km <sup>2</sup> )	47252,1082	1625,7397	8256,4796	14290,6430	12487,8364
	Rel. (%)	64,67518	81,82508	57,95378	57,39086	62,41287
3- 8	Abs. (km <sup>2</sup> )	19115,5547	186,6312	4119,5896	8203,0887	5637,2864
	Rel. (%)	26,16395	9,39333	28,91617	32,94340	28,17456
8- 20	Abs. (km <sup>2</sup> )	5995,6691	133,3419	1648,9142	2260,2012	1662,4058
	Rel. (%)	8,20643	6,71123	11,57404	9,07691	8,30853
20- 45	Abs. (km <sup>2</sup> )	696,6211	40,4664	221,6552	146,6219	220,9019
	Rel. (%)	0,95348	2,03671	1,55584	0,58883	1,10404
45- 75	Abs. (km <sup>2</sup> )	0,6940	0,6687	0,0254	-	-
	Rel. (%)	0,00095	0,03365	0,00018	-	-

A declividade é um dos principais critérios a ser avaliados quando da classificação de terras para fins agrícolas, sobretudo quanto à possibilidade de erosão e uso de mecanização. A declividade observada na bacia hidrográfica dos quatro açudes

indica que poucas medidas ou pelo menos, medidas menos onerosas necessitam ser feitas para evitar a perda de solo ou possibilitar bom nível de mecanização agrícola.

Outro aspecto importante é quanto ao comportamento hidrológico, pois a declividade apresentada favorece o aumento do tempo de concentração devido à baixa velocidade de escoamento, em relação a áreas com declividades superiores. Ao avaliar as características morfométricas do padrão de drenagem e do relevo e suas relações com a distribuição do solo em interbacias hidrográficas (bacias de 2ª ordem) do Córrego Rico, Jaboticabal, SP, Pissara et al. (2004) observaram que na medida que o relevo passa de suave ondulado para ondulado, os valores médios da densidade de drenagem, frequência dos rios e razão de textura aumentam, refletindo maiores dificuldades para a infiltração.

## 4.2. Geoprocessamento das imagens de satélite e mapas

### 4.2.1. Classificação do mosaico e obtenção do uso e ocupação do solo

O resultado da classificação não supervisionada do mosaico de imagens Landsat utilizadas resultou em 20 classes as quais foram agrupadas em 5 classes de cobertura do solo, conforme apresentado na Figura 20. Na Tabela 19 estão as distribuições absoluta e percentual da cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão. Na Figura 21 é possível avaliar as diferenças entre as bacias hidrográficas pelo percentual de cobertura do solo em cada bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica do açude Pedras Brancas apresenta a maior cobertura por Vegetação densa, em termos percentuais, dentre as cinco bacias estudadas, sendo também a que apresenta menor percentual de Área antropizada e de Solo descoberto. Em contrapartida, a bacia hidrográfica do Orós é a que apresenta o menor percentual de vegetação (32%) e o maior percentual de Área antropizada (31,0%), ressaltando que Área antropizada inclui as que apresentam solos rasos com afloramento da rocha e sem cobertura vegetal ou cobertura vegetal muito esparsa. Este resultado está concordante com o mapa de solos no qual se observam solos litólicos predominantes ou em associação com outros tipos de solos na região em que a classificação da cobertura do solo resultou em Área antropizada.

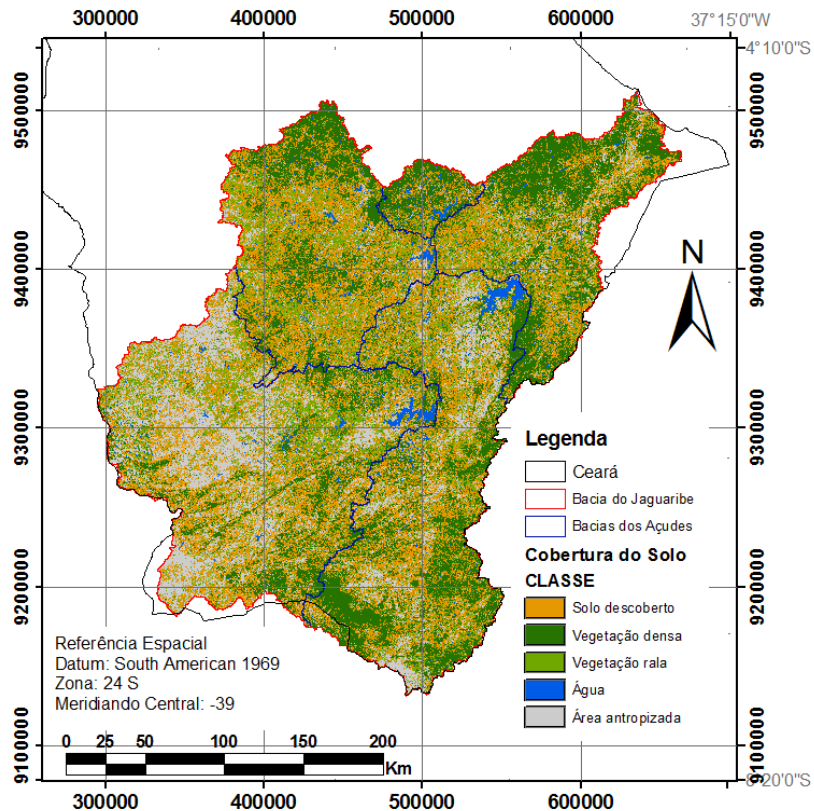


Figura 20 – Cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão, no Estado do Ceará.

Outro aspecto importante a ser observado é a data da passagem do satélite para obtenção das cenas utilizadas na classificação a qual variou de 14 a 26/07/2006, quando já passou o período chuvoso no Estado do Ceará que se estende de fevereiro a maio (CEARÁ, 2000). Assim, no período da passagem do satélite a vegetação caatinga predominante da bacia do Jaguaribe começa a perder a folhagem, como também as plantas cultivadas no período chuvoso já estão no fim da colheita. Espera-se que em cenas obtidas posteriormente ocorram maiores percentuais de solo descoberto e área antropizada e menores percentuais de vegetação densa e rala, enquanto, por outro lado, cenas obtidas anteriormente, no fim do período chuvoso, resultariam em maiores percentuais de vegetação densa e vegetação rala e menores de solo descoberto.

Na Tabela 20 está a matriz de confusão gerada para a avaliação da classificação. A exatidão global foi 62%, significando que este foi o percentual de

elementos da imagem classificada que estão de acordo com as amostras captadas nas imagens Google Earth.

Tabela 19 – Distribuição absoluta e percentual da cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Cobertura do solo	Valor	Bacia Hidrográfica				
		Jaguaribe	Pedras Brancas	Banabuiú	Orós	Castanhão
Água	Abs. (km <sup>2</sup> )	1819,81	140,03	439,20	550,66	534,72
	Rel. (%)	2,5	7,0	3,1	2,2	2,7
Área antropizada	Abs. (km <sup>2</sup> )	13214,77	60,05	1092,09	7725,82	3227,85
	Rel. (%)	18,1	3,0	7,7	31,0	16,1
Solo descoberto	Abs. (km <sup>2</sup> )	26067,76	556,00	5895,78	8639,28	7101,73
	Rel. (%)	35,7	28,0	41,4	34,7	35,5
Vegetação densa	Abs. (km <sup>2</sup> )	20432,36	1098,16	4156,40	3714,71	6259,52
	Rel. (%)	28,0	55,3	29,2	14,9	31,3
Vegetação rala	Abs. (km <sup>2</sup> )	11525,95	132,61	2663,20	4270,09	2884,62
	Rel. (%)	15,8	6,7	18,7	17,1	14,4

A exatidão específica (EE) diz respeito ao número de elementos classificados corretamente em cada classe específica. Na Tabela 20 pode-se ver que 8 elementos dos amostrados foram classificados como água e na imagem Google Earth são realmente água, portanto EE de 100%. Por outro lado, somente um elemento foi classificado como vegetação rala e, mesmo assim, nas imagens Google Earth, não se apresenta como vegetação rala, mas como área antropizada, resultando, portanto em EE igual a 0%. As demais EEs foram 71,4% vegetação densa, 50% para área antropizada e 45,5% para solo descoberto.

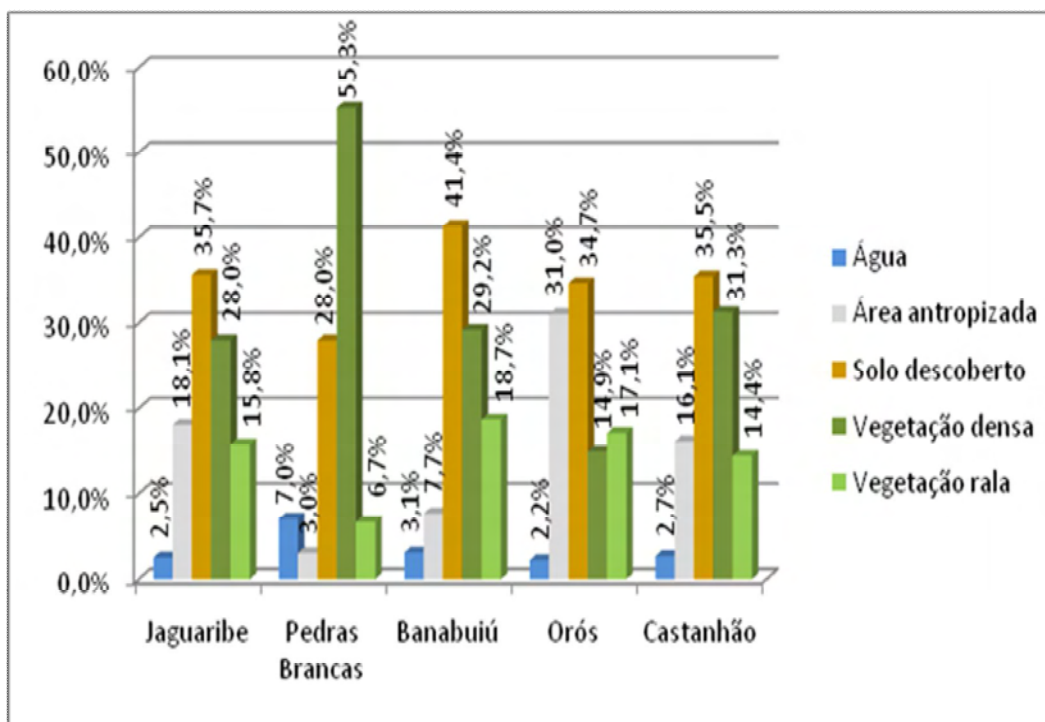


Figura 21 – Distribuição percentual da cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

O coeficiente Kappa (K) resultante (0,53) conceitua a classificação realizada como “Boa”. Este resultado permite a utilização da imagem no trabalho a ser desenvolvido, principalmente considerando-se que as datas das imagens Landsat e Google Earth não são as mesmas e que as classes obtidas cujas EEs foram maiores dizem respeito às classes que apresentam menos variação entre datas. Por exemplo, as amostras de água foram tiradas de açudes ou de corpos d’água que permanecem cobertos por água durante grande parte do ano. As áreas antropizadas foram amostradas principalmente em cidades que assim permanecem durante o ano todo. Por outro lado, as classes com menores EEs possuem grande variabilidade ao longo do ano. Por exemplo, dos 11 elementos da imagem classificados como “Solo descoberto”, 5 são, na realidade, “Vegetação rala”, portanto, perfeitamente possível em uma região de caatinga hiperxerófila, que uma região com vegetação rala, no período mais seco do ano ou em ano com precipitação abaixo da média possa aparecer como solo descoberto.

Tabela 20 – Matriz de confusão para avaliação da classificação não supervisionada, método Isodata, do mosaico de imagens Landsat abrangendo a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

		Verdade de campo					Total Linhas
		Água	Área antropizada	Solo descoberto	Vegetação densa	Vegetação rala	
Classificação	Água	8					8
	Área antropizada	1	8	4		3	16
	Solo descoberto		1	5		5	11
	Vegetação densa	1		1	10	2	14
	Vegetação rala		1				1
	Total Colunas	10	10	10	10	10	50

#### 4.2.3. Mapa de solos

O mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe está apresentado na Figura 22. A digitalização deste mapa permitiu estabelecer os tipos hidrológicos do solo, com base na textura apresentada no mesmo. A partir deste mapa foi elaborado o mapa de tipo do solo apresentado na próxima seção.

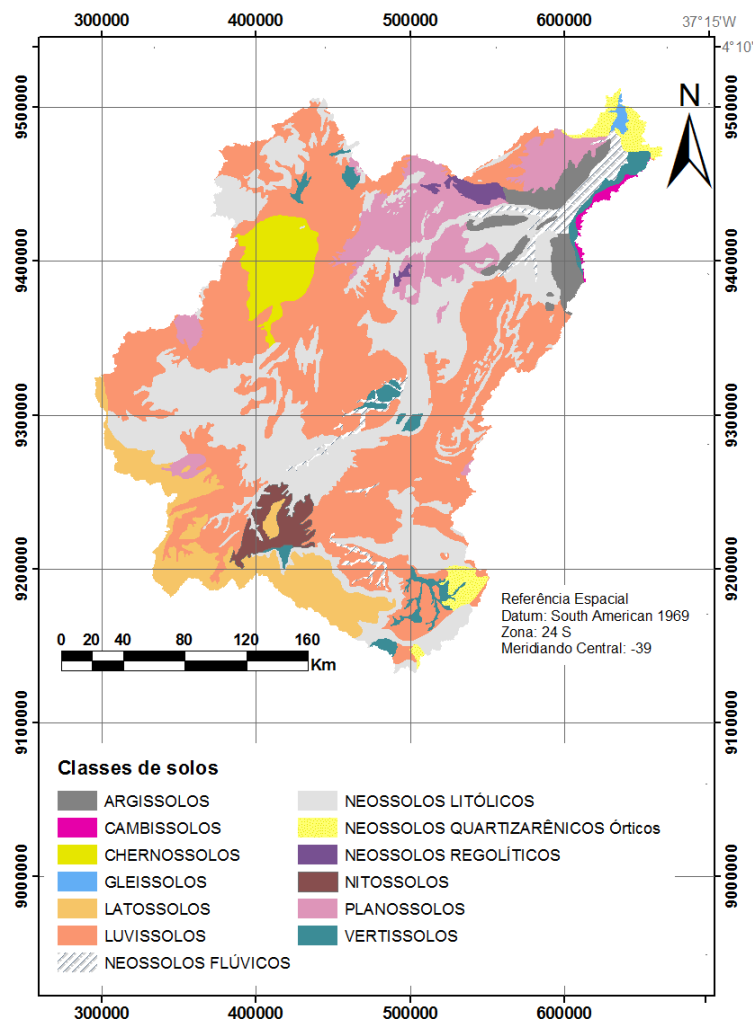


Figura 22 – Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

#### 4.2.4. Tipo de solo

Outra característica necessária para estabelecimento do valor de CN é o tipo de solo. As distribuições espaciais do tipo de solo na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e nas bacias hidrográficas dos quatro reservatórios estão expostas na Figura 23 e na Tabela 21 as distribuições absoluta e percentual para a bacia do rio Jaguaribe. Verifica-se, nestes resultados que prevalece o solo tipo D (43024,1 km<sup>2</sup>; 58,9%), de maior potencial para o escoamento superficial, na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. São solos classificados no mapa exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará (BRASIL, 1972), como de textura argilosa.



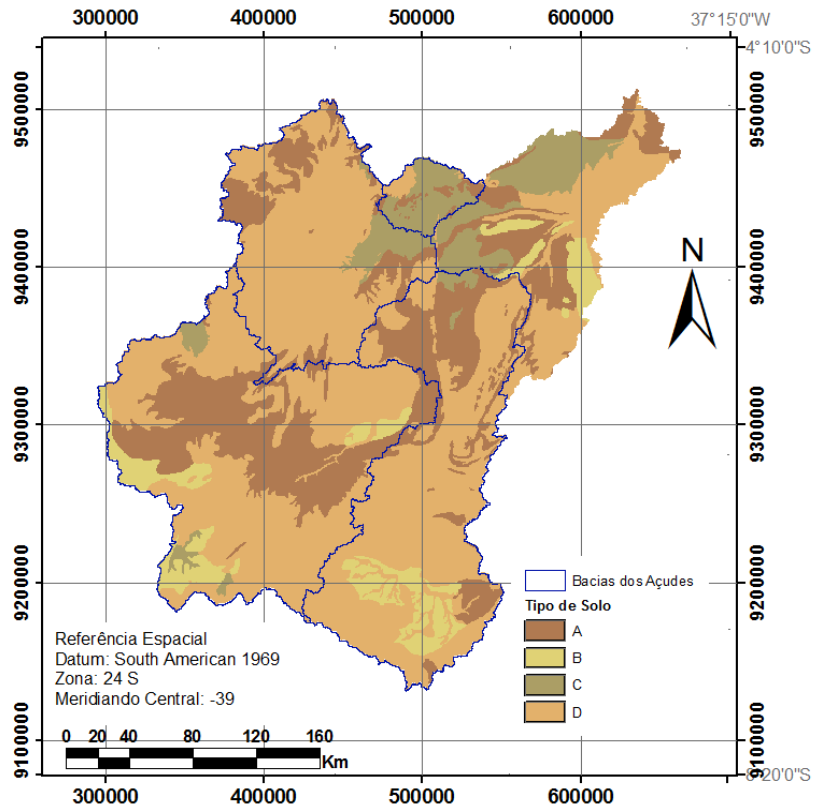


Figura 23 - Distribuição espacial do tipo de solo, segundo definição do Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (SCS-USDA), para determinação do valor CN.

Tabela 21 – Distribuição absoluta e percentual do tipo de solo nas bacias hidrográficas do rio Jaguaribe e dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Tipo do solo	Valor	Bacia Hidrográfica				
		Jaguaribe	Pedras Brancas	Banabuiú	Orós	Castanhão
A	Abs. (km <sup>2</sup> )	18641,4	297,5	2702,3	7975,7	4446,4
	Rel. (%)	25,5	15,0	19,0	32,0	22,2
B	Abs. (km <sup>2</sup> )	5061,9	0,0	0,0	2186,2	1722,5
	Rel. (%)	6,9	0,0	0,0	8,8	8,6
C	Abs. (km <sup>2</sup> )	6332,8	1395,1	1022,3	564,4	289,7
	Rel. (%)	8,7	70,2	7,2%	2,3	1,4
D	Abs. (km <sup>2</sup> )	43024,1	294,3	10522,1	14174,3	13549,8
	Rel. (%)	58,9	14,8	73,9%	56,9	67,7

#### 4.2.5. Mapa de vegetação

A vegetação da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, apresentada como em Figueiredo (1997), foi agrupada em unidades fitoecológicas. Na tabela 22 estão apresentadas as unidades e suas abrangências (área, em km<sup>2</sup>). O mapa de vegetação da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe está apresentado na Figura 24.

Tabela 22 – Unidades fitoecológicas (vegetação) na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e área de abrangência.

UNIDADE FITOECOLÓGICA	SIGLA	ÁREA (km <sup>2</sup> )
Caatinga arbustiva aberta	Caa	13420,2
Caatinga arbustiva densa	Cad	20476,5
Carrasco	Crr	2609,0
Cerradão	Cer	211,2
Complexo vegetacional da zona litorânea	Cvl	1057,3
Floresta caducifólia espinhosa (Caatinga arbórea)	Ca	25111,0
Floresta mista dicotilo-palmaceae (Mata ciliar com carnaúba)	Vc	2793,4
Floresta perenifólia paludosa marítima	M	29,3
Floresta subcaducifólia tropical pluvial (Mata seca)	Ms	5791,2
Floresta subcaducifólia tropical xeromorfa (Cerradão)	Cd	794,5
Floresta subperenifólia tropical pluvio-nebular (Mata úmida)	Mu	766,6

Todas as onze unidades fitoecológicas apresentadas para o Estado do Ceará em Figueiredo (1997) estão também presentes na bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe. As áreas de abrangência variam de 25111,0 km<sup>2</sup> para Caatinga arbórea a 29,3 km<sup>2</sup> de mangue (Floresta perenifólia paludosa marítima).

A vegetação nesta bacia hidrográfica tem importância hidrológica pelo predomínio da caatinga a qual abrange cerca de 80,8% dos 73060,3 km<sup>2</sup>. Esta vegetação é caducifólia e perde a folhagem no período de estiagem como forma de reduzir a evapotranspiração, condição esta que favorece o escoamento superficial principalmente nas primeiras chuvas quando é reduzida a interceptação e o impacto das gotas das chuvas causa o selamento superficial, dificultando a infiltração. Este fato é ainda agravado pela pouca espessura do solo que possui baixa capacidade de armazenamento.

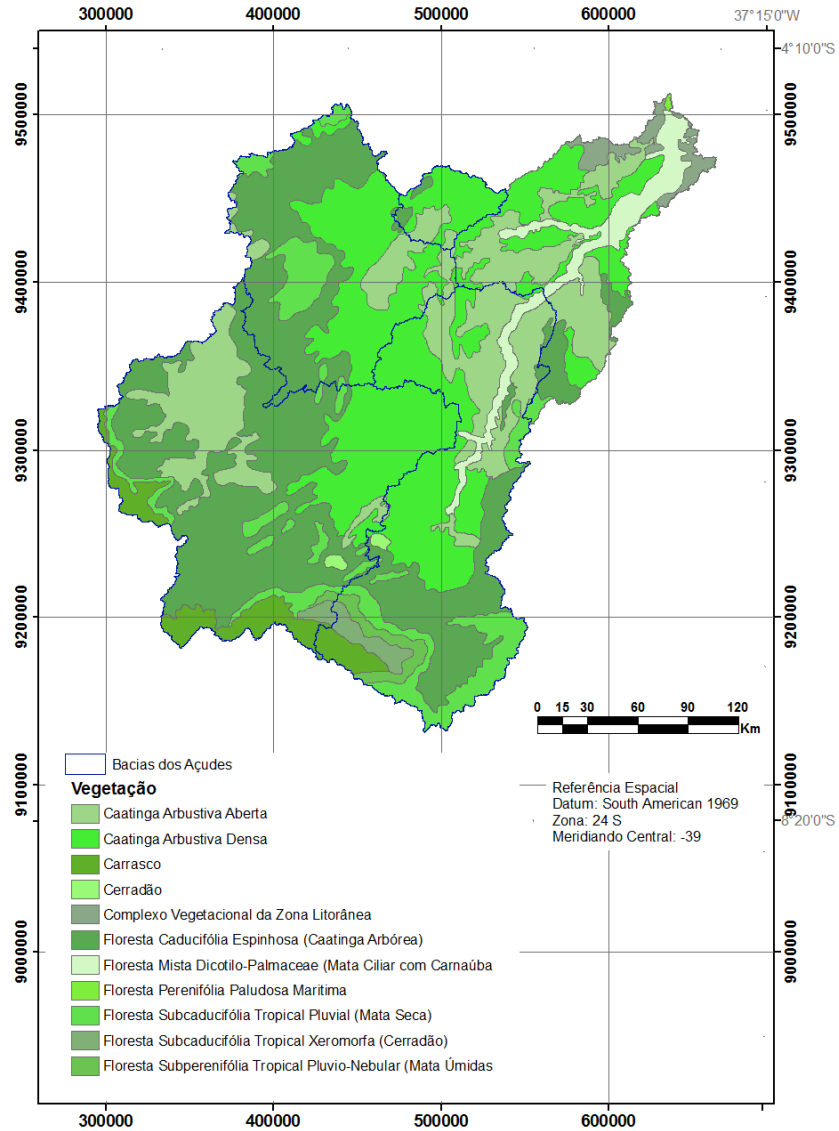


Figura 24 – Mapa de vegetação da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe (Adaptação do mapa de unidades fitoecológicas do Estado do Ceará, extraído de FIGUEIREDO, 1997).

Prevaecem, na bacia hidrográfica, a caatinga arbórea (Ca), abrangendo 34,4% da área, e a arbustiva densa (Cad), correspondendo a 28,0%. Se estivessem intactas corresponderiam a um percentual de 72,4% de vegetação densa. No entanto, após a classificação do mosaico de imagens esta classe correspondeu a somente 28% (Figura 21). Combinando-se a matriz dos dois mapas (vegetação e cobertura do solo) encontra-se que o maior percentual de cobertura do solo das duas unidades fitoecológicas corresponde a Solo descoberto (37,1% na Cad e 37,0% na Ca) e em

seguida a vegetação densa (31,2% na Cad e 25,6% na Ca). Ressaltando-se novamente que as imagens utilizadas foram obtidas em julho de 2006, época em que a vegetação local está começando a secar devido ao início do período seco e, portanto, ainda deveria haver forte cobertura do solo, como indica o grande percentual correspondente à cobertura vegetação densa nas duas unidades fitoecológicas, os resultados apresentados indicam forte pressão antrópica sobre áreas abrangidas por estas unidades fitoecológicas, principalmente com atividade agrícola, pois é bastante sugestivo que o percentual de solo descoberto seja devido às áreas agrícolas após a colheita da safra do período chuvoso (culturas de sequeiro).

#### 4.3. Distribuição espacial do Número da Curva

A distribuição espacial dos valores de  $CN$ , para a condição de umidade antecedente II (UA-II), está apresentada na Figura 25 e a discriminação das entradas em função da cobertura e do tipo do solo, com a área, em  $km^2$  e em percentual, na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, na Tabela 23. Quanto maiores os valores de  $CN$ , maior a capacidade da área de gerar escoamento superficial. O maior valor de  $CN$  encontrado foi 94 para solo descoberto com tipo de solo D (21,9%), seguido por vegetação densa com o mesmo tipo de solo (16,5%).

Nas condições em que o trabalho foi realizado, a bacia do rio Jaguaribe apresentou o maior percentual (16,5%) de solo descoberto do tipo D. Estas condições, vale sempre ressaltar, significam a data da obtenção da imagem digital Landsat e a atribuição do tipo de solo que, neste caso, considerou apenas a textura do solo fornecida pelo mapa de solos. Outros fatores devem ser considerados na determinação do tipo do solo como a profundidade do solo e a permeabilidade como apresentado em Tucci et al. (2004) e que neste trabalho não foi considerado devido a grande área da bacia hidrográfica e a falta de dados.

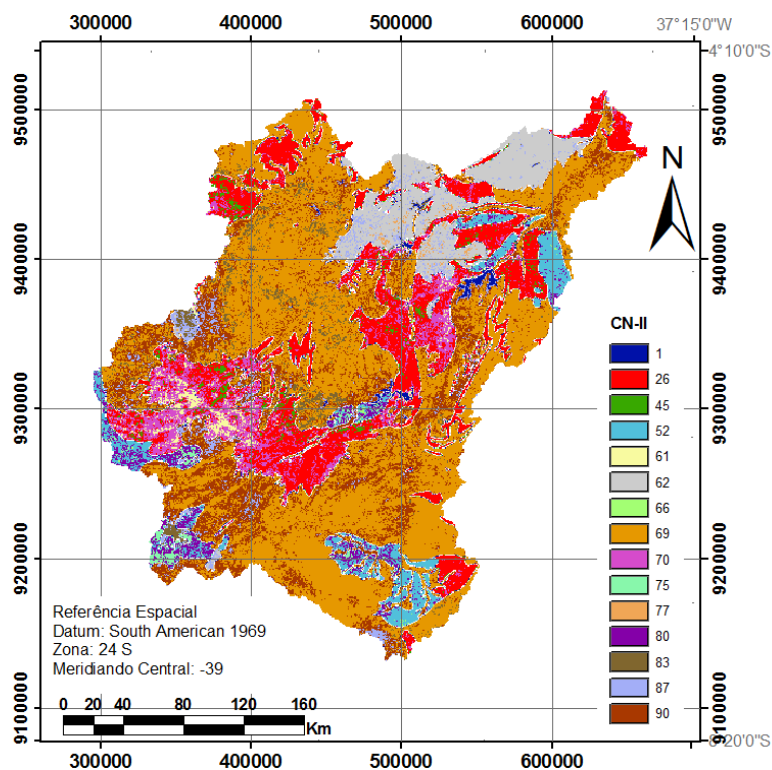


Figura 25 - Distribuição espacial do valor CN para condição de umidade antecedente II (UA-II).

Tabela 23 – Distribuição absoluta e percentual dos valores de *CN*, para condição de umidade antecedente II, na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

Cobertura do solo		Tipo de solo			
		A	B	C	D
Água	CN-II	1	1	1	1
	km <sup>2</sup>	567,5	54,9	209,6	987,8
	%	0,8	0,1	0,3	1,4
Área antropizada	CN-II	61	75	83	87
	km <sup>2</sup>	3811,8	1404,7	699,9	7297,5
	%	5,2	1,9	1,0	10,0
Solo descoberto	CN-II	70	80	87	90
	km <sup>2</sup>	6304,4	1726,6	2022,8	16011,8
	%	8,6	2,4	2,8	21,9
Vegetação densa	CN-II	26	52	62	69
	km <sup>2</sup>	4614,1	1197,9	2592,5	12022,5
	%	6,3	1,6	3,5	16,5
Vegetação rala	CN-II	45	66	77	83
	km <sup>2</sup>	3291,0	677,0	814,1	6743,4
	%	4,5	0,9	1,1	9,2

#### 4.4. Açudes

Segundo dados fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), atualmente são monitorados 49 açudes com vazão regularizada ( $Q_{90\text{reg}}$ ) entre  $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $30,21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , totalizando  $77,34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A capacidade de armazenamento destes açudes varia de  $2,72 \text{ hm}^3$  a  $6700,00 \text{ hm}^3$ , totalizando  $12.834,3 \text{ hm}^3$  (Tabela 24).

Tabela 24 – Açudes monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará.

Bacia Hidrográfica	Açudes	Cap. de arm. ( $\text{hm}^3$ )	Arm. máximo ( $\text{hm}^3$ )	Arm. mínimo ( $\text{hm}^3$ )	$Q_{90\text{reg}}$ ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	$Q_{90\text{reg}}$ máxima ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	$Q_{90\text{reg}}$ mínima ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )
Pedras Brancas	2	560,0	434,0	126,0	2,56	2,21	0,35
Banabuiú	11	2050,7	1601,0	7,7	17,49	11,61	0,05
Orós	16	2809,0	1940,0	3,4	21,66	15,77	0,01
Castanhão	15	7228,9	6700,0	2,7	34,26	30,21	0,03
jusante	5	185,6	86,1	10,4	1,37	0,66	0,05
Total	49	12834,3	6700,0	2,7	77,34	30,21	0,01

Legenda: Jusante – área da bacia do rio Jaguaribe a jusante dos reservatórios principais; Cap. – Capacidade; Arm. – Armazenamento;  $Q_{90\text{reg}}$  – Vazão regularizada com 90% de permanência.

Dentre as bacias hidrográficas dos principais açudes, a do Castanhão é a que possui a maior capacidade de armazenamento com  $7.228,9 \text{ hm}^3$  e também a maior vazão regularizada,  $34,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Vale ressaltar, no entanto, que a maior parte dessa vazão regularizada está disponível para fora desta bacia já que  $30,21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  é a vazão regularizada do próprio açude Castanhão que é usada na região hidrográfica do Baixo Jaguaribe e Região Metropolitana de Fortaleza, no caso de escassez. Na Figura 26 está a distribuição espacial dos reservatórios da bacia do Jaguaribe com vazão regularizada maior ou igual a  $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

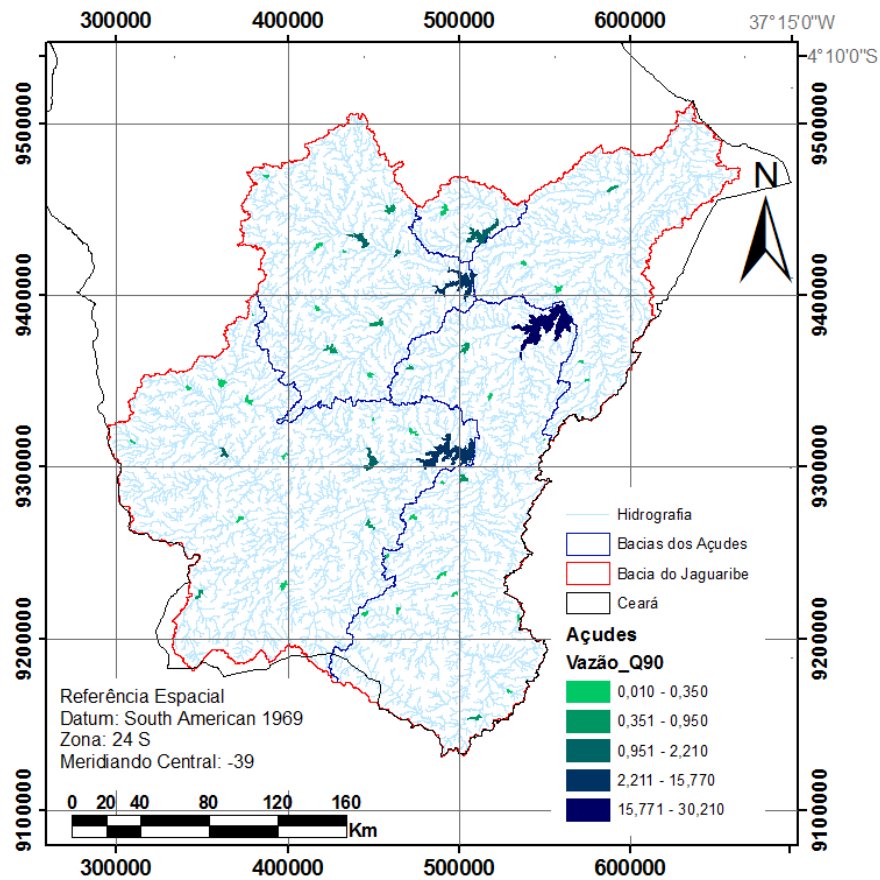


Figura 26 – Mapa de açudes com vazão regularizada  $Q_{90reg}$  maior ou igual a  $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

#### 4.5. Plataforma de coleta de dados climatológicos e estações pluviométricas.

Nas Figura 27 e 28 estão apresentadas, respectivamente, as distribuições espaciais das plataformas de coleta de dados climatológicos (PCDs) e dos postos pluviométricos (PPs) no Estado do Ceará e as áreas de influência sobre a bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe determinadas pelo método de polígono de Thiessen.

Foram identificados tanto os Postos quanto as PCDs com dados completos para o ano de 2005. Por meio da área de influência dos PPs, obtiveram-se a precipitação média sobre o reservatório, para cálculo do volume precipitado, e a precipitação diária, para o cálculo da umidade antecedente nos cinco dias anteriores e do escoamento

superficial. A partir dos dados das PCDs foi possível obter a evaporação média diária no reservatório para o cálculo do volume evaporado.

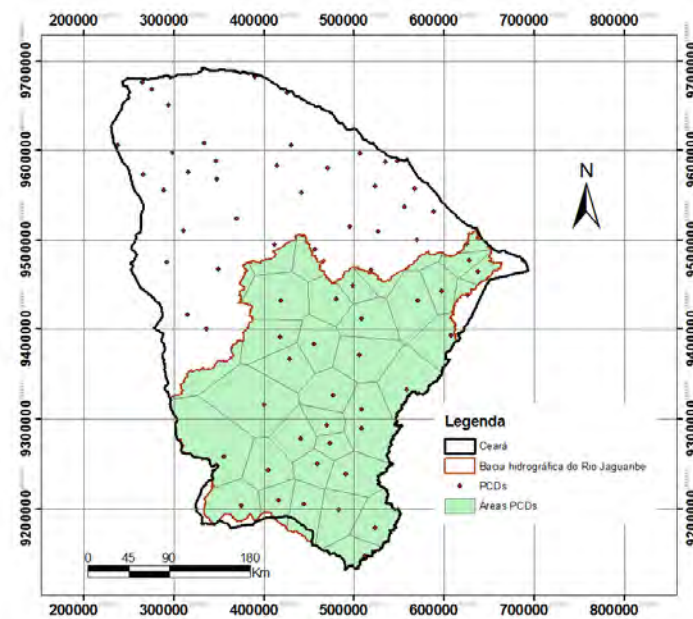


Figura 27 – Distribuição espacial das plataformas de coleta de dados monitoradas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) e área de influência sobre a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

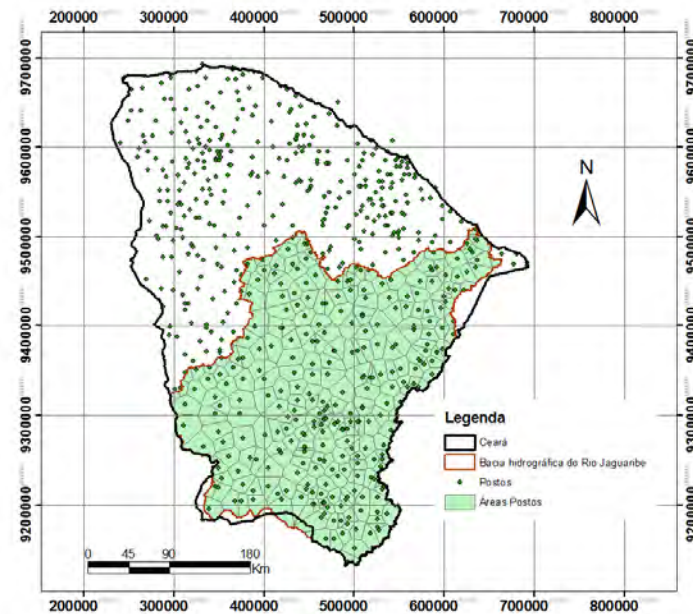


Figura 28 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos monitorados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) e área de influência sobre a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.



#### 4.6. Balanço Hídrico nos reservatórios

Após elaborada a base de dados georreferenciados obtiveram-se os dados de entrada para o modelo hidrológico. Por exemplo, os mapas de distribuição espacial das PCDs e dos PPs (Figuras 27 e 28) foram utilizados para obtenção dos volumes evaporados e precipitados nos reservatórios, respectivamente. Os PPs foram ainda utilizados como entrada para se gerar o escoamento superficial. O mapa de solos, por meio das informações de textura, foi utilizado para definição do tipo do solo, necessário para o módulo escoamento superficial, assim como o mosaico de imagens, para obtenção da cobertura do solo.

##### 4.6.1 Estimativa da evaporação em superfícies líquidas.

As plataformas de coleta de dados (PCDs) que apresentaram dados completos para o ano de 2005 foram utilizadas para a estimativa da evaporação e área de influência sobre a bacia hidráulica dos reservatórios. Estas áreas foram determinadas por meio do SIG e estão apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25. Localização geográfica das Plataformas de Coleta de Dados (PCD) com dados para o ano de 2005 e área de influência absoluta e relativa sobre a bacia hidráulica dos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

PCD	Latitude	Longitude	Leste	Norte	Área (ha)	%
Açude Pedras Brancas						
Quixadá	04° 59' 18,5"	39° 00' 40,2"	498737	9448623	2381,9	100,0
Açude Banabuiú						
Quixadá	04° 59' 18,5"	39° 00' 40,2"	498737	9448623	6195,3	100,0
Açude Orós						
Icó	06° 25' 38,4"	38° 55' 21,8"	508539	9289565	7818,6	69,3
Iguatu	06° 23' 45,5"	39° 16' 16,5"	469987	9293028	3458,9	30,7
Açude Castanhão						
Icó	06° 25' 38,4"	38° 55' 21,8"	508539	9289565	306,7	0,8
Quixadá	04° 59' 18,5"	39° 00' 40,2"	498737	9448623	901,2	2,5
Tabuleiro do Norte	05° 29' 25,5"	38° 01' 28,6"	608035	9393050	35008,5	96,7

O modelo desenvolvido foi aplicado nas bacias hidrográficas do Pedras Brancas e do Banabuiú. Estes açudes estão relativamente próximos e sofrem influência

apenas da PCD Quixadá, de acordo com a técnica do polígono de Thiessen executada para as PCDs com dados completos para o ano de 2005 (Figura 29).

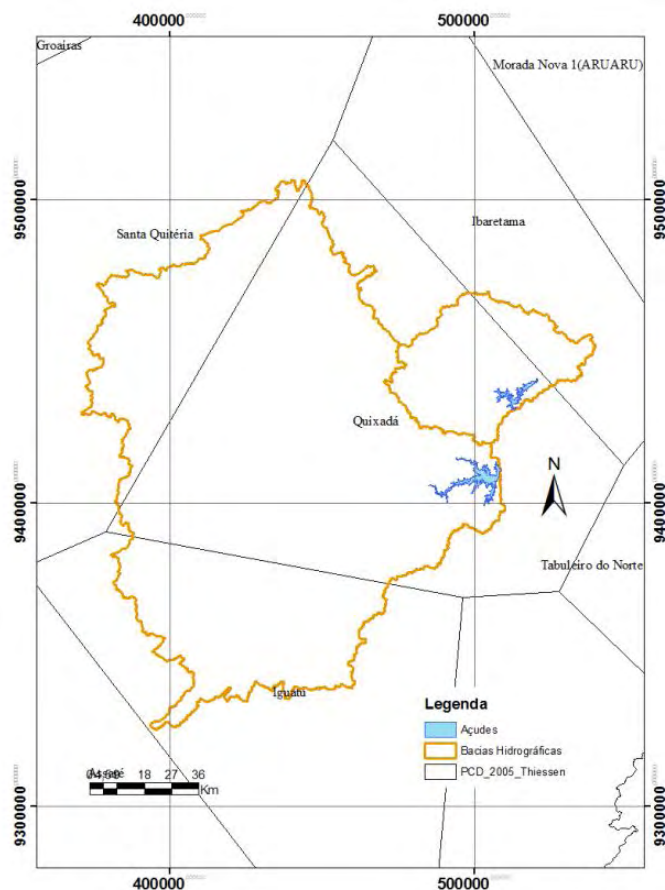


Figura 29 – Plataforma de Coleta de Dados com influência sobre os reservatórios Banabuiú e Pedras Brancas.

Nas Figura 30 e 31 estão as variações diárias da evaporação nos reservatórios Pedras Brancas e Banabuiú, no ano 2005, segundo os métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruin-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S), deBruim (dB) e a precipitação média na bacia hidrográfica dos reservatórios citados.

Observam-se comportamentos semelhantes da evaporação estimada pelos diferentes métodos sobre os reservatórios. Visualmente percebe-se que o método dB subestima a evaporação no período chuvoso e superestima fora dele, em comparação aos demais métodos. No período seco, a estimativa da evaporação é maior em dB, seguido de P, dB-K e P-T, e K-N-F e B-S. No período chuvoso a estimativa da evaporação é mais baixa por K-N-F e dB e mais alta em P-T, P, dB-K e B-S.

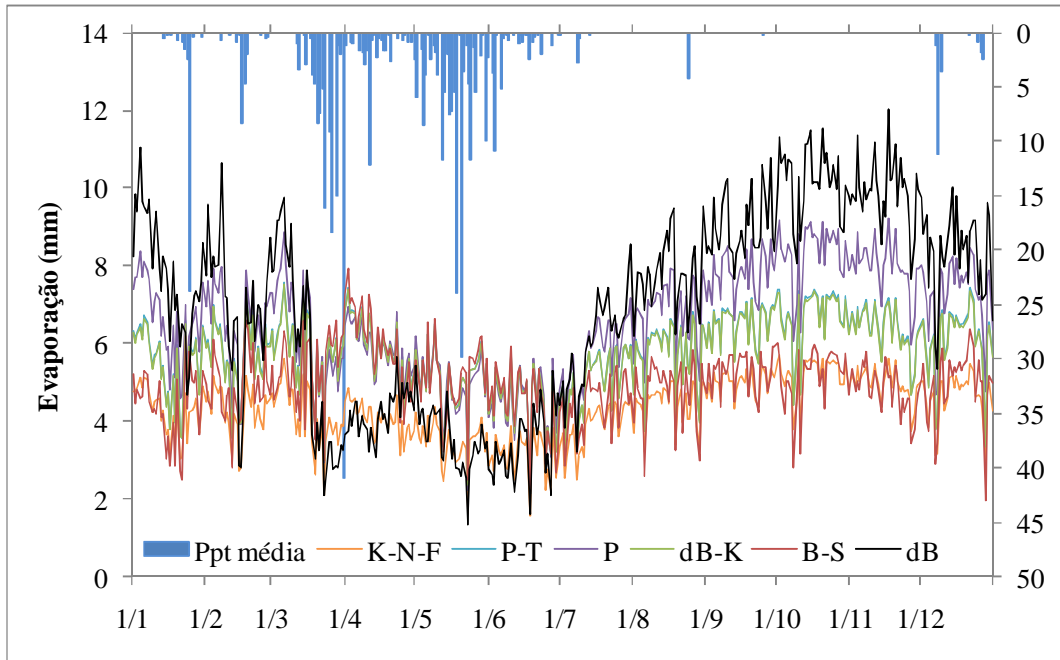


Figura 30 – Evaporação no reservatório Pedras Brancas, ao longo do ano de 2005, estimada pelos métodos Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruin-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S), deBruim (dB) e precipitação média na bacia hidrográfica do reservatório (Ppt média).

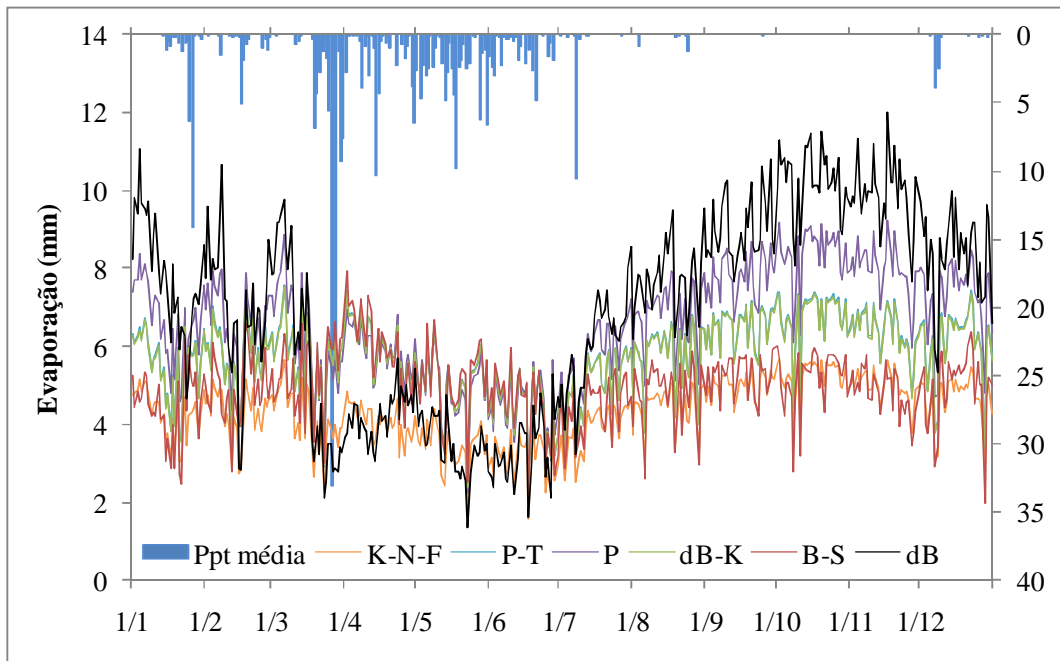


Figura 31 - Evaporação no reservatório Banabuiú, ao longo do ano de 2005, estimada pelos métodos Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruin-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S), deBruim (dB) e precipitação média na bacia hidrográfica do reservatório (Ppt média).

Dos seis métodos de estimativa da evaporação mencionados, apenas o método K-N-F não foi avaliado por Rosenberry et al. (2007) em uma região montanhosa no nordeste dos Estados Unidos, comparando-os ao método do balanço de energia, segundo os autores, considerado padrão. Os métodos P-T, dB-K e P apresentaram valores que não se afastaram em mais de 20% do método padrão durante 90% do período estudado, mostrando-se os mais adequados. Ao analisar a Figura 31, observa-se que para os reservatórios estudados, estes métodos também apresentam resultados semelhantes entre si, principalmente P-T e dB-K cujas curvas se sobrepõem ao longo do ano de 2005, com o método de P discordando destes no período de estiagem.

Leitão et al (2007) estudaram o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação nas regiões do Cariri e Sertão, no Estado da Paraíba, incluindo os métodos P e K-N-F. Os resultados, da mesma forma que no presente trabalho, apresentaram no período de evaporação mais elevada a estimativa da evaporação por P maior do que a estimativa por K-N-F.

Leão et al (2009) analisaram o comportamento da evaporação estimada no açude Pedras Brancas pelos métodos mencionados e com variação em 1% para cima ou para baixo nos valores dos parâmetros climatológicos (temperaturas máxima e mínima, umidade relativa máxima e mínima, velocidade média do vento e radiação solar) medidos pelas estações automáticas. Os autores constataram maior sensibilidade do método de Bruin ao acréscimo ou decréscimo em 1% de quaisquer parâmetros, a exceção da  $R_s$ , para o qual se apresentou o segundo mais sensível. Este resultado é concordante com o comportamento apresentado na Figura 31 pelo método dB, pois este método apresentou maior amplitude da estimativa da evaporação nos reservatórios ao longo do ano do que os demais métodos.

Os valores de evaporação total estimada pelos seis métodos em estudo, no ano de 2005, nos dois reservatórios estão apresentados na Tabela 28. Observa-se que o método dB estimou as maiores perdas por evaporação em relação aos demais métodos para ambos os reservatórios. As menores perdas por evaporação foram estimadas no método K-N-F para os dois reservatórios.

Tabela 28. Lâmina evaporada e volume evaporado nos reservatórios Pedras Brancas e Banabuiú, segundo os métodos de estimativa da evaporação, no ano de 2005

Reservatórios	Método de estimativa					
	K-N-F	P-T	P	dB-K	B-S	dB
Lâmina evaporada (mm)						
Pedras Brancas	1.570,45	2.106,35	2.395,40	2.091,69	1.817,30	2.522,28
Banabuiú	1.570,45	2.106,35	2.395,40	2.091,69	1.817,30	2.522,28
Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )						
Pedras Brancas	43,74	58,77	66,58	58,36	50,95	69,56
Banabuiú	154,87	208,05	235,77	206,62	180,33	246,45

Legenda: K-N-F - Kohler-Nordenson-Fox, P-T - Priestley-Taylor, P - Penman, dB-K - deBruin-Keijman, B-S - Brutsaert-Stricker, dB - deBruim

Pereira (2004) encontrou 1.904 mm de lâmina anual evaporada no lago Sobradinho, estimada pelo método K-N-F, sendo, portanto, em torno de 21% acima da estimativa da evaporação pelo mesmo método para os açudes Pedras Brancas e Banabuiú; 19,5% acima da evaporação no açude Orós e 16% acima da estimada no açude Castanhão, sugerindo diminuição das diferenças com o aumento da área da superfície líquida.

Leitão et al (2007) observaram que os métodos P e K-N-F apresentaram desempenhos classificados como “Bom” e “Sofrível” nas regiões do Cariri e Sertão, respectivamente, e foram os métodos que apresentaram os piores desempenhos na estimativa da evaporação, quando os resultados foram comparados com a evaporação observada no tanque padrão de 20 m<sup>2</sup>.

Realizou-se o balanço hídrico nos reservatórios Pedras Brancas e Banabuiú, com o modelo desenvolvido, utilizando-se os seis métodos de estimativa da evaporação. Os resultados estão expostos nas Figuras 32 e 33.

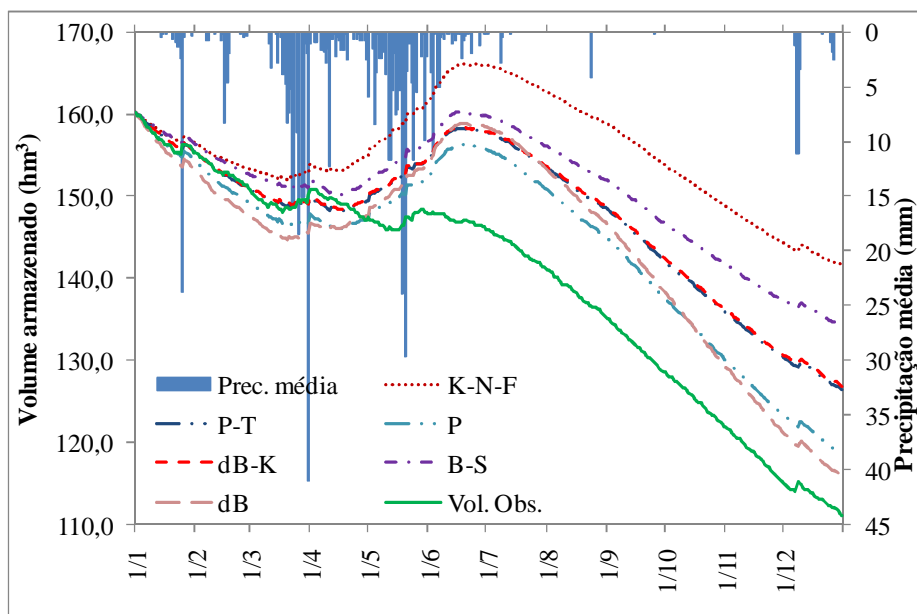


Figura 32 – Precipitação pluvial média na bacia hidrográfica do açude Pedras Brancas, no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), no referido açude, no ano de 2005.

Pode-se ver que ocorre uma superestimativa acentuada do volume armazenado no reservatório pelo modelo hidrológico, após o início do período chuvoso, qualquer que seja o método de estimativa da evaporação, no açude Pedras Brancas. O balanço hídrico realizado com o método K-N-F para a estimativa do volume evaporado foi o que apresentou a maior superestimativa do volume armazenado ( $30,32 \text{ hm}^3$ ), no final de 2005, seguido pelos realizados com os métodos B-S ( $23,13 \text{ hm}^3$ ), dB-K ( $15,73 \text{ hm}^3$ ), P-T ( $15,33 \text{ hm}^3$ ), P ( $7,53 \text{ hm}^3$ ) e, por último, dB ( $4,55$ ).

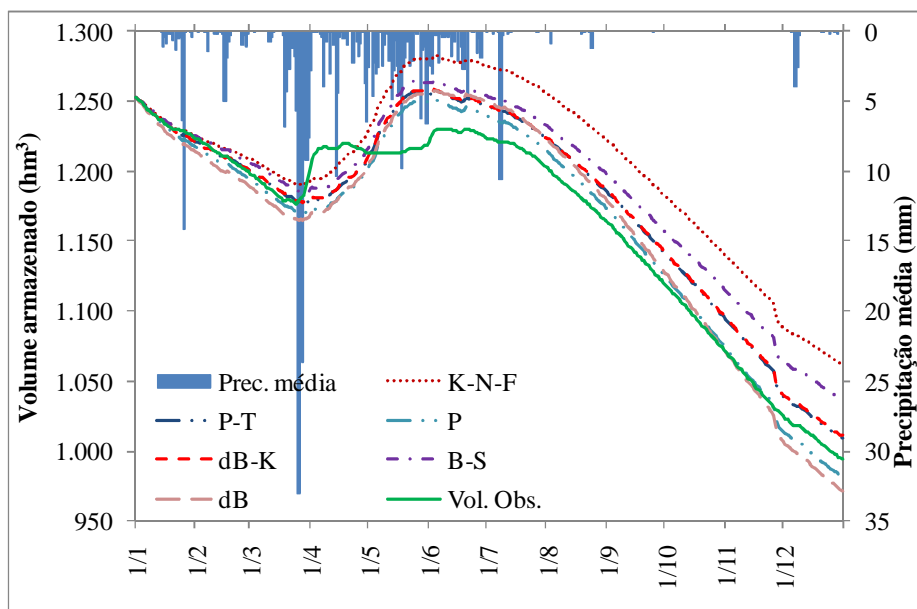


Figura 33 – Precipitação pluvial média na bacia hidrográfica do açude Banabuiú, no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), no referido açude, no ano de 2005.

Para o açude Banabuiú, o mesmo comportamento apresentado no açude Pedras Brancas: superestimativa do balanço hídrico realizado pelo modelo desenvolvido a partir do início do período chuvoso para qualquer um dos métodos. No entanto, ao final no ano de 2005, dois métodos de estimativa da evaporação proporcionaram volume armazenado estimado abaixo do observado, sendo a maior subestimativa devido ao método dB (23,21 hm<sup>3</sup>) e a menor devido a P (12,54 hm<sup>3</sup>). As superestimativas no final de 2005 se devem, em ordem decrescente, à estimativa da evaporação por K-N-F (68,18 hm<sup>3</sup>), B-S (42,78 hm<sup>3</sup>), dB-K (16,54 hm<sup>3</sup>) e P-T (15,12 hm<sup>3</sup>).

Embora a maior diferença absoluta (ocorrida com o uso do método K-N-F) entre o volume estimado no final de 2005, no açude Banabuiú, tenha sido um pouco acima do dobro da verificada no açude Pedras Brancas, em termos relativos à capacidade total dos reservatórios (Tabela 1), no ano de 2005, a superestimativa para o açude Pedras Brancas foi maior do que para o açude Banabuiú, sendo, respectivamente 7,0 e 4,0 %.

Um período chuvoso bem definido nas bacias hidrográficas dos dois açudes, entre os dias 15/03 e 15/06, fica evidente nas Figuras 32 e 33. Nas Figuras 34 a 36

pode-se ver o comportamento do modelo hidrológico, para os dois açudes, em três momentos distintos: antes do período chuvoso (01/01 a 15/05), durante o período chuvoso (16/03 a 15/06) e após o período chuvoso (16/06 a 31/12).

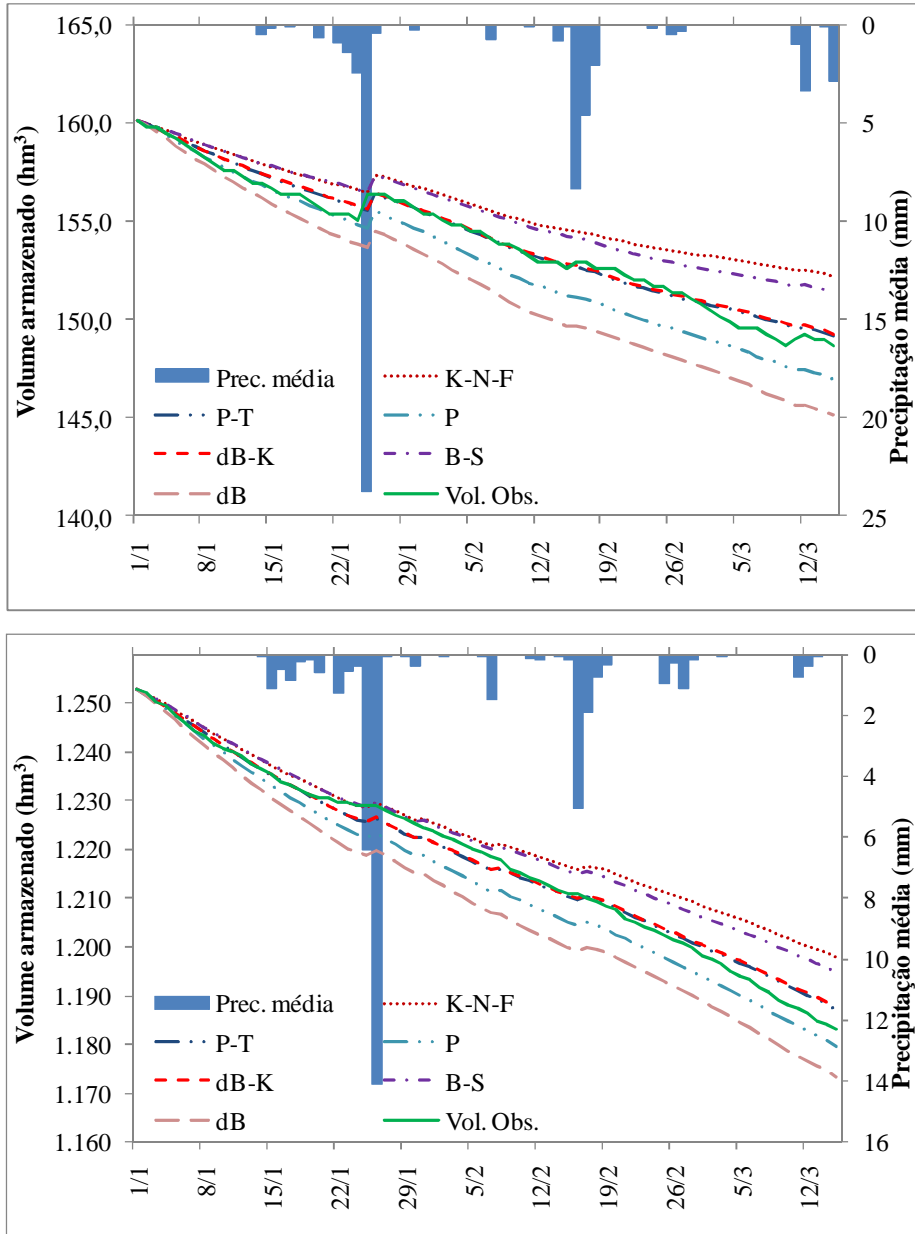


Figura 34 – Precipitação pluvial média nas bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas (A) e Banabuiú (B), no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), nos referidos açudes, no período de 01/01 a 15/03/2005.



Nestas figuras (34 a 36), o início da simulação do balanço hídrico ocorre no primeiro dia do período ao qual se referem.

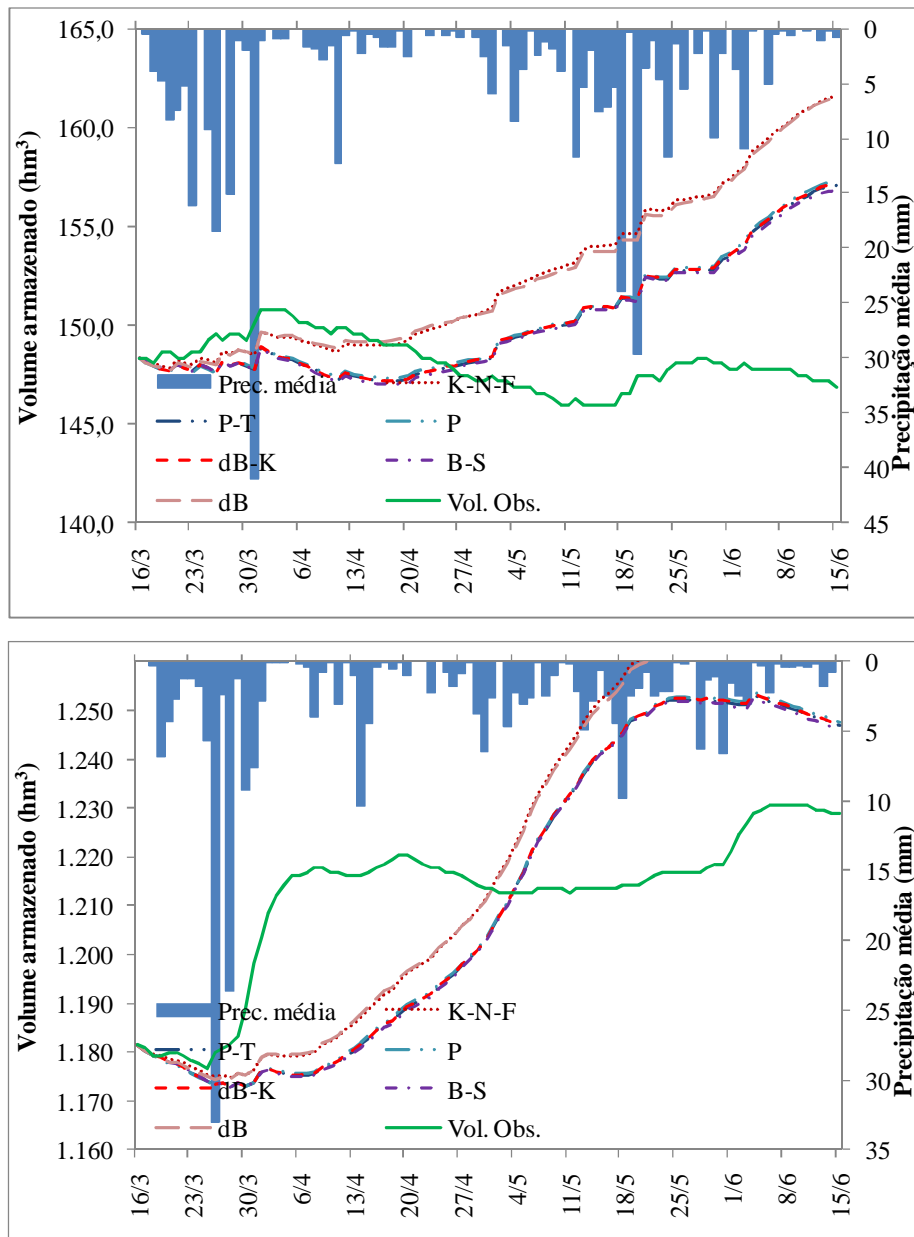


Figura 35 – Precipitação pluvial média nas bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas (A) e Banabuiú (B), no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), nos referidos açudes, no período de 16/03 a 15/06/2005.

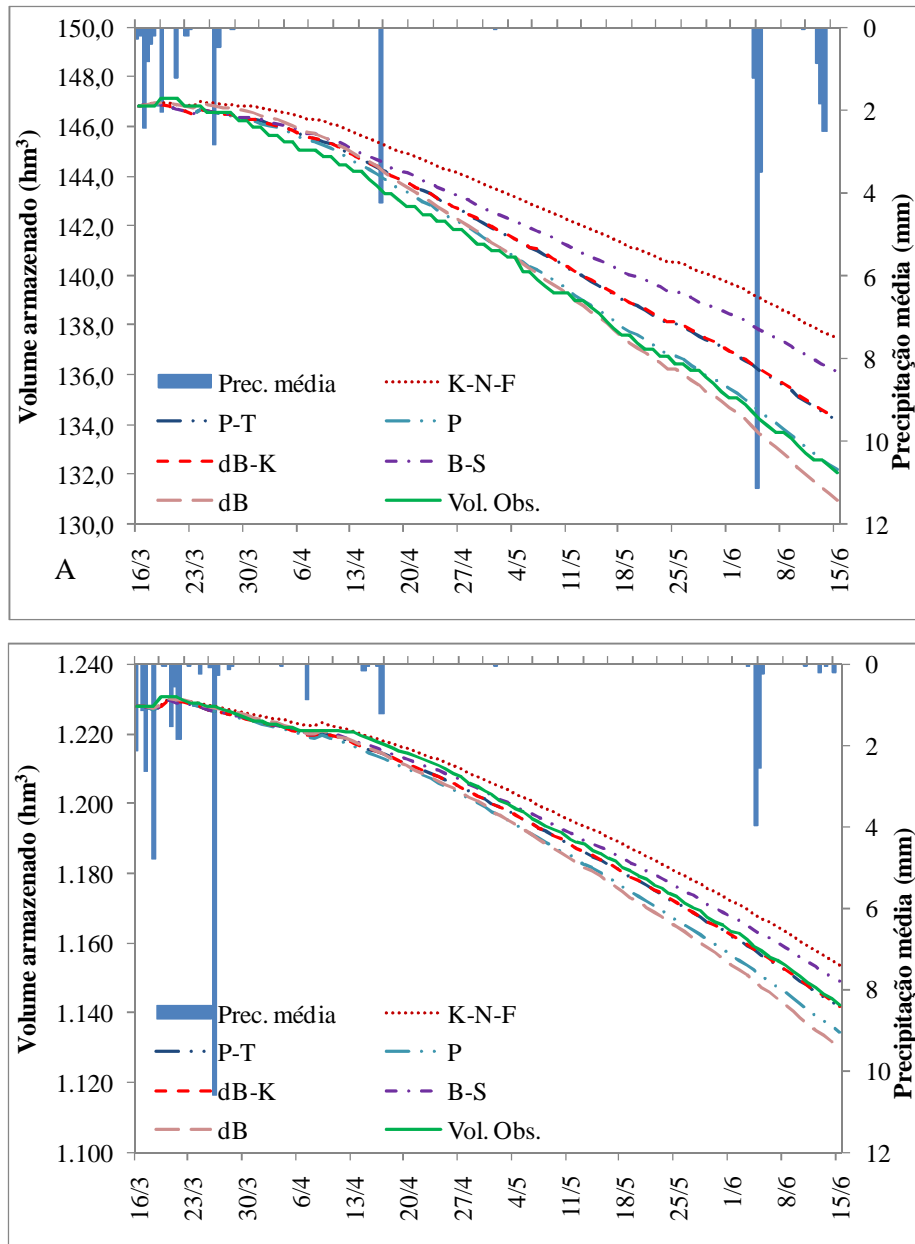


Figura 36 – Precipitação pluvial média nas bacias hidrográficas dos açudes Pedras Brancas (A) e Banabuiú (B), no Estado do Ceará, e volumes armazenados observados (Vol. Obs.) e estimados pelo modelo hidrológico desenvolvido, com a estimativa da evaporação calculada pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB), nos referidos açudes, no período de 16/06 a 31/12/2005.

A mesma tendência durante os dois períodos secos pode ser constatada, nas Figuras 34 e 36, para os volumes armazenados e estimados, com algumas diferenças devido ao método utilizado na estimativa da evaporação. Esta diferença está

quantificada na Tabela 29. Durante o período chuvoso (Figura 35), o modelo hidrológico estimou resultados bastante distintos dos observados, para os dois açudes.

Tabela 29. Índices para quantificar o desempenho do modelo hidrológico desenvolvido no balanço hídrico dos reservatórios Pedras Brancas e Banabuiú, com o volume evaporado estimado pelos métodos de estimativa da evaporação de Kohler-Nordenson-Fox (K-N-F), Priestley-Taylor (P-T), Penman (P), deBruim-Keijman (dB-K), Brutsaert-Stricker (B-S) e deBruim (dB).

	Açude Pedras Brancas						Açude Banabuiú					
	Primeiro período (01/01 a 15/03/2005)											
	K-N-F	P-T	P	dB-K	B-S	dB	K-N-F	P-T	P	dB-K	B-S	dB
r	0,9906	0,9925	0,9925	0,9924	0,9920	0,9915	0,9936	0,9959	0,9959	0,9959	0,9960	0,9944
Id	0,8845	0,9954	0,9682	0,9946	0,9298	0,8981	0,9587	0,9970	0,9866	0,9967	0,9751	0,9557
c	0,8762	0,9879	0,9610	0,9871	0,9223	0,8904	0,9526	0,9929	0,9826	0,9926	0,9712	0,9503
NS	0,6275	0,9818	0,8457	0,9790	0,7582	0,3960	0,8666	0,9887	0,9433	0,9876	0,9154	0,7895
Segundo período (16/03 a 15/06/2005)												
K-N-F	P-T	P	dB-K	B-S	dB	K-N-F	P-T	P	dB-K	B-S	dB	
r	-0,5323	-0,4642	-0,4626	-0,4666	-0,4657	-0,5166	0,6350	0,6048	0,6093	0,6053	0,6002	0,6423
Id	0,0331	0,0120	0,0126	0,0119	0,0119	0,0368	0,6530	0,6865	0,6879	0,6862	0,6849	0,6595
c	-0,0176	-0,0056	-0,0058	-0,0056	-0,0055	-0,0190	0,4146	0,4152	0,4192	0,4153	0,4111	0,4236
NS	-26,0021	-10,1181	-10,5457	-10,3024	-9,7090	-25,1461	-2,8761	-1,7882	-1,7955	-1,7999	-1,7825	-2,7563
Terceiro período (16/06 a 31/12/2005)												
K-N-F	P-T	P	dB-K	B-S	dB	K-N-F	P-T	P	dB-K	B-S	dB	
r	0,9978	0,9997	0,9989	0,9997	0,9989	0,9973	0,9990	0,9993	0,9994	0,9993	0,9992	0,9993
Id	0,9438	0,9947	0,9991	0,9942	0,9645	0,9903	0,9962	0,9997	0,9965	0,9998	0,9982	0,9909
c	0,9417	0,9944	0,9980	0,9939	0,9634	0,9876	0,9952	0,9990	0,9959	0,9991	0,9974	0,9902
NS	0,8511	0,9816	0,9962	0,9799	0,8988	0,9524	0,9863	0,9988	0,9844	0,9990	0,9934	0,9556

Legenda: r = coeficiente de correlação; id = índice de concordância de Willmot; c = índice de confiança ou desempenho; NS = coeficiente de eficiência de Nash e Stuchliffe.

Pelo coeficiente de correlação observa-se forte correlação positiva ( $r > 0,99$ ) entre os dados estimados e observados no primeiro e no terceiro período, em ambos os reservatórios, para a utilização de qualquer dos métodos de estimativa da evaporação. Com relação ao período chuvoso (segundo período), observa-se uma correlação mediana entre os dados observados, com r variando entre 0,40 e 0,65 para os dois reservatórios, sendo positiva no Banabuiú e negativa no Pedras Brancas.

Os resultados do índice de concordância de Willmott (Id) para os dois reservatórios indicam maior afastamento dos dados estimados em relação aos observados no período chuvoso, quando comparados aos resultados nos dois períodos de estiagem. Vê-se ainda que em todos os períodos este afastamento foi maior no caso do açude Pedras Brancas.

O produto dos resultados apresentados pelo coeficiente de correlação e pelo índice de concordância de Willmott indicam o desempenho do modelo que foi sempre melhor, mesmo que ligeiramente, na simulação do balanço hídrico no açude Banabuiú do que no Pedras Brancas, inclusive no período chuvoso, quando para ambos o desempenho foi muito aquém do obtido no período seco. No período seco, em ambos os reservatórios e com qualquer dos métodos de estimativa da evaporação, o modelo hidrológico apresentou ótimo desempenho. No entanto, no período chuvoso, para o açude Pedras Brancas, ocorreu um péssimo desempenho e para o Banabuiú os resultados ficaram na faixa que classificam o desempenho do modelo como mau.

Com relação ao coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) o modelo hidrológico apresentou de aceitável a boa eficiência no primeiro período para o açude Pedras Brancas e boa eficiência para o Pedras Brancas no terceiro período e para o Banabuiú no primeiro e no terceiro períodos. No segundo período, a eficiência do modelo hidrológico desenvolvido foi inaceitável para ambos os reservatórios. Também o índice NS apresentou resultados superiores para o desempenho do modelo no açude Banabuiú em relação ao Pedras Brancas.

Os resultados apresentados sugerem que o modelo desenvolvido não está atendendo o objetivo de estimativa do volume afluente dos reservatórios, uma vez que este é o componente do balanço hídrico de maior peso no período chuvoso. Em ambos os reservatórios este componente está sendo superestimado e em maior proporção no açude Pedras Brancas.

Com relação ao método de estimativa da evaporação utilizado, considerando-se os dois períodos secos, quando o principal componente do balanço hídrico é o volume evaporado diretamente dos reservatórios, observa-se na Tabela 29 que o de Priestley-Taylor foi o que proporcionou o melhor desempenho do modelo. Este fato pode ser constatado visualmente nas Figuras 34 e 36.

A aumento do volume nos dois reservatórios logo após o início do período chuvoso e o decréscimo do mesmo ao fim deste período, como podem ser observados nas figuras 32, 33 e 35 indicam que o método de Muskingum-Cunge implementado no

modelo hidrológico para deslocamento do escoamento superficial em canais naturais proporciona resposta coerente dos reservatórios às precipitações. No entanto, a superestimativa do volume indica que o método do Número da Curva, com a metodologia empregada, provavelmente está superestimando o escoamento superficial nas bacias hidrográficas dos reservatórios.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados observados permitem concluir o seguinte:

- Com a metodologia adotada o método do Número da Curva superestima o volume escoado nas bacias hidrográficas dos reservatórios Pedras Brancas e Banabuiú.
- A melhor estimativa da evaporação nos reservatórios da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe é obtida com o uso do método de Priestley-Taylor.
- Embora o modelo hidrológico desenvolvido tenha apresentado ótimos desempenhos no período seco, o fraco desempenho no período das chuvas inviabiliza o seu uso nos reservatórios localizados na bacia do Jaguaribe com a finalidade de estimativa de volumes armazenados.

## 6. RECOMENDAÇÕES

É recomendada a contemplação, no modelo, de dados mais precisos de retiradas, tanto ao longo dos cursos de água quanto nos reservatórios presentes na bacia hidrográfica dos reservatórios objeto de estudo com a finalidade de reduzir as fontes de erro do modelo.

A dinâmica da ocupação do solo deve ser melhor detalhada, por meio da classificação de imagens de satélite obtidas em diferentes períodos do ano, alterando a cobertura do solo e o parâmetro do Número da Curva.

Novas simulações para outros períodos devem ser testadas a fim de validar o modelo hidrológico desenvolvido, inclusive com aplicação em bacias hidrográficas com áreas mais e menos extensas do que as simuladas neste trabalho.

Dados de batimetria dos reservatórios públicos e particulares presentes nas bacias, bem como dados de vazão liberada e consumida nos mesmos devem ser fornecidos periodicamente, para registro e armazenamento por parte de instituições responsáveis pelo gerenciamento de recursos hídricos como Cogerh e Comitês de Bacia, bem como para pronta disponibilidade aos gestores e pesquisadores dos recursos hídricos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v. 29, n. 3, p. 440-451, 2009.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration (guideline for computing crop water requirements). (série FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Rome: FAO, 1998. 300p.

ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. *Revista Caatinga*, v. 22, n. 3, p. 126-135, 2009.

AMARAL, M. V. F.; SOUZA, A. L.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; MARTINS, S. V.; FERNANDES FILHO, E. I.; LANA, J. M. Avaliação e comparação de métodos de classificação de imagens de satélites para o mapeamento de estádios de sucessão florestal. *R. Árvore*, v. 33, n. 3, p. 575-582, 2009.

ASSOULINE, S.; TYLER, S. W.; TANNY, J.; COHEN, S.; BOU-ZEID, E. PARLANGE, M. B.; KATUL, G. G. Evaporation from three water bodies o different sizes and climates: Measurements and scaling analysis. *Adv Water Resources*, v.31, p. 160-172, 2008.

BAENA, L. G. N.; SILVA, C. C.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de Vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 24, n. 3, p. 612-624, set./dez. 2004.

BONHAM-CARTER, G. F. *Geographic Information Systems for geoscientists: Modelling whith GIS*. Ottawa: Pergamon, 1997. 398p.

BRASIL – Ministério da Agricultura/Ministério do Interior. Mapa Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará. Recife: SUDENE, 1972. 1 mapa, color. Escala 1:600000.

BRASIL – Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Mapa de Unidades de Relevo do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 1 mapa, color. Escala 1:5000000.

BRITO, L. T. L.; SILVA, D. A.; CAVALCANTI, N. B.; ANJOS, J. B.; REGO, M. M. Alternativa tecnológica para aumentar a disponibilidade de água no semi-árido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 3, n. 1, p. 111-115, 1999.

BURMAN, L.; POCHOP, L. O. *Evaporation, evapotranspiration and climatic data*. Amsterdam: Elsevier, 1994. 278p. *Developments in Atmospheric Science* 22.

CÂMARA, G. (Org.); DAVIS, C. (Org.); MONTEIRO, A. M. V. (Org.); PAIVA, J. A. (Org.); D'AGE, J. C. L. (Org.). *Geoprocessamento: Teoria e aplicação*. INPE – Edição On-line, 1999. v. 1. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>. Acesso em 06 maio 2008.

CÂMARA, G. (Org.); MEDEIROS, J. S. (Org). *Geoprocessamento para projetos ambientais*. INPE – 2ª Ed. On-line, 1998. Disponível em [http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/). Acesso em 06/07/2009.



CARDOSO, S. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *R. Árvore*, v. 30, n. 2, p. 241 – 248, 2006.

CARVALHO, G. B. B.; BURNETT, J. A. B. Análise sobre a implantação de sistemas de barragens de regularização. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA. 2004. (Estudo Técnico de Apoio ao PBHSF – Nº 07).

CARVALHO JÚNIOR, O. B.; COELHO, M. A. N.; MARTINS, E. S.; GOMES, R. A. T.; COUTO JÚNIOR, A. F.; OLIVEIRA, S. N.; SANTANA, O. A. Mapeamento da vegetação na floresta atlântica usando o classificador de árvore de decisão para integrar dados de sensoriamento remoto e modelo digital do terreno. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 3, p. 331-345, 2008.

CARVALHO, M. S. B. S.; MARTINS, E. S. P. R.; SOARES, A. M. L.; CHAVES, L. C. G.; OLIVEIRA, F. A. J.; PERINI, D. S.; MENESCAL, R. A. SCHERER-WARREN, M. Levantamento dos espelhos d'água acima de 20 ha em todo o território brasileiro através de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal-RN. Anais... Natal: INPE.

CASTELLETTI, A.; SONCINI-SESSA, R. Coupling real-time control and socio-economic issues in participatory river basin planning. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, p 1114-1128, 2007. Disponível em [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), acesso em 06 jul. 2007.

CEARÁ. Assembléia Legislativa do Estado do Ceará. Caderno Regional de Sub-Bacia do Banabuiú. INESP: Fortaleza-CE, 2009. .

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Plano de gerenciamento das águas da bacia do rio Jaguaribe - CE. [Fortaleza]: EngesoftEngenharia e Consultoria, 2000. 1 CD-ROM.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH). Consolidação da política e dos programas de recursos hídricos do Estado do Ceará – Atualização do plano estadual de recursos hídricos. Fortaleza: SRH, 2005. Disponível em <http://www.srh.ce.gov.br/plano-estadual-de-recursos-hidricos-planerh>. Acesso em 15 mai. 2007.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH). Atlas eletrônico dos recursos hídricos do Ceará. Fortaleza: SRH, 2009. Disponível em <http://atlas.srh.ce.gov.br/>. Acesso em 19 nov. 2009.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co., 1988. 572 p.

COLOMBO, R.; VOGT, J. V.; SOILLE, P.; PARACCHINI, M. L.; JAGER, A. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data. *Catena*, n. 70, p. 296 – 305, 2007.

COSTA, C. A. G. Avaliação dos dados SRTM através de análise altimétrica e morfométrica de bacias hidrográficas no semi-árido. Dissertação de Mestrado. 120f. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará. Mestrado em Irrigação e Drenagem. 2008.

COSTA, C. A. G.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; LUCENA, A. M. P.; CASTRO, M. A. H. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 2, p. 222-230, 2010.

DEMATTÊ, J. A. M.; SILVA, M. L. S.; ROCHA, G. C.; CARVALHO, L. A. C.; FORMAGGIO, A. R.; FIRME, L. P. Variações espectrais em solos submetidos a aplicação de torta de filtro. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 29, n. 2, p. 317, 2005.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In: Câmara, G. Davis, C. e Monteiro, A.M.V; In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação, São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001, cap 7. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>, Acesso em 10 de julho 2001.

FIGUEIREDO, M. A. A cobertura vegetal do Estado do Ceará (unidades fitoecológicas). In: Governo do Ceará. (Org.). Atlas do Ceará. 01 ed. Fortaleza: Edições IPLANCE, 1997, v. 01, p. 28-29.

FU, G. A fuzzy optimization method for multicriteria decision making: an application to reservoir flood. Disponível em [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Acesso em 9 ago. 2007. *control operation. Expert Systems with Applications*, v. 34, p. 145-149, 2008.

GATTO, L. C. S. (Supervisor) Diagnóstico ambiental da bacia do rio Jaguaribe: diretrizes gerais para a ordenação territorial. Salvador: IBGE, Diretoria de Geociências e 1ª Divisão de Geociências do Nordeste – DIGEO 1/NE.1, 1999. 77p.

GIANNIOU, S. K.; ANTONOPOULOS, V. Z. Evaporation and energy budget in Lake Vegorits, Greece. *J. Hydrol.*, v. 354, p. 212-223, 2007.

JACOMINE, P.K.T.; ALMEIDA, J.C.; MEDEIROS, L.A.R. Levantamento exploratório: reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife: EMBRAPA, DPP, SUDENE. 1973. 2v. 830 p. (Boletim Técnico, 28, Série Pedológica, 16).

KANNAN, N.; SANTHI, C.; WILLIAMS, J. R.; ARNOLD, J. G. Development of a continuous soil moisture accounting procedure for curve number methodology and its behavior with different evapotranspiration methods. *Hydrological Processes*, n. 22, p. 2114-2121, 2008.

LANG, R.; SHAO, G.; PIJANOWSKY, B. C.; FARNSWORTH, R. L. Optimizing unsupervised classifications of remotely sensed imagery with a data-assisted labeling approach. *Computers & Geosciences*, v. 34, p. 1877-1885, 2008.

LANNA, A. E. Gestão dos recursos hídricos. In: TUCCI, C. E. M. (org.) Hidrologia – Ciência e aplicação. 3ª. Ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 2004. Cap. 19.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, T. J. V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba. *Rev. Bras. Eng. Agríc. e Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 585-593, 2007.

LEITE, F. R. B.; GOMES, E. C. B.; BRAGA, E. L.; LEITE, F. A. B.; BARRETO, M. M. S.; MOTA, F. O. B.; ROMERO, R. E. Solos do Estado do Ceará: atualização taxonômica. Parte I – Latossolos e Podzólicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado-RS. Anais... Gramado: SBCS.

LEITE, F. A. B.; LEITE, F. R. B.; GOMES, E. C. B.; BRAGA, E. L.; BARRETO, M. M. S.; MOTA, F. O. B.; ROMERO, R. E. Solos do Estado do Ceará: atualização taxonômica. Parte II – Terra Roxa Estruturada Similar, Brunizem Avermelhado, Bruno Não Cálcido, Planossolo, Cambissolo, Vertissolo, Solonetz Solodizado, Solonchak Sonotézico, Laterita Hidromórfica, Solo Aluvial, Solo Litólico, Regossolo, Areia Quartzosa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado-RS. Anais... Gramado: SBCS.

MALTCHICK, L. Ecologia de rios intermitentes tropicais. In: Pompêo, M. L. M. (ed.) Perspectivas da Limnologia no Brasil. São Luís: Gráfica e Editora União, 198 p. 1999. Disponível em: < <http://www.ib.usp.br/limnologia/Perspectivas/arquivo%20pdf/Capitulo%205.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2009.

MALVEIRA, V. T. C. Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas: estudo de caso da bacia do açude Orós. 2009. 121f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2009.

MATOS, A. T.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Impactos decorrentes da construção de reservatórios para acumulação de água. Item, n. 56/57, p. 60-66, 2003.

McCOY, J. ArcGIS 9: Geoprocessing in ArcGIS. ESRI: Redlands, CA. 370 p. 2004. Disponível em <[http://gisgeek.pdx.edu/programming/Geoprocessing\\_in\\_ArcGIS.pdf](http://gisgeek.pdx.edu/programming/Geoprocessing_in_ArcGIS.pdf)>. Acesso em: 10.jan.2010.

MELIÁN, B.; PÉREZ, J. A. M.; VEGA, J. M. M. Metaheurísticas: una visión global. Revista Iberoamericana de Interligencia Artificial, n. 19, p. 7-28, 2003.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: ABRH. 2001.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MI). Nova delimitação do Semi-Árido brasileiro. Cartilha. Brasília: MI, 2005. Disponível em <<http://www.mi.gov.br/>>. Acesso em: 18/10/2007.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação. 3 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005.

ONU Agriculture and Water Scarcity: a Programmatic Approach to Water Use Efficiency and Agricultural Productivity. Roma, 2007. Disponível em <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/meeting/011/j9206e.pdf>>. Acesso em 18 jun. 2007.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; RISSO, A.; MENDES, C. A. B. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. Computers & Geosciences, v. 34, p. 1584-1596, 2008.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and Grass. Proc. R. Soc. London, v. 193, p. 120-143, 1948.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ. 1997. 183p.

PEREIRA JÚNIOR, J. S. Nova delimitação do semi-árido brasileiro. Brasília: Câmara dos Deputados. 2007. 25p.

PEREIRA, S. B. Evaporação no lago de Sobradinho em disponibilidade hídrica no rio São Francisco. 2004. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2004.

PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, Cartas Topográficas e GPS numa área de relevo escarpado. Revista Brasileira de Cartografia, n 58/1, 2006.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal (SP). Rev. Bras. Ci. Solo, n. 28, p. 297-305, 2004.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. Escoamento superficial. Viçosa: UFV. 2 ed. 2006. 87 p.

QUEIROZ, L. P.; RAPINI, A.; GUILLETTI, A. M. (Ed.) Rumo ao amplo conhecimento da biodiversidade do Semi-Árido brasileiro. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia. 2006. Disponível em: <[www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=2981](http://www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=2981)>. Acesso em: 12 out 2008.

REIS, E. M.; LEITES, A.; FORCELINE, C. A. Relações entre intensidade da doença, reflectância da radiação solar e rendimento de grãos no patossistema ferrugem da folha de trigo Embrapa 16. Fitopatol. Bras., n. 31, v. 6, 2006.

ROSENBERRY, D. O.; WINTER, T. C.; BUSO, D. C.; LIKENS, G. E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. J. Hydrol., v. 340, p. 149-166, 2007.

SANCHES, I. D. A.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. Agric. São Paulo, v. 52, n. 1, p. 83-96, 2005.

SCHIETTI, J. et al. Avaliação de uso de dados SRTM para estudos ecológicos na Amazônia central. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. Anais... Florianópolis, Brasil, 21-26 de abril de 2007, INPE, p. 6949-9655.

SCHUMANN, G. et al. Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. Photogrammetry & Remote Sensing, v. 63, n. 3, 2008. p. 283-296. Disponível em <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em: 12 mar. 2009.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

SOUSA, B. A. S. Aprendizado de máquina na detecção do uso do solo no bioma caatinga via sensoriamento remoto. 2009. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2009.

SOUSA, B. F. S.; TEIXEIRA, A. S.; LEÃO, R. A. O.; COSTA FILHO, A. B. Uso do solo da bacia hidrográfica do Alto Piauí através de imagens do satélite CBERS. Revista Ciência Agrônômica, v. 38, n. 4, p. 327-334, 2007.

SOUZA, B. I.; SILANS, A. M. B. P.; SANTOS, J. B. Contribuição ao estudo da desertificação na bacia do Taperoá. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 8, n. 2/3, p. 292-298, 2004.

SULSOFT Guia do ENVI em Português. Disponível em: <<http://www.sulsoft.com.br/arearestrita/main.php>>. Acesso em 24.dez.2009.

SUN, G. et al. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. Remote Sensing of Environment, n 88, p. 401-411, 2003. Disponível em <<http://www.sceincedirect.com>>. Acesso em: 12 mar. 2008.

TEIXEIRA, F. J. C. Modelos de Gerenciamento de Recursos Hídricos: análises e propostas de aperfeiçoamento do sistema do Ceará. Brasília: Banco Mundial/Ministério de Integração Nacional. 2004.

TEXAS A & M UNIVERSITY. Hydrologic Modeling Inventory. Model Description Form. 2007. Disponível em <<http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>>. Acesso em 25 set. 2007.

TEXAS A & M UNIVERSITY; BUREAU OF RECLAMATION. Hydrologic Modeling Inventory Website. Model Description Form. 1999a. Disponível em <<http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>>. Acesso em 25 set. 2007.

TEXAS A & M UNIVERSITY; BUREAU OF RECLAMATION. Hydrologic Modeling Inventory Website. Model Description Form. 1999b. Disponível em <<http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>>. Acesso em 25 set. 2007.

TEXAS A & M UNIVERSITY; BUREAU OF RECLAMATION. Hydrologic Modeling Inventory Website. Model Description Form. 1999. Disponível em <<http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>>. Acesso em 25 set. 2007.

TONELLO, K. C. Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cacheira das Pombas, Guanhães, MG. 2005. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

WALCOTT, R. C.; SUMMERFIELD, M. A. Scale dependence of hypsometric integrals: An analysis of southeast African basins. Geomorphology, n. 26, p. 174-186, 2008.

WORLD BANK Water Resources Sector Strategy: Strategic Directions for World Bank engagement. 2003. Disponível em :<[http://www.bancomundial.org.br/index.php?action=/content/view\\_folder&cod\\_object=101#1525](http://www.bancomundial.org.br/index.php?action=/content/view_folder&cod_object=101#1525)> Acesso em: 18 jun. 2007.

WURBS, R. A. Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. Journal of Hydrology, v. 300, p. 100-113, 2005.

## 9. ANEXOS

ANEXO A

Cota x Área x Volume dos principais reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe

Tabela A1: Cota x Área x Volume do açude Pedras Brancas

COTA	NIVEL	VOLUME	
		(m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )
100	0	900,00	0,00
101	1	13.100,00	20.000,00
102	2	45.400,00	50.000,00
103	3	166.200,00	110.000,00
104	4	280.000,00	230.000,00
105	5	607.000,00	450.000,00
106	6	1.227.600,00	810.000,00
107	7	2.289.800,00	1.330.000,00
108	8	3.969.600,00	2.080.000,00
109	9	6.559.900,00	3.120.000,00
110	10	10.245.900,00	4.280.000,00
111	11	15.136.000,00	5.450.000,00
112	12	20.858.600,00	5.920.000,00
112,28	12,28	22.534.300,00	6.040.000,00
114	14	24.830.000,00	7.770.000,00
116	16	44.450.000,00	11.840.000,00
118	18	74.990.000,00	19.690.000,00
120	20	119.280.000,00	25.600.000,00
122	22	178.030.000,00	33.150.000,00
124	24	259.170.000,00	41.970.000,00
125	25	303.160.000,00	58.000.000,00
127	27	434.040.000,00	72.880.000,00

Fonte: Banco de Dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH

Tabela A2: Cota x Área x Volume do açude Banabuiú

COTA	NIVEL	VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )
87,5	0	0,00	0,00
88	0,5	0,00	0,00
89	1,5	0,00	0,00
90	2,5	3.000,00	0,00
91	3,5	9.000,00	10.000,00
92	4,5	21.000,00	20.000,00
93	5,5	59.000,00	60.000,00
94	6,5	162.000,00	150.000,00
95	7,5	359.000,00	250.000,00
96	8,5	673.000,00	400.000,00
97	9,5	1.178.000,00	620.000,00
98	10,5	1.931.000,00	880.000,00
99	11,5	2.978.000,00	1.230.000,00
100	12,5	4.444.300,00	1.730.000,00
101	13,5	6.475.000,00	2.330.000,00
102	14,5	9.123.000,00	2.980.000,00
103	15,5	12.465.000,00	3.710.000,00
104	16,5	16.522.000,00	4.390.000,00
105	17,5	21.212.000,00	4.970.000,00
106	18,5	26.397.000,00	5.370.000,00
106,71	19,21	30.299.000,00	5.620.000,00
107,5	20	41.500.000,00	6.135.200,00
112,5	25	111.500.000,00	10.095.200,00
117,5	30	201.500.000,00	17.005.200,00
122,5	35	321.500.000,00	31.105.200,00
127,5	40	521.500.000,00	41.535.200,00
132,5	45	751.500.000,00	65.155.200,00
137,5	50	1.141.500.000,00	90.335.200,00
142,5	55	1.601.000.000,00	144.865.200,00
143,5	60	1.676.500.000,00	154.655.200,00

Fonte: Banco de Dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH



Tabela A3: Cota x Área x Volume do açude Orós

COTA	NIVEL	VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )
160	0	0,00	0,00
161	1	270.000,00	270.000,00
162	2	280.000,00	430.000,00
163	3	710.000,00	690.000,00
164	4	1.740.000,00	1.100.000,00
165	5	3.410.000,00	1.640.000,00
166	6	5.680.000,00	2.280.000,00
167	7	8.610.000,00	3.030.000,00
168	8	12.290.000,00	3.880.000,00
169	9	16.870.000,00	4.860.000,00
170	10	22.540.000,00	6.010.000,00
171	11	29.480.000,00	7.320.000,00
172	12	37.880.000,00	8.820.000,00
173	13	47.880.000,00	10.490.000,00
174	14	59.620.000,00	12.310.000,00
175	15	73.220.000,00	14.260.000,00
176	16	88.790.000,00	16.330.000,00
177	17	106.470.000,00	18.510.000,00
178	18	126.410.000,00	20.820.000,00
179	19	148.780.000,00	23.300.000,00
180	20	173.840.000,00	25.980.000,00
181	21	201.870.000,00	28.940.000,00
182	22	233.210.000,00	32.250.000,00
183	23	268.270.000,00	35.990.000,00
184	24	307.480.000,00	40.210.000,00
185	25	351.330.000,00	45.000.000,00
186	26	400.370.000,00	50.400.000,00
187	27	455.150.000,00	56.430.000,00
188	28	516.270.000,00	63.120.000,00
189	29	584.400.000,00	70.490.000,00
190	30	660.210.000,00	78.540.000,00
191	34	744.460.000,00	87.300.000,00
192	32	837.970.000,00	96.810.000,00
193	33	941.610.000,00	107.140.000,00
194	34	1.056.360.000,00	118.380.000,00
195	35	1.183.260.000,00	130.670.000,00
196	36	1.323.410.000,00	144.140.000,00
197	37	1.477.940.000,00	158.920.000,00
198	38	1.647.990.000,00	175.100.000,00
199	39	1.834.620.000,00	192.680.000,00
199,5	39,5	1.940.000.000,00	202.110.000,00
200	40	2.038.810.000,00	211.540.000,00
205	45	3.342.800.000,00	310.040.000,00
206	46	4.000.000.000,00	330.000.000,00

Fonte: Banco de Dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH

Tabela A4: Cota x Área x Volume do açude Castanhão

COTA	NIVEL	VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )
40	0	0,00	0,00
50	10	25.000.000,00	5.000.000,00
55	15	50.000.000,00	8.000.000,00
60	20	75.000.000,00	10.000.000,00
65	25	117.040.000,00	20.000.000,00
65,5	25,5	131.830.000,00	21.100.000,00
66	26	146.620.000,00	22.200.000,00
66,5	26,5	161.440.000,00	23.400.000,00
67	27	176.310.000,00	24.600.000,00
67,5	27,5	191.260.000,00	26.000.000,00
68	28	206.320.000,00	27.100.000,00
68,5	28,5	221.520.000,00	28.500.000,00
69	29	236.910.000,00	30.000.000,00
69,5	29,5	252.520.000,00	31.400.000,00
70	30	268.410.000,00	33.000.000,00
70,5	30,5	284.630.000,00	33.400.000,00
71	31	301.220.000,00	34.100.000,00
71,5	31,5	318.240.000,00	35.500.000,00
72	32	335.760.000,00	38.000.000,00
72,5	32,5	353.820.000,00	40.000.000,00
73	33	372.510.000,00	43.000.000,00
73,5	33,5	391.880.000,00	45.800.000,00
74	34	412.000.000,00	48.000.000,00
74,5	34,5	432.940.000,00	50.700.000,00
75	35	454.780.000,00	52.000.000,00
75,5	35,5	477.590.000,00	55.700.000,00
76	36	501.450.000,00	58.000.000,00
76,5	36,5	526.440.000,00	60.600.000,00
77	37	552.630.000,00	63.600.000,00
77,5	37,5	580.110.000,00	66.400.000,00
78	38	608.950.000,00	69.000.000,00
78,5	38,5	639.250.000,00	72.000.000,00
79	39	671.090.000,00	75.700.000,00
79,5	39,5	704.550.000,00	79.800.000,00
80	40	739.710.000,00	85.000.000,00
80,5	40,5	776.670.000,00	86.400.000,00
81	41	815.500.000,00	90.300.000,00
81,5	41,5	856.300.000,00	94.000.000,00
82	42	899.160.000,00	98.000.000,00
82,5	42,5	944.150.000,00	102.000.000,00
83	43	991.360.000,00	106.000.000,00
83,5	43,5	1.040.880.000,00	110.000.000,00

Tabela A4 (continuação) – Cota x Área x Volume do açude Castanhão

COTA	NIVEL	VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )
84	44	1.092.800.000,00	114.400.000,00
84,5	44,5	1.147.200.000,00	118.300.000,00
85	45	1.204.170.000,00	120.000.000,00
85,5	45,5	1.263.780.000,00	124.200.000,00
86	46	1.326.110.000,00	128.700.000,00
86,5	46,5	1.391.260.000,00	133.900.000,00
87	47	1.459.290.000,00	139.000.000,00
87,5	47,5	1.530.290.000,00	144.300.000,00
88	48	1.604.330.000,00	150.200.000,00
88,5	48,5	1.681.490.000,00	156.300.000,00
89	49	1.761.830.000,00	162.200.000,00
89,5	49,5	1.845.430.000,00	169.000.000,00
90	50	1.932.350.000,00	175.000.000,00
90,5	50,5	2.022.670.000,00	182.700.000,00
91	51	2.116.440.000,00	190.000.000,00
91,5	51,5	2.213.720.000,00	196.400.000,00
92	52	2.314.580.000,00	203.800.000,00
92,5	52,5	2.419.060.000,00	211.000.000,00
93	53	2.527.220.000,00	218.000.000,00
93,5	53,5	2.639.110.000,00	224.200.000,00
94	54	2.754.760.000,00	232.000.000,00
94,5	54,5	2.874.230.000,00	238.700.000,00
95	55	2.997.550.000,00	245.000.000,00
95,5	55,5	3.124.760.000,00	252.000.000,00
96	56	3.255.880.000,00	259.200.000,00
96,5	56,5	3.390.940.000,00	266.300.000,00
97	57	3.529.960.000,00	274.000.000,00
97,5	57,5	3.672.960.000,00	281.500.000,00
98	58	3.819.960.000,00	288.400.000,00
98,5	58,5	3.970.960.000,00	296.000.000,00
99	59	4.125.960.000,00	304.300.000,00
99,5	59,5	4.284.970.000,00	312.300.000,00
100	60	4.447.970.000,00	320.000.000,00
100,5	60,5	4.614.960.000,00	328.500.000,00
101	61	4.785.920.000,00	337.800.000,00
101,5	61,5	4.960.830.000,00	346.900.000,00
102	62	5.139.650.000,00	356.200.000,00
102,5	62,5	5.322.360.000,00	366.400.000,00
103	63	5.508.910.000,00	376.700.000,00
103,5	63,5	5.699.270.000,00	387.400.000,00
104	64	5.893.370.000,00	398.000.000,00
104,5	64,5	6.091.160.000,00	408.800.000,00
105	65	6.292.570.000,00	420.000.000,00
105,5	65,5	6.497.540.000,00	430.700.000,00

Tabela A4 (continuação): Cota x Área x Volume do açude Castanhão

COTA	NIVEL	VOLUME (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )
106	66	6.700.000.000,00	441.000.000,00
106,5	66,5	6.917.810.000,00	452.000.000,00
107	67	7.132.950.000,00	463.800.000,00
107,5	67,5	7.351.280.000,00	475.700.000,00
108	68	7.572.700.000,00	488.000.000,00
108,5	68,5	7.797.100.000,00	500.700.000,00
109	69	8.024.360.000,00	513.000.000,00
109,5	69,5	8.254.340.000,00	526.200.000,00
110	70	8.486.920.000,00	540.000.000,00
110,5	70,5	8.721.940.000,00	546.700.000,00
111	71	8.959.250.000,00	558.400.000,00
111,5	71,5	9.198.690.000,00	571.700.000,00
112	72	9.440.090.000,00	585.000.000,00
112,5	72,5	9.683.270.000,00	598.600.000,00
113	73	9.928.050.000,00	613.000.000,00
113,5	73,5	10.174.220.000,00	627.800.000,00
114	74	10.421.580.000,00	642.400.000,00

Fonte: Banco de Dados da Companhia de Gestão de

Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH

ANEXO B – Vazões liberadas segundo manejo dos reservatórios Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Tabela B1 – Vazões liberadas diariamente, em  $L s^{-1}$ , nos açude Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Data	Açudes			
	Pedras Brancas	Banabuiú	Orós	Castanhão
01/01/2005	270	6300	3000	13000
04/01/2005	270	7500	3000	13000
07/01/2005	270	7500	3000	10000
12/01/2005	270	7000	3000	10000
17/01/2005	270	6500	3000	10000
21/01/2005	135	6500	3000	10000
27/01/2005	135	5000	3000	8000
01/02/2005	135	4000	3000	8000
11/02/2005	135	5000	3000	5000
17/02/2005	135	5500	3000	5000
07/03/2005	50	6500	3000	4000
14/03/2005	50	7000	3000	4000
16/03/2005	50	8000	3000	8000
23/03/2005	50	6000	3000	8000
29/03/2005	50	2000	500	6000
31/03/2005	50	2000	500	4000
25/04/2005	50	5000	500	7000
26/04/2005	50	5000	500	6000
29/04/2005	50	5000	500	8000
05/05/2005	50	5000	500	6000
17/05/2005	50	4000	500	5000
21/05/2005	50	3000	500	5000
16/06/2005	50	3000	500	7000
30/06/2005	50	3000	500	6000
01/07/2005	50	2000	500	6000
06/07/2005	50	3000	500	6000
07/07/2005	50	3000	500	8000
18/07/2005	50	4000	500	8000
21/07/2005	50	5000	500	7000
26/07/2005	50	7000	500	7000
01/08/2005	50	7000	500	10000
03/08/2005	50	8000	500	9000
05/08/2005	50	8000	500	8500
08/08/2005	50	8000	500	13000
09/08/2005	50	7000	500	13000
15/08/2005	50	8000	500	13000
18/08/2005	50	9000	1500	13000
19/08/2005	50	9000	1500	12000
31/08/2005	50	9000	3000	12000
03/09/2005	332	9000	3000	12000
06/09/2005	332	10000	3000	12000

Tabela B1 (Continuação) – Vazões liberadas diariamente, em L s<sup>-1</sup>, nos açude Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

Data	Pedras Brancas	Açudes		
		Banabuiú	Orós	Castanhão
19/09/2005	609	10000	3000	12000
21/09/2005	609	10000	3000	11000
03/10/2005	300	10000	3000	12000
06/10/2005	300	10000	3000	13000
07/10/2005	300	10000	3000	15000
10/10/2005	300	10000	3000	13000
13/10/2005	300	10000	3000	15000
20/10/2005	300	11000	3000	15000
21/10/2005	300	11000	3000	16000
27/10/2005	300	11000	3000	14000
16/11/2005	300	11000	3000	13000
18/11/2005	300	11000	3000	11500
24/11/2005	270	10000	3000	11500
26/11/2005	270	80000	3000	11500
28/11/2005	270	6481	3000	11500
18/12/2005	200	6481	3000	11500
19/12/2005	164	6481	3000	11500
26/12/2005	164	5000	3000	11500
27/12/2005	100	5000	3000	11500
28/12/2005	100	5000	3000	11500
29/12/2005	100	5000	3000	11500
30/12/2005	100	5000	3000	11500
31/12/2005	100	5000	3000	11500

Fonte: Banco de Dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH.

As datas ausentes são aquelas nas quais não houve alteração na vazão liberada em qualquer reservatório, repetindo-se as liberações do dia anterior.

## APÊNDICE A

Equações utilizadas na estimativa da evaporação diária nos açudes Pedras Brancas, Banabuiú, Orós e Castanhão.

$$El = 0,7 \cdot E$$

$$E = \frac{\Delta \cdot R_n + \gamma \cdot Ea}{\Delta + \gamma}$$

$$Ea = 25,4 \cdot \left[ 0,296 \cdot (e_s - e_a)^{0,88} \cdot (0,37 + 0,00255 \cdot u_p) \right]$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{\text{máx}}) + e^0(T_{\text{mín}})}{2}$$

$$e^0(T_{\text{máx}}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27T_{\text{máx}}}{T_{\text{máx}} + 237,3} \right]$$

$$e^0(T_{\text{mín}}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27T_{\text{mín}}}{T_{\text{mín}} + 237,3} \right]$$

$$e_a = \frac{e^0(T_{\text{mín}}) \cdot \frac{UR_{\text{máx}}}{100} + e^0(T_{\text{máx}}) \cdot \frac{UR_{\text{mín}}}{100}}{2}$$

$$u_p = U10 \cdot \frac{\ln(67,8 \cdot 0,152 - 5,42)}{\ln(67,8 \cdot 10 - 5,42)} \cdot 86,4$$

$$R_n = 0,408(R_{ns} - R_{nl})$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\text{máx},K}^4 + T_{\text{mín},K}^4}{2} \right] \left( 0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z)R_a$$

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

$$\delta = 0,409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp \left( \frac{17,27 T_{méd}}{T_{méd} + 237,3} \right) \right]}{(T_{méd} + 237,3)^2}$$

$$T_{méd} = \frac{T_{máx} - T_{mín}}{2}$$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} 10^{-3}$$

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26}$$

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3}) T_{méd}$$

$El$  - Evaporação no lago (Kohler et al., 1955 *apud* Burman e Pochop, 1994), em mm.dia<sup>-1</sup>;

$E$  - Evaporação no tanque de evaporação, em mm.dia<sup>-1</sup>;

$\Delta$  - Declividade da curva de pressão, em kPa.°C<sup>-1</sup>;

$Rn$  - Saldo de radiação, em mm.dia<sup>-1</sup>;

$\gamma$  - Coeficiente psicrométrico, em kPa.°C<sup>-1</sup>;

$Ea$  - Função aerodinâmica, em mm.dia<sup>-1</sup>;

$e_s$  - Pressão de saturação de vapor, em kPa;

$e_a$  - Pressão de vapor real, em kPa;

$u_p$  - Velocidade do vento a 0,152 m, acima do tanque classe A, em km.dia<sup>-1</sup>;

$e^0(T_{máx})$  - Pressão de saturação de vapor na temperatura máxima, em kPa;

$e^0(T_{mín})$  - Pressão de saturação de vapor na temperatura mínima, em kPa

$T_{máx,K}$  - Temperatura máxima absoluta, em K;

$T_{mín,K}$  - Temperatura mínima absoluta, em K;

$UR_{máx}$  - Umidade relativa máxima, em %

$UR_{mín}$  - Umidade relativa mínima, em %

$U10$  - Velocidade do vento a 10 m de altura, em m.s<sup>-1</sup>;

$R_{ns}$  - Saldo de radiação de onda curta, em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>;

$R_{nl}$  - Saldo de radiação de onda larga, em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>;

$\alpha$  - Refletividade da água para a radiação de ondas curtas, 0,07;



$R_s$  - Radiação de ondas curtas incidente, em  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ;  
 $\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzman,  $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ.K}^{-4}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ;  
 $R_{so}$  - Radiação solar em um dia sem nuvens, em  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ;  
 $z$  - Altitude da estação meteorológica em relação ao nível do mar, em m;  
 $R_a$  - Radiação no topo da atmosfera para períodos diários, em  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ;  
 $G_{sc}$  - Constante solar,  $0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ;  
 $d_r$  - Distância relativa inversa Terra-Sol;  
 $\omega$  - Ângulo de radiação ao por do Sol, em rad;  
 $\varphi$  - Latitude, em rad;  
 $\delta$  - Declinação solar, em rad;  
 $J$  - Dia Juliano;  
 $T_{méd}$  - Temperatura média do ar, em °C;  
 $T_{máx}$  - Temperatura máxima do ar, em °C;  
 $T_{mín}$  - Temperatura mínima do ar, em °C;  
 $c_p$  - Calor específico do ar,  $1,013 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ;  
 $P$  - Pressão atmosférica, em kPa  
 $\varepsilon$  - Relação de peso molecular do vapor de água/solo seco, 0,622  
 $\lambda$  - Calor latente de vaporização, em  $\text{MJ.kg}^{-1}$ ;