



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**

**JOSEFA MARCIANA BARBOSA DE FRANÇA**

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO-CE COM USO  
DE MODELO MATEMÁTICO E GEOTECNOLOGIA**

**FORTALEZA - CE**

**2013**

JOSEFA MARCIANA BARBOSA DE FRANÇA

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO-CE COM USO  
DE MODELO MATEMÁTICO E GEOTECNOLOGIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos parcial para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador. Prof. Francisco de Assis de Souza Filho, D.Sc.

Coorientador. Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.

FORTALEZA – CE

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- F881a França, Josefa Marciana Barbosa de.  
Avaliação da degradação do Açude Acarape do Meio-CE com uso de modelo matemático e geotecnologia. / Josefa Marciana Barbosa de França. – 2013.  
106 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2013.  
Área de Concentração: Recursos Hídricos  
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.  
Coorientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman.
1. Recursos Hídricos. 2. Modelagem computacional. 3. Sensoriamento remoto.  
4. Água - Qualidade. 5. Morfometria. I. Título.

CDD 627

---

JOSEFA MARCIANA BARBOSA DE FRANÇA

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO-CE COM USO DE  
MODELO MATEMÁTICO E GEOTECNOLOGIA

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Recursos Hídricos. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Francisco de Assis de Souza Filho, D.Sc.(Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D. (Coorientador)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

---

Prof., Iran Eduardo Lima Neto, Ph.D.  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof., Francisco Osny Eneas da Silva, Dr.  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A minha amada mãe, Noberta Borges Barbosa.

*(In memoriam)*

v

## AGRADECIMENTOS

Para a elaboração do presente estudo recebi a colaboração de várias pessoas. Dentre estas, mencionarei algumas que considero fundamentais e peço desculpa as demais por não fazer menção.

Gostaria de agradecer a Secretária de Recursos Hídricos (SRH) pelo financiamento do projeto de Mestrado e a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) por incentivar a capacitação profissional.

Aos orientadores, Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho, por sua disponibilidade e interesse em me ajudar nas horas em que o procurava, e ao Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman, sempre muito atencioso e que me ensinou as funcionalidades do modelo matemático SisBaHiA.

Ao amigo de longa distância, Flávio Wachholz, por sua atenção e constante colaboração em conhecimentos de sensoriamento remoto aplicado aos recursos hídricos.

Ao professor Jean Michel Martinez pelas informações em sensoriamento remoto.

A professora Ticiano Marinho de Carvalho Studart, coordenadora do mestrado, por sua organização e dedicação para a realização da pós-graduação *Stricto Sensu*.

A professora, Ana Bárbara, pelas considerações feita no trabalho referente a qualificação.

Aos demais professores membros da banca: Iran Eduardo Lima Neto e Francisco Osny Eneas da Silva.

As colaboradoras da UFC, Terezinha e Maria Marlene por toda sua dedicação ao curso.

Grata ao Wictor Lemos pela colaboração e apoio.

Á minha querida irmã, Kátia Borges Barbosa, por sua ajuda, constante paciência e dedicação.

Ao Diretor Presidente da COGERH, Francisco Rennys Aguiar Frota, pela compreensão e liberação dos técnicos que frequentam ao mestrado.

Á Walt Disney, gerente da GEDOP, por toda afeição ao setor, assim como, pela compreensão concedida a mim, para participar dos cursos de qualificação para desenvolver esta pesquisa.

Aos colegas do trabalho: Rafael Reis, pelo apoio ao projeto de modelagem. Francimeyre Freire Avelino, pela organização e disponibilização das informações do setor de mo-

nitoramento qualitativo. Luciana Matos, que também colabora na organização das informações. A todos os colegas que me ajudaram em campo como o Deilton.

Ao apoio familiar de meu Pai, Jobem Defensor Barbosa, e dos meus irmãos, A-cassiana Borges Barbosa e Francisco Wilami Borges Barbosa.

***“Agradeço a Deus por tudo”***

## RESUMO

Um dos grandes desafios da gestão ambiental é compatibilizar a preservação com os usos múltiplos, sendo fundamental o conhecimento dos fatores condicionantes das modificações das condições naturais dos reservatórios e respectiva bacia hidrográfica. Neste contexto, o presente trabalho aborda temas como: caracterização morfométrica da bacia hidrográfica e hidráulica do açude Acarape do Meio – CE; simulação da circulação hidrodinâmica para o ano de 2012 a partir do programa SisBaHiA, assim como, a estimação do tempo de residência e das taxas de renovação; e para averiguar aspectos da evolução dos processos de degradação da qualidade da água, processou-se quatro imagens de satélite Landsat 5 – TM. A partir da análise dos resultados da pesquisa, constatou-se que: a bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio tem aproximadamente 10,31% da área degradada; identificou-se que a bacia hidráulica tem formato dendrítico com elevado desenvolvimento de perímetro. Quanto aos aspectos relacionados à modelagem ambiental estimou-se que o comportamento da circulação hidrodinâmica apresentou baixa velocidade das correntes; a taxa de renovação da água no período de chuva atingiu 100% nas áreas de reentrâncias; também se identificou que o tempo de residência é mais elevado nas áreas rasas e dendríticas. Com relação à presença de componentes ópticos ativos, constatou-se que ocorreu o aumento na resposta espectral das imagens Landsat 5 – TM, referente ao período de 11 anos (2001 a 2011), que se relaciona com o aumento da clorofila *a* ao longo dos anos, que é consequência do processo de eutrofização.

**Palavras-chave:** Morfometria. Circulação Hidrodinâmica. Sensoriamento Remoto. Qualidade da água.

## ABSTRACT

One of the great challenges of environmental management is compatible the preservation with the water multiple uses, with fundamental knowledge of the factors conditioning the changes of the natural conditions of the reservoirs and their watershed. In this context, this paper addresses topics such as: morphometric characterization of the Acarape do Meio (Ceará State) river basin and its hydraulic weir; simulation of hydrodynamic circulation for the year 2012 with the SisBaHiA program, as well as the estimation of the residence time and renewal fees, and to investigate aspects of the evolution of the processes of degradation of water quality, from four satellite images Landsat 5 - TM. From the analysis of the survey results, it was found that the catchment area of the dam Acarape do Meio has approximately 10,31% of the degraded area and it was found that the hydraulic basin has dendritic format with high perimeter development. For the aspects related to environmental modeling, it was estimated that the hydrodynamic behavior of circulating currents showed low speeds, the renewal rate of the water during the rainy season reached 100% in the areas of recesses and also it was found that the residence time is higher in the shallow and dendritic areas. With respect to the presence of active optical components, it was found that there was an increase in the spectral response of Landsat 5 - TM for the 11 years period (2001 to 2011), which relates to the increase of chlorophyll a throughout the years, which is a eutrophication consequence.

**Keywords:** Morphometry. Hydrodynamic Circulation. Remote Sensing. Water Quality.

# SUMÁRIO

---

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organização do Trabalho.....	3
CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	5
2.1 Descrição da Área .....	5
2.2 Solos .....	7
2.3 Vegetação.....	8
2.4 Indicadores Socioeconômicos .....	10
2.5 Uso e Ocupação do Solo na Bacia Hidrográfica .....	11
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 Açudes .....	12
3.2 Sistema de Informações Geográficas .....	17
3.3 Geomorfologia .....	18
3.4 SRTM .....	19
3.5 Modelagem Computacional.....	20
3.6 Calibração de Modelos.....	25
3.7 Sensoriamento Remoto.....	26
3.8 Componentes Ópticos Ativos na Água.....	28
3.9 Eutrofização .....	29
CAPÍTULO 4 - MATERIAL E MÉTODOS.....	32
4.1 Análise Morfométrica.....	32
4.2 Modelagem Ambiental .....	33
4.2.1 Circulação Hidrodinâmica .....	34
4.2.2 Tempo de Residência.....	35
4.2.3 Taxa de Renovação da Água.....	36
4.3 Dados Considerados na Modelagem Ambiental.....	37
4.3.1 Batimetria.....	37
4.3.2 Malha de Elementos Finitos.....	39
4.3.3 Ventos .....	40
4.3.4 Precipitação e Evaporação .....	40

4.3.5	Vazões.....	41
4.4	Calibração do Modelo Hidrodinâmico .....	43
4.5	Componentes Ópticos Ativos na Água.....	44
	CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	46
5.1	Análise Morfométrica.....	46
5.2	Circulação Hidrodinâmica .....	55
5.2.1	Aspectos Relacionados à Calibração do Modelo .....	69
5.3	Taxa de Renovação .....	71
5.4	Tempo de Residência .....	73
5.5	Componentes Ópticos Ativos Presente na Água.....	75
	CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES .....	84
6.1	Sugestões e Recomendações.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio subdividida em áreas contribuintes dos afluentes. ....	6
Figura 2.2 - Solos predominantes na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio. ....	8
Figura 2.3 - Plantação de milho e lançamento de efluentes dentro da área de preservação permanente do açude. ....	11
Figura 3.1 - Processos de intrusão em reservatórios estratificados. ....	14
Figura 3.2 - Zonas verticais e longitudinais de reservatórios em zonas temperadas. ....	15
Figura 3.3 - Zonas de misturas em reservatórios desestratificados. ....	16
Figura 3.4 - Estrutura geral de sistema de informações geográficas. ....	18
Figura 3.5 - Estrutura da geomorfologia. ....	19
Figura 3.6 - Espectro de reflectância da água, do solo e da vegetação. ....	27
Figura 3.7 - Reflectância da água clara com presença de algas (a), e reflectância da água contendo várias concentrações de sedimentos (b). ....	29
Figura 4.1 - Mapa das isobatas no açude Acarape do Meio realizada em maio de 2011. ....	38
Figura 4.2 - Malha de elementos finitos quadráticos. ....	39
Figura 4.3 - Rosa dos ventos apresentando dados de velocidade e direção dos ventos, em 2012. ....	40
Figura 4.4 - Precipitação e evaporação do município de Guaramiranga/CE, em 2012. ....	41
Figura 4.5 - Seção transversal do rio Pacoti, dezembro de 2011. ....	42
Figura 4.6 - Seção transversal do rio Canabrava, dezembro de 2011. ....	42
Figura 4.7 - Variação das vazões ao longo do período de chuvas (fevereiro a abril de 2012). ....	43
Figura 5.1 - Mapa do Relevo da área de drenagem do açude Acarape do Meio - 2013. ....	51
Figura 5.2 - Curva hipsométrica da área de drenagem do açude Acarape do Meio - 2013. ....	53
Figura 5.3 - Mapa hipsométrico da área de drenagem do açude Acarape do Meio - 2013. ....	53
Figura 5.4 - Classificação não supervisionada da bacia hidrográfica do Acarape do Meio. ....	55
Figura 5.5 - Representação da localização das estações no modelo hidrodinâmico. ....	56
Figura 5.6 - Rosa dos ventos referente ao primeiro (A) e ao segundo (B) semestre/2012. ....	56
Figura 5.7 - Frequência das velocidades dos ventos presente na área de estudo, em 2012. ....	57
Figura 5.8 - Representação temporal da circulação hidrodinâmica pelo módulo 2DH nas estações do açude Acarape do Meio/2012. ....	58
Figura 5.9 - Simulação da circulação hidrodinâmica a partir do módulo 2DH para o dia 11 de abril de 2012. ....	59
Figura 5.10 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 2 m/s no dia 08/08/2012. ....	60
Figura 5.11 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 2 m/s no dia 08/08/2012. ....	61
Figura 5.12 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada do fundo com vento de 2 m/s no dia 08/08/2012. ....	61
Figura 5.13 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 3 m/s no dia 10/08/2012. ....	62

Figura 5.14 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 3 m/s no dia 10/08/2012.....	63
Figura 5.15 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada do fundo com vento de 3 m/s no dia 10/08/2012. ....	63
Figura 5.16 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 4 m/s no dia 28/09/2012.....	64
Figura 5.17 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 4 m/s no dia 28/09/2012.....	65
Figura 5.18 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada do fundo com vento de 4 m/s no dia 28/09/2012. ....	65
Figura 5.19 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 5 m/s no dia 21/10/2012.....	66
Figura 5.20 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 5m/s no dia 21/10/2012.....	67
Figura 5.21 - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 5m/s no dia 21/10/2012.....	67
Figura 5.22 - Simulação da circulação hidrodinâmica (módulo 2DH) com vento de 12m/s no dia 14/02/2012. ....	68
Figura 5.23 - Representação dos níveis observados x simulados para o ano de 2012.....	70
Figura 5.24 - Curva hipsométrica a partir dos dados de campo de batimetria, 2012.....	71
Figura 5.25 - Curva hipsométrica simulada pelo modelo hidrodinâmico, 2012. ....	71
Figura 5.26 - Comportamento hidrodinâmico das taxas de renovação nas estações plotadas na malha de elementos finitos, 2012. ....	72
Figura 5.27 - Simulação das taxas de renovação no açude Acarape do Meio, 2012.....	73
Figura 5.28 - Visualização espacial do tempo de residência no açude. ....	74
Figura 5.29 - Níveis volumétricos do açude Acarape do Meio, referentes aos anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.....	76
Figura 5.30 - Resposta espectral das imagens de satélite Landsat 5 – TM em 2001 e 2005. ..	78
Figura 5.31 - Resultado de clorofila <i>a</i> determinados em laboratório em 2001 e 2005.....	79
Figura 5.32 - Resposta espectral das imagens de satélite Landsat 5 – TM em 2008 e 2011. ..	80
Figura 5.33 - Resultado de clorofila <i>a</i> determinados em laboratório em 2008 e 2011.....	81
Figura 5.34 - Regressão linear entre o albedo das imagens Landsat 5 - TM e a clorofila <i>a</i> . ...	82
Figura 5.35 - Espacialização do resultado da reflectância do albedo nas imagens Landsat 5 – TM.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Coordenadas de localização das seções no leito do rio Pacoti e riacho Canabrava, 2012.....	42
Tabela 4.2 - Pontos amostrados para coleta da clorofila <i>a</i> e para os espectros das imagens Landsat 5 - TM. ....	45
Tabela 5.1 - Dados da área e do volume registrados na batimetria (2011) e do projeto (1924). ....	46
Tabela 5.2 - Parâmetros morfométricos primários da bacia hidrográfica e hidráulica - 2013. ....	47
Tabela 5.3 - Resultados morfométricos secundários da bacia hidrográfica e hidráulica - 2013. ....	48
Tabela 5.4 - Classificação do relevo da bacia hidrográfica do Acarape do Meio – 2013.....	51
Tabela 5.5 - Valores das áreas entre as cotas da bacia hidrográfica do açude. ....	52
Tabela 5.6 - Resultado da classificação da imagem ResourceSat-1 da bacia hidrográfica - 2012.....	54
Tabela 5.7 - Dados de clorofila <i>a</i> coletado e analisados em laboratório.....	77

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Evolução dos modelos matemáticos de qualidade de água. ....	21
Quadro 3.2 - Caracterização do sistema orbital Landsat 5 – TM. ....	28
Quadro 4.1 - Parâmetros morfométricos secundários da bacia hidrográfica e hidráulica.....	33
Quadro 4.2 - Definição da equação da quantidade do movimento 3D. ....	35
Quadro 4.3 - Definição da equação do continuidade do volume.....	35
Quadro 4.4 - Classificação do estado trófico de acordo com uso IET modificado por Toledo <i>et al.</i> , 1984.....	45

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Considerações Iniciais

O Nordeste brasileiro destaca-se quanto ao tema da indisponibilidade hídrica, por apresentar balanço hídrico negativo, inclusive, em algumas regiões a evaporação é o dobro da precipitação. Outrossim, o aumento pela demanda por esse recurso natural, com a consequente deterioração dos ecossistemas aquáticos tem ocasionado a escassez da qualidade em outras regiões do país.

No Brasil, em virtude do modelo de desenvolvimento urbano, aproximadamente 80% da população que reside nas cidades e domiciliadas próximos das fontes hídricas (rios, açudes, oceanos, etc.) ocasionado vários problemas relacionados à poluição e contaminação dos recursos hídricos, tornando-os impróprios para atender à demanda para abastecimento público e demais usos. Verifica-se ainda, que no processo de urbanização, tornam-se recorrentes as enchentes, em decorrência da ocupação inadequada destes espaços, bem como a falta de coleta e disposição inadequada do lixo, ocasionando assim, a degradação dos ambientes.

O avanço do processo de urbanização sem o devido planejamento social, econômico e ecológico tem ocasionado a degradação das bacias hidrográficas, mostrando-se assim, como um dos grandes desafios para as políticas públicas, que atualmente podem contar com a constante implementação dos instrumentos de controle, como o plano de bacia, enquadramento, outorga, cobrança e sistema de informações, previsto na Lei 9.433 de 1997.

A partir da década de 20, a modelagem matemática vem sendo implementada por pesquisas, sendo esta, uma ferramenta que pode ser aplicada ao apoio da gestão dos recursos hídricos para a elaboração de diagnósticos e prognósticos.

A gestão dos recursos hídricos no estado do Ceará tem avançado ao longo dos anos, sendo a modelagem computacional uma das ferramentas que está sendo inserida no modelo do gerenciamento dos sistemas hídricos adotado pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH)<sup>1</sup>. Além da modelagem, faz-se uso da geotecnologia para processamento de imagem. Dentre os vários açudes monitorados pela companhia, o açude

---

<sup>1</sup>O referido órgão está vinculado a Secretária de Recursos Hídricos, cuja atuação vem-se desenvolvendo desde o ano de 1993. A COGERH tem a missão de gerenciar os recursos hídricos de domínio do estado do Ceará e da União, por delegação, de forma integrada, descentralizada e participativa, incentivando o uso racional, social e sustentável, contribuindo para o desenvolvimento e a melhoria da qualidade da qualidade de vida da população.

Acarape do Meio foi escolhido devido a sua importância estratégica em atender parte da demanda dos usos múltiplos da cidade de Fortaleza.

A emancipação da cidade de Fortaleza ocorreu por Carta Régia no ano de 1725. O núcleo urbano desenvolveu-se as margens dos rios Maranguapinho, Cocó, Ceará, e em áreas de dunas móveis e fixas, planícies flúvio-marinhas, lagoas interdunares e tabuleiros sublitorâneos (RMF, 2013). O processo de urbanização sem a adequada infraestrutura tem desencadeado processo de mudança climática, instabilidade geológica, depreciações e deterioração do meio natural, refletindo em modificações negativas da qualidade da água dos corpos hídricos.

Fortaleza tem população aproximada de 2.482.185 habitantes (IPECE, 2012b), cujo abastecimento público é realizado, em parte, pelo açude Acarape do Meio. O referido açude está localizado no município de Redenção, que se destaca pelas temperaturas médias elevadas e precipitações em torno de 1.000 mm (IPECE, 2006). A irregularidade temporal das precipitações na região condiciona período de estiagem prolongado, que concomitantemente ao aporte de nutrientes provenientes dos efluentes, resíduos sólidos e demais fontes de poluição, tem resultado na alteração da hidrodinâmica.

Ressalta-se que os modelos matemáticos podem auxiliar no processo de identificação das falhas no planejamento estratégico, contribuindo assim, com a tomada de decisões através da simulação de cenários, sendo capazes de indicar as deficiências na espacialização da rede de monitoramento. Desta forma, auxiliam na tomada de decisões das instituições quanto ao processo de licenciamento ambiental de novos empreendimentos, com base em modelos de qualidade de água aplicados a estudos de impactos ambientais (LARENTIS, 2004).

A hidrodinâmica dos açudes pode ser alterada por fatores físicos, processo de eutrofização e pela sua morfometria. Segundo Sperling (1999), a morfometria trata da quantificação e medida dos diversos elementos da forma, para tanto necessita de um conjunto de métodos para medir as dimensões físicas de um dado sistema.

O uso de geotecnologias para determinar parâmetros morfométricos e processar imagem de satélite é fundamental para o gerenciamento de bacias hidrográficas. Segundo Novo (2010), no manual de sensoriamento remoto, consta que essa técnica teve início em 1860 e está dividida em dois períodos: 1860 a 1960, no qual se baseava na utilização de fotografias aéreas e o período de 1960 até os nossos dias, caracterizado pela multiplicidade de sistemas sensores.

## **1.2 Objetivos**

O presente estudo objetiva caracterizar alguns aspectos relacionados a morfometria, a circulação hidrodinâmica e a qualidade da água do açude de Acarape do Meio, localizado no município de Redenção, CE. A partir do uso de técnica de geoprocessamento realizou-se a análise dos parâmetros morfométricos. Quanto aos aspectos da hidrodinâmica, utilizou-se o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA para realizar modelagens computacionais da hidrodinâmica e com aplicação de técnica de sensoriamento remoto estimou-se os componentes opticamente ativos na água.

Específicos:

- Realizar análise morfométrica da bacia hidrográfica e hidráulica do açude Acarape do Meio, a partir da elaboração do banco de dados primários, secundários.
- Extrair mapas temáticos de delimitação de bacia hidrográfica, rede de drenagem, hipsométrico, relevo, uso e ocupação do solo, derivados de imagem Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e ResourceSat-1.
- Modelar aspectos do comportamento da circulação hidrodinâmica do açude, visando estimar qual forçante externo (vento, vazão) provocou maior alteração na hidrodinâmica para o ano de 2012.
- Espacializar a compartimentação temporal e espacial das taxas de renovação da água.
- Espacializar a compartimentação temporal e espacial do tempo de residência da água.
- Estimar os componentes ópticos ativos na água a partir de imagem Landsat 5 - TM.

## **1.3 Organização do Trabalho**

O presente estudo foi elaborado em seis capítulos. Os conteúdos relacionados a cada tópico estão descritos a seguir.

Capítulo I - Introdução: são apresentadas as considerações iniciais e os objetivos para desenvolver o presente estudo.

Capítulo II - Caracterização da área de estudo: faz-se uma breve contextualização do local onde está localizado o açude: descrição da área, tipo de solo, vegetação, indicadores socioeconômicos, uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica.

Capítulo III - Revisão Bibliográfica: apresenta material bibliográfico relacionados aos temas: morfometria, modelagem ambiental e qualidade da água. Quanto aos aspectos relacionados à morfometria cita-se: açudes, geomorfologia, sistemas de informações geográficas, SRTM. Quanto aos aspectos da modelagem ambiental menciona-se: modelagem matemática, calibração de modelos computacionais. Com relação aos aspectos da qualidade da água descreve-se sobre: sensoriamento remoto, componentes ópticos ativos na água, eutrofização.

Capítulo IV - Material e Métodos – Faz-se uma breve descrição das três técnicas aplicadas no presente estudo. Aplicação de geotecnologias: 1) geoprocessamento – aplicado na caracterização da área de estudo e na determinação dos parâmetros morfométricos primários e secundários, e 2) sensoriamento remoto – focalizado na determinação dos componentes ópticos ativos que causam alteração na qualidade da água. 3) Aplicação do modelo computacional para estimar o comportamento da circulação hidrodinâmica, da taxa de renovação e do tempo de residência da água do açude Acarape do Meio.

Capítulo V - Resultados e Discussões: apresentação dos resultados alcançados na pesquisa a partir da metodologia aplicada.

Capítulo VI - Conclusões: são citados os principais aspectos relevantes da pesquisa.

## CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

---

### 2.1 Descrição da Área

A bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio abrangem áreas dos municípios de Guaramiranga (6,75%), Pacoti (45,30%), Palmácia (21,81%), Mulungu (2,72%) e Redenção (23,43%). Nesse último município se localiza o referido açude, cuja unidade hidrográfica encontra-se nas Bacias da Região Metropolitana. O rio Pacoti é o principal afluente, cuja nascente está inserida no município de Guaramiranga-CE. Além deste, a rede de drenagem compõe-se do rio Canabrava, riachos Brenha, Calção e demais canais fluviais. Suas obras foram concluídas no ano de 1924 pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).

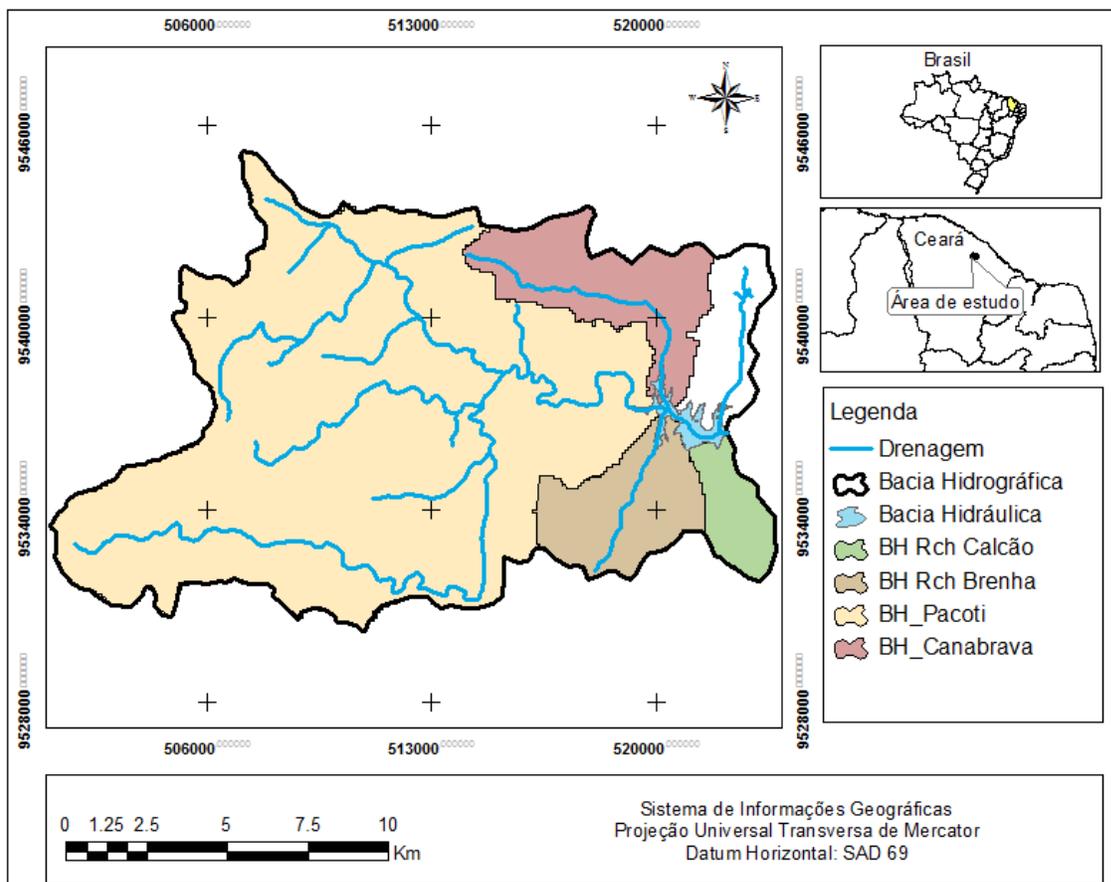
Desde sua emancipação em 1725, a população de Fortaleza usava as águas dos rios, riachos, lagoas e açudes para atender a demanda. Nesta época, não existia sistema de abastecimento d'água e a população usufruía das águas desses mananciais sem nenhum tratamento. Pesquisas realizadas pela ANA (2010) enfatizam que em 1927, parte da população passou a ser atendida com água tratada pelo sistema de adução proveniente do açude Acarape do Meio. Em 1960, esse sistema se encontrava deficiente devido ao crescimento populacional, assim em 1981, passou a funcionar o sistema Pacoti - Riachão-Gavião; posteriormente, inseriu-se a esse sistema o açude Pacajus (construído em 1993).

Atualmente, o sistema de abastecimento não garante com eficiência a demanda da Região Metropolitana de Fortaleza - RMF, formada por 13 municípios (Aquiraz, Caucaia, Chorozinho, Eusébio, Fortaleza, Guaiúba, Horizonte, Itaitinga, Maracanaú, Maranguape, Pacajus, Pacatuba, São Gonçalo do Amarante), com cerca de 3,5 milhões de habitantes (IPECE, 2012b) e aos distritos industriais localizados em alguns desses municípios, se sobressaindo, nesse contexto, a opção política pela transferência das águas de outras bacias, através de projetos denominados: Eixão das Águas e a Transposição do Rio São Francisco, ambos em fase de conclusão. Cita-se ainda o Canal do Trabalhador, construído em 1993 com 98 km de extensão, que interliga o rio Jaguaribe e o açude Orós ao açude Pacajus, que abastece Fortaleza.

A bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio - CE apresenta porte médio, com área de drenagem de 210 km<sup>2</sup>, subdividida em quatro sub-bacias hidrográficas (Figura 2.1), sendo que a principal contribuição é proveniente da sub-bacia do rio Pacoti (154,26 km<sup>2</sup>) e

demais aporte das sub-bacias do rio Canabrava (21,31 km<sup>2</sup>), riacho Brenha (16,15 km<sup>2</sup>) e riacho Calção (6,69 km<sup>2</sup>).

**Figura 2.1** - Bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio subdividida em áreas contribuintes dos afluentes.



Fonte: COGERH, 2013.

Segundo a SRH (2001), o clima da área em estudo se apresenta bastante homogêneo, as variações climáticas registradas são diretamente associadas ao regime pluviométrico e decorrem, fundamentalmente, das seguintes condições:

- Proximidade do litoral, onde os índices pluviométricos são mais elevados e as temperaturas mais estáveis.
- Relevo acidentado, onde ocorrem precipitações orográficas que se somam a temperaturas mais baixas em decorrência da altitude.
- O clima predominante é quente e estável, de elevadas temperaturas e reduzidas amplitudes, com acentuada taxa de insolação, forte poder evaporante, e acima de tudo, com um regime pluviométrico marcadamente irregular.

Segundo a classificação de Köppen (1931), a área da bacia apresenta zona climática: clima tropical chuvoso de monção, com estação chuvosa atrasada para o outono, em vez do verão. As áreas serranas sujeitas a chuvas orográficas, os índices pluviométricos são superiores a 1.400 mm.

## 2.2 Solos

Os principais grupos de solos predominantes na área da bacia hidrográfica do açude são: Argilossos Vermelho Amarelo distrófico e Luvisolos (Figura 2.2).

- Argilossos Vermelho Amarelo distrófico (VAd)

Ocorrem predominantemente na zona pré-litorânea, em relevo plano a suavemente ondulado, ou na região da serra do Baturité, em relevo forte ondulado a montanhoso. São profundos, geralmente bem drenados (exceto os de caráter plúntico, que são de moderada a imperfeitamente drenados), ácidos a moderadamente ácidos, porosos a muito porosos, e de textura variando de arenosa/média a argilosa. A coloração é muita variada, indo desde tonalidades vermelho amareladas até bruno-acizentadas. Apresentam baixa fertilidade natural e forte acidez, recomendando-se o uso de fertilizantes e a correção do pH. O uso intensivo de maquinários agrícolas nos solos com textura superficial leve deve ser evitado, para evitar o desencadeamento de processos erosivos (ANA, 2010).

Neste tipo de solo se adaptam as culturas de milho, feijão, mandioca e cajueiro, além se áreas com pastagens naturais destinadas a criação da pecuária extensiva. Constitui importante limitação ao uso agrícola, além da baixa fertilidade natural, o longo período de estiagem e a irregularidade na distribuição das precipitações pluviométricas (SRH, 2001).

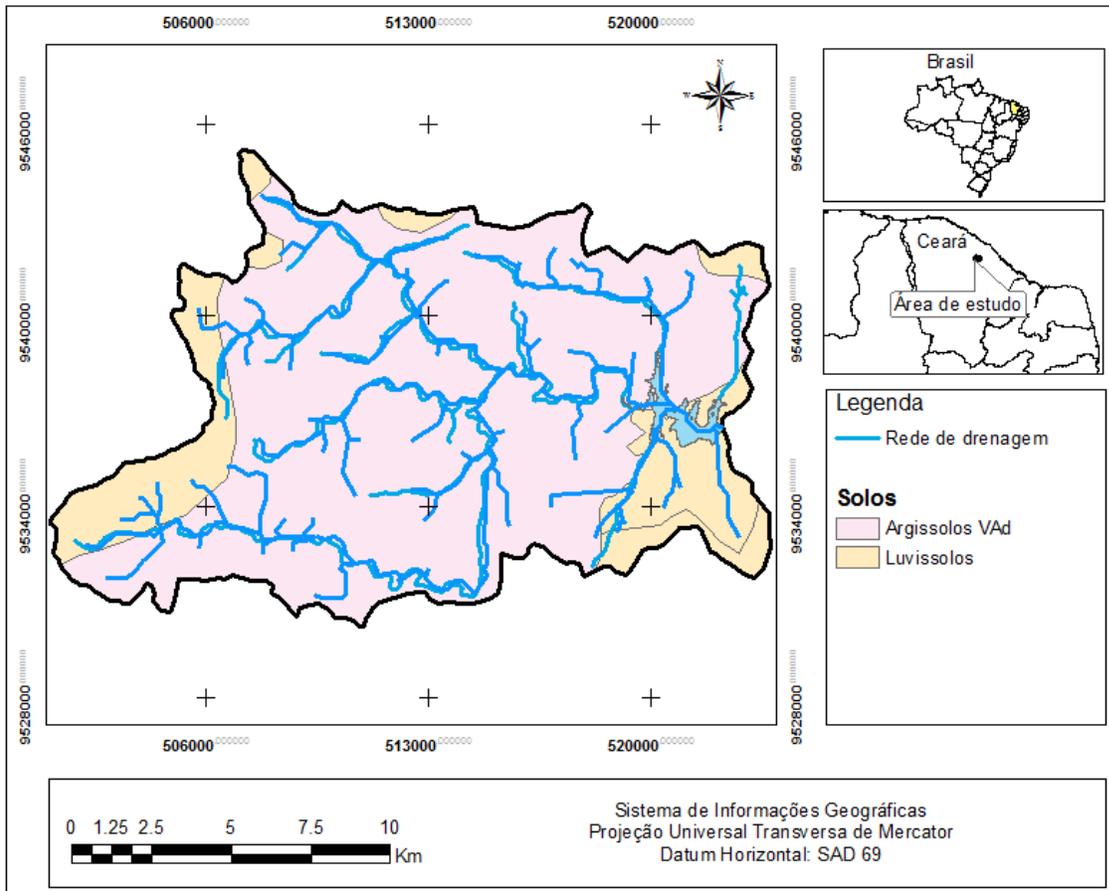
- Luvisolos

Ocupam terrenos de relevo variado desde plano até montanhoso e originados a partir de materiais distintos. São bem desenvolvidos, às vezes rasos, com horizonte B textural, argila de atividade baixa, média a baixa acidez, e fertilidade natural média a alta. Na maioria dos casos são solos moderadamente drenados, não raro imperfeitamente a bem drenados, com os solos rasos ou com plinthite apresentando drenagem moderada ou imperfeita (ANA, 2010).

No uso agrícola estes solos se adaptam para cultivo de milho, feijão, mandioca, algodão e pecuária extensiva, nas áreas onde predomina relevo menos movimentado. Para o

aproveitamento racional com agricultura, estes solos exigem práticas de conservação simples nas áreas de relevo suave ondulado e de maior complexidade à medida que o relevo vai se tornando mais movimentado. Práticas simples de adubação podem ser necessárias (CEARÁ, 1995).

**Figura 2.2** - Solos predominantes na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio.



### 2.3 Vegetação

A vegetação predominante na área de estudo é composta por Floresta Caducifolia Espinhosa “Caatinga Arbórea, Caatinga Arbustiva Densa, Caatinga Arbustiva Aberta”, Floresta Subperenifolia Tropical Plúvio-Nebular “Mata Úmida” e Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial “Mata Seca”.

- Floresta Caducifolia Espinhosa

Associando-se aos domínios dos terrenos cristalinos da Depressão Sertaneja, onde a deficiência hídrica é a característica mais marcante juntamente com solos de pouca profundidade, frequentemente revestidos por pavimentos detríticos “seixos”. Constitui a vegetação típica dos sertões nordestinos, ostentando padrões fisionômicos e florísticos heterogêneos, e faixas de transição para outras unidades fitoecológicas. Apresenta espécies arbóreas e arbustivas, podendo ser densa ou aberta, refletindo as relações mútuas entre os componentes do meio físico, tais como: relevo, tipo de rocha, tipo de solo e grau de umidade (ANA, 2010).

Este tipo de vegetação encontra-se bastante descaracterizada, tanto pela interferência antrópica, através da agricultura, pecuária e retirada de lenha, como pela incidência de períodos críticos de estiagem acentuada. A degradação da caatinga arbórea determina a maior expansão das espécies arbustivas, reduzindo a diversidade da flora e modificando o equilíbrio ecológico. Tendo em vista os fatores limitantes para a atividade agrícola (clima, profundidade do solo, pedregosidade superficial, deficiência hídrica e erosão), tem-se praticado nesses ambientes uma agricultura nômade, em que, após dois ou três anos, a área é abandonada, favorecendo o aparecimento de uma vegetação secundária (capoeira) que não oferece nenhuma proteção ao solo e não possui nenhum valor econômico (CEARÁ, 1995).

- Floresta Subperenifolia Tropical Plúvio-Nebular

Localiza-se nos setores mais elevados das serras de Maranguape, Baturité, Aratanha, Juá e Conceição. A altitude e a exposição aos ventos úmidos, que favorecem as chuvas orográficas, são os principais fatores que condicionam a instalação desse ecossistema. As condições de acentuada umidade nas vertentes de barlavento determinam a formação de solos profundos, da classe Podzólico Vermelho Amarelo, favorecendo a fixação desse revestimento vegetal de grande porte. Sua composição florística caracteriza-se por árvores que alcançam até 30 m, com espécies que conservam 75 a 100% das folhas durante o ano (ANA, 2010).

- Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial

Recobre os níveis inferiores (meia encosta) e vertentes de sotavento dos relevos acima citados, assim como dos serrotes que se distribuem no território das Bacias

Metropolitanas. Ocorre em setores de declividade média a alta, com solos rasos, do tipo Litólico, onde os afloramentos rochosos são frequentes e a temperatura é mais elevada do que no ambiente da floresta úmida.

Essas características são mais marcantes nas encostas voltadas para oeste (sotavento), onde o intemperismo físico é o principal processo modelador da paisagem. Trata-se de uma cobertura vegetal de porte arbóreo, intermediária entre floresta úmida e caatinga que circunda esses relevos. A maioria das espécies apresenta queda de folhas nos períodos de estiagem. Destaca-se, entre outras, as seguintes espécies: angico (*Anadenanthera macrocarpa*), aroeira (*Astronium urundeuva*), Gonçalo Alves (*Astronium fraxinifolium*), mulungu (*Erythrina velutina*) e sipaúba (*Thiloa glaucocarpa*) (SRH, 2001). Essas áreas têm sido exploradas agricolamente, embora haja restrições de uso devido aos riscos de erosão. Em consequência dos desmatamentos, alguns setores das vertentes secas estão sendo amplamente ocupados pela vegetação de caatinga, a qual já atinge níveis topográficos elevados.

Conforme ANA (2010), esporadicamente pode ser encontrada em alguns setores um padrão de vegetação que apresenta similaridades com o cerrado. Tal semelhança pode ser identificada não só pela fisionomia da vegetação, mas também pela presença de espécies peculiares a esse tipo de vegetação, algumas delas representando formas variantes e outras sem correspondentes no cerrado, embora com adaptações equivalentes de natureza escleromorfa. As principais espécies encontradas neste ambiente são: *Curatella americana* (lixreira), *Anacardium occidentale* (cajuzeiro), *Stryphnodendron coriaceum* (barbatimão), *Anacardium humile* (cajuí), entre outros.

## 2.4 Indicadores Socioeconômicos

O açude Acarape do Meio localiza-se na zona rural do município de Redenção que tem população de 11.281 habitantes. A sede do município tem população estimada em 15.134 habitantes, no entanto, fica localizada fora da bacia hidrográfica, jusante do reservatório. A densidade demográfica é de 117,09 hab./km<sup>2</sup> (IPECE, 2012b).

O município apresenta Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) em 2000 de 0,651. Esse índice varia de 0 a 1, quanto mais se aproxima de 1, maior o IDH de um local. Os critérios utilizados para calcular o IDH são: grau de escolaridade; Renda Nacional Bruta (RNB) per capita, baseada na paridade de poder de compra dos habitantes e nível de saúde.

O Índice de Desenvolvimento Municipal (IDM) para o município de Redenção foi de 29, referente ao ano de 2010, ou seja, dentre os 184 municípios do estado do Ceará avaliados, Redenção ficou numa colocação razoável (IPECE, 2012b).

Os proprietários rurais são formados principalmente por pequenos e médios produtores. As culturas de subsistência mais representativas da região é o feijão, milho, arroz, em análogo a criação de bovinos, suínos, caprinos.

## 2.5 Uso e Ocupação do Solo na Bacia Hidrográfica

Em consequência dos múltiplos usos, é recorrente observar-se as diversas irregularidades na bacia hidrográfica e hidráulica do açude como: desmatamentos e queimadas das áreas de preservação permanente; aporte de efluentes e resíduos sólidos; irrigações nas margens da bacia hidráulica ou próxima ao leito dos rios, com consequente utilização de fertilizantes e agrotóxicos; pesca predatória; matadouros localizados nas margens dos rios afluentes (Figura 2.3).

**Figura 2.3** - Plantação de milho e lançamento de efluentes dentro da área de preservação permanente do açude.



Pesquisa realizada por Oliveira (2010), a partir do processamento de imagem de satélite, também identificaram através de mapeamento do uso e ocupação das nascentes do rio Pacoti, por quantificação das florestas, com concentração de uso agrícola, vários impactos negativos como: modificação da cobertura vegetal, alterações na permeabilidade dos solos, deslizamentos de terra, erosão e posterior assoreamento dos açudes, poluição dos solos e dos rios afluentes do Rio Pacoti, que tem ocasionado alterações significativas na bacia hidrográfica.

## CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

O embasamento teórico abordado neste capítulo foca temas cuja análise dos resultados encontra-se no capítulo 5. O capítulo faz inferência aos tópicos que se relaciona com os temas abordados para desenvolver a dissertação: morfometria, modelagem ambiental e componentes ópticos ativos presente na água, cuja descrição encontra a seguir.

Os **açudes** podem apresentar características hidrodinâmicas que variam de acordo com as condições dos fatores ambientais, ou seja, podem apresentar processos de estabilização da coluna de água ou mistura-se completamente. Tais aspectos foram considerados neste trabalho e que ocorrem naturalmente em reservatórios do semiárido.

A aplicação de geotecnologia na análise morfométrica da bacia hidrográfica e hidráulica do açude contam com elaboração de um banco de dados primários e secundários calculados com auxílio do uso de **sistemas de informações geográficas** para trabalhar dados **geomorfológicos**, de batimetria e imagens **SRTM**.

Quanto à **modelagem computacional** empregada para realizar a modelagem ambiental, explicitou-se sobre as principais equações governantes dos modelos: hidrodinâmico, Euleriano e Lagrangeano, fazendo menção ao processo de **calibração de modelos**.

Também se fez uso da aplicação de técnica de **sensoriamento remoto** para processar imagem de satélite Landsat 5 – TM e estimar os **componentes ópticos ativos** na água, com objetivo de verificar a evolução dos processos da **eutrofização** da água armazenado no açude.

### 3.1 Açudes

Os açudes são sistemas complexos, apresentam mecanismos de regulação, controle e retroalimentação. Os mesmos podem ser construídos com múltiplas saídas (superficial, camadas mais profundas ou pelo fundo) para atender a retirada de água de melhor qualidade para as demandas. Entretanto, a retirada excessiva de um determinado nível na coluna de água pode ocasionar modificações no processo de estratificação, alterando assim, a posição da camada durante a retirada excessiva (TUNDISI & TUNDISI, 2008).

Os reservatórios resultam da construção de estruturas de engenharia para represar um rio e criar uma bacia artificial com finalidades de múltiplos usos: controle de enchentes,

navegação, recreação, geração de energia elétrica, abastecimento de água (MARTIN & MCCUTCHEON, 1998).

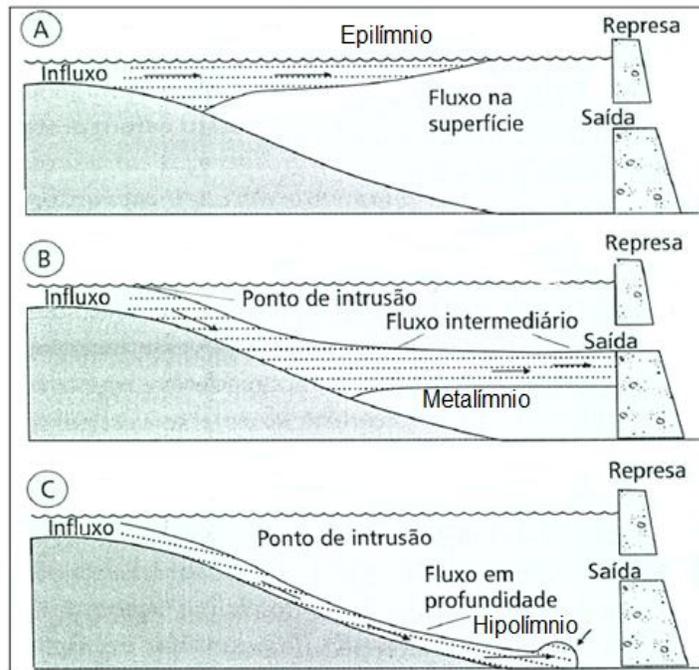
O primeiro açude construído no ano de 1909 no Ceará foi o Cedro, localizado no município de Quixadá, cujas obras foram iniciadas na época do império, com o objetivo de mitigar os efeitos da escassez de água na região, em consequência das secas. Atualmente é considerado um ponto turístico.

Os açudes têm uma grande importância econômica e social no semiárido do Nordeste do Brasil, pois nos períodos de estiagem as atividades humanas que dependem dos mananciais ficam comprometidas pela escassez dos recursos hídricos (CEBALLOS, 1995).

A distribuição vertical de vazões tributárias dos açudes é fortemente influenciada pela compatibilidade entre as densidades das águas afluentes e os perfis verticais de densidade do lago e açude; pois, as águas mais densas tenderão a se localizar nas camadas mais profundas, enquanto que águas com baixas densidades relativas serão distribuídas nas camadas próximas à superfície, ocasionando a distribuição vertical das vazões tributárias, através de regiões estratificadas da coluna d'água (IBAMA, 2005).

O processo de estratificação térmica em açudes ocasiona diferentes correntes de densidades. Experiências realizadas por Assireu *et al.* (2009), em laboratório constataram que, quando a temperatura da água do rio afluente é maior que a do açude, o rio fluirá como uma camada superficial, na altura do epilímnio (Figura 3.1 A). Se tiver uma temperatura mais baixa do que a do epilímnio e mais alta do que a do hipolímnio do açude, ele fluirá nas camadas intermediárias, na altura do metalímnio (Figura 3.1 B). Se o rio tiver uma temperatura mais baixa que a do hipolímnio do açude mergulhará e seguirá sua antiga calha, fluindo sob o açude, abaixo do hipolímnio (Figura 3.1 C).

**Figura 3.1-** Processos de intrusão em reservatórios estratificados.



Fonte: Strackraba & Tundisi, 2000, *apud* Tundisi & Tundisi, 2008, adaptado.

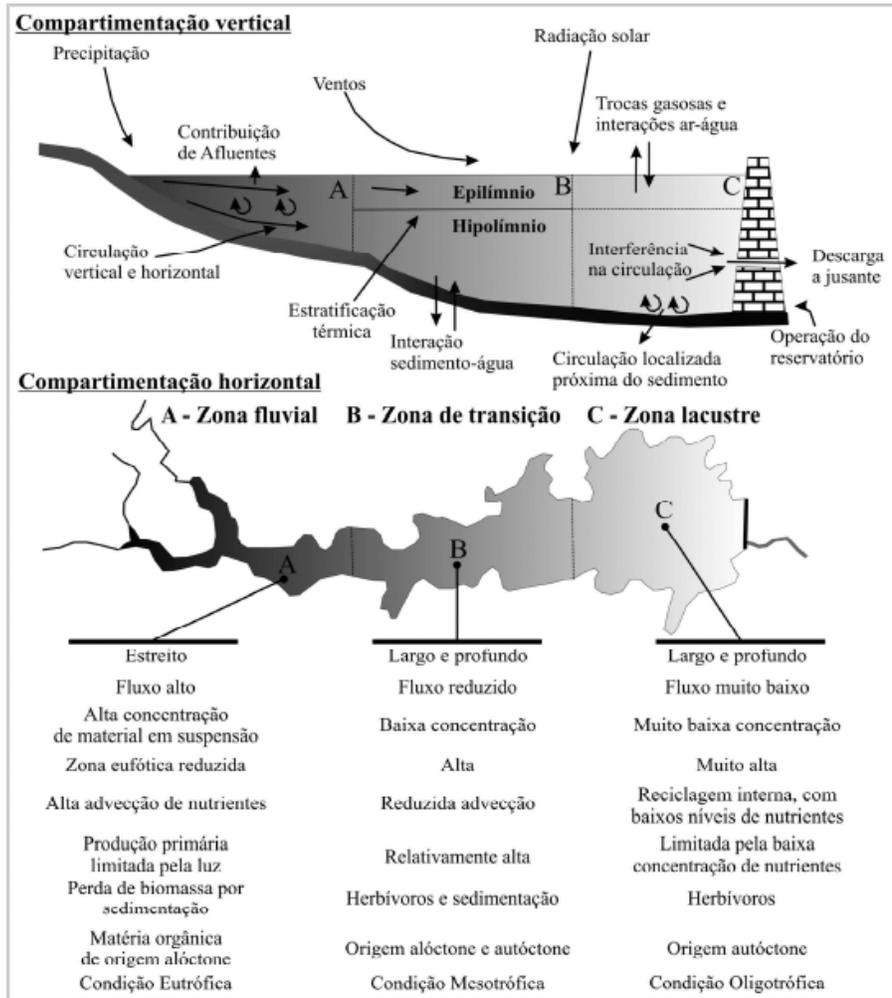
Os reservatórios caracterizados por fluxos lênticos podem ser subdivididos em compartimentos ou zonas longitudinais (Figura 3.2), que se diferenciam por apresentar processos físicos, químicos e produtividade biológica distinta (STRACKRABA & TUNDISI, 2000 *apud* TUNDISI & TUNDISI, 2008).

1) Zona de rio: considerada a zona mais eutrofizada, mais estreita, rasa, fluxo alto, alta concentração de nutrientes e matéria orgânica alóctone.

2) Zona de transição: menos eutrófica, longa, profunda, fluxo reduzido, concentração de nutrientes e matéria orgânica intermediários.

3) Zona lacustre: mais oligotrófica, mais larga, mais profunda, fluxo reduzido, concentração de nutrientes e matéria orgânica reduzida.

**Figura 3.2** - Zonas verticais e longitudinais de reservatórios em zonas temperadas.



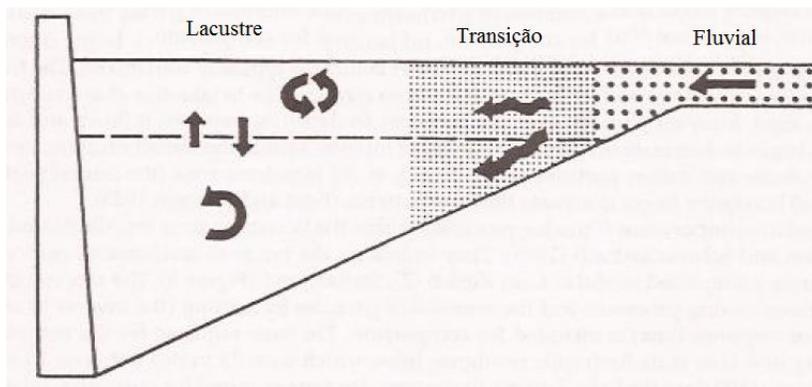
Fonte: Adaptado de Tundisi, 1999, (Compartimentação vertical); Kimmel *et al.* 1990, (Compartimentação horizontal) *apud* Wachholz, 2011.

Este conceito de compartimentação de ambiente aquático foi apresentado por Araújo (2005) para ambientes lóticos, cujas zonas apresentam mudanças nas características estruturais e funcionais de comunidades aquáticas e distribuição de matéria orgânica desde a nascente até a foz nos rios. Conforme o autor supracitado, as zonas de nascente são heterotróficas, sendo a produção de oxigênio é menor do que a respiração ( $P < R$ ). Nos trechos intermediários o sistema é autotrófico, produção maior do que a respiração ( $P > R$ ). Nos ambientes inferiores, ou próximos à foz, o fluxo lento e a turbidez limitariam a produtividade primária, resultando em produção de oxigênio menor do que respiração “consumo” ( $P < R$ ). A heterogeneidade das espécies aquáticas é menor nas nascentes e nos trechos inferiores do que nos zonas intermediárias.

A maioria dos lagos brasileiro são rasos e polimíticos, onde se verifica que o teor de matéria orgânica juntamente com as altas temperaturas ocasiona a desoxigenação da água, mais do que processo de estratificação térmica. A presença de matéria orgânica dissolvida e particulada aumenta no período de chuvas, que se origina no próprio ecossistema aquático por ressuspensão do sedimento ou a partir das águas tributárias e águas de escoamentos superficiais (ESTEVES, 1998).

Segundo Martin & McCutcheon (1998) o processo de mistura ou turbulência das águas nos reservatórios são ocasionadas por: a energia de mistura que resultam de entradas, que incluem afluxos dos tributários, escoamento superficial e descargas de águas residuárias ou de resfriamento; a energia de mistura de saídas ou retiradas, representados por descargas naturais ou por estruturas“tomada d’água”;a transferência de energia através da interface ar-água devido ao vento e outras condições meteorológicas como alteração da energia térmica devido à radiação, sensibilidade da traferência de calor e evaporação (Figura 3.3).

**Figura 3.3** - Zonas de misturas em reservatórios desestratificados.



Fonte: Thornton *et al.* 1981, *apud* Martin & McCutcheon, 1998, adaptado.

A maioria dos lagos tropicais apresenta profundidade reduzida (menores que 20 m), onde a variação sazonal da temperatura é menos significativa em relação à variação diária, e em consequência disto, ocorrem estratificações e desestratificações diárias da coluna de água, sendo que, a maior estabilidade térmica ocorre por volta das 16-17 horas e a desestratificação ocorre no horário noturno, devido à perda de calor para a atmosfera (ESTEVES, 1998).

Processos físicos frequentemente simulados em modelagem matemática incluem fluxos e padrões de circulação, dispersão, mistura, temperatura da água e distribuição de

densidade que é função da temperatura, salinidade e concentração de sólidos suspensos sobre a coluna de água.

A caracterização morfométrica da bacia hidráulica do açude Acarape do Meio com base nos parâmetros desenvolvimento do volume e profundidade relativa indicam que a hidrodinâmica é típica de ambientes desestrificados, pois forçantes externos como vento é capaz de ocasionar a mistura completa da coluna de água.

Os ambientes lacustres sofrem diversas modificações ao longo do tempo, as quais conduzem a uma redução gradativa do volume de água. Desta maneira os parâmetros morfométricos que espelham as distintas características da forma do lago, também sofrem as correspondentes alterações (SPERLING, 1999). Conforme o mesmo, os processos de sedimentação, tanto de natureza física “operação de represas, alterações hidrológicas” quanto biológica, provocam a diminuição da profundidade máxima, modificando consequentemente o desenvolvimento do volume e a profundidade relativa do lago.

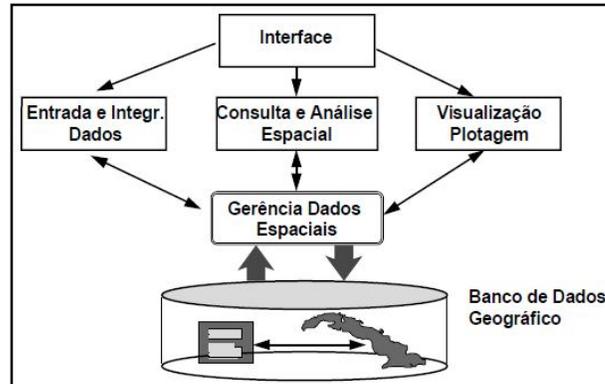
### **3.2 Sistema de Informações Geográficas**

Segundo Câmara & Queiroz (2013), o Sistema de Informações Geográficas (SIG) é um tipo especial de sistemas de informações, utilizados para manipular, sistematizar, sintetizar, pesquisar, editar e visualizar informações, geralmente armazenada em bases de dados computacionais, tais como: números, textos, figuras, tabelas, sons, mapas e imagem de superfície terrestre e atualmente, há uma grande diversidade de oferta, com pelo menos quatro grande tecnologias complementares:

- Os “Gis desktop”, com interface amigáveis e crescentes funcionalidades. Caracteriza-se por sistemas com operações gráficas e de análise espacial sobre arquivos.
- Os “Gerenciadores de Dados Geográficos”, que armazenam os dados espaciais em ambiente multiusuário. Armazenam tanto a geometria como os atributos dos objetos dentro de um sistema gerenciador de bancos de dados (SGBD).
- Os “Componentes GIS”, ambientes de programação que fornecem os insumos para que o usuário crie seu próprio aplicativo geográfico. Desenvolvimento de aplicativos dirigidos especificamente para um cliente com ambiente de componentes com tipos de dados geográficos básicos e métodos de acesso e apresentação, cuja linguagem de programação mais comum é a *Visual Basic*.

Os “Servidores Web de Dados Geográficos”, utilizados para publicação e acesso a dados geográficos via Internet. As bibliotecas geográficas digitais é um banco de dados compartilhado por um conjunto de instituições. Esta biblioteca deve ser acessível remotamente e armazenar, além de dados geográficos, descrições acerca dos dados “metadados” e documentos multimídia associados “texto, fotos, áudio e vídeo”.

**Figura 3.4** - Estrutura geral de sistema de informações geográficas.



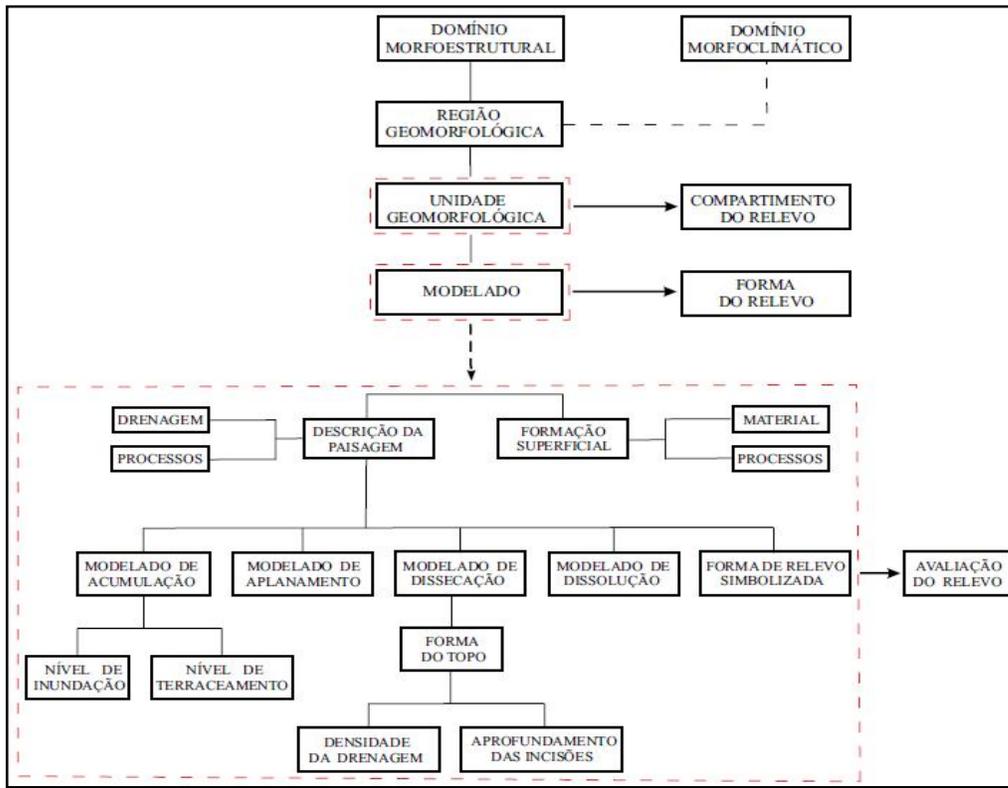
Fonte: Câmara & Queiroz, 2013.

### 3.3 Geomorfologia

A geomorfologia é uma ciência que tem por objetivo interpretar e compreender as formas do relevo, buscando o entendimento dos processos passados e atuais. A análise incorpora o necessário conhecimento das formas contrárias, vinculadas pelas atividades tectônicas “estruturas”, e mecanismos morfoclimáticos “esculpimento”, responsáveis pelas fisionomias da superfície terrestre (CASSETI, 1995).

Os estudos geomorfológicos têm como princípio básico o ordenamento dos fatos geomorfológicos de acordo com uma classificação temporal e espacial, na qual se distinguem os modelados como unidade básica e seus grupamentos hierarquicamente relacionados. Para a individualização destes conjuntos de feições são considerados como parâmetros fatores causais, de natureza estrutural, litológica, pedológica, climática, e morfodinâmica, responsáveis pela evolução das formas de relevo e pela composição da paisagem no decorrer do tempo geológico. De acordo com a ordem decrescente de grandeza são identificados: domínios morfoestruturais, regiões geomorfológicas, unidades geomorfológicas, modelados e forma de relevo representado na Figura 3.5 (IBGE, 2009).

Figura 3.5 - Estrutura da geomorfologia.



Fonte: IBGE, 2009.

### 3.4 SRTM

A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) é um projeto entre *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Os dados de radar foram coletados no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000 (durante 11 dias), a bordo da nave espacial Endeavour. Nesse período, a nave realizou 16 órbitas diárias na Terra, o que correspondeu a 176 órbitas durante toda a missão. O radar entereoscópico capturou a energia refletida entre as bandas C “comprimento de onda de 5,6 cm” e X “comprimento de onda de 3,0 cm” (EMBRAPA, 2013).

O propósito da missão SRTM foi atuar na produção de um banco de dados digitais para todo o planeta, necessários na elaboração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) das terras continentais. Os dados foram produzidos para a região do planeta posicionada entre os paralelos 56°S e 60°N. O método de coleta dos dados do SRTM é conhecido como interferometria SAR. Por esse método, duas antenas SAR coletaram dados de radar separadas por um braço extensor de 60 metros e para geração de dados topográficos foi utilizado software inter-

ferométrico. Os dados são distribuídos em formato raster pelo EROS Data Center, controlado pelo United States Geological Survey (USGS) e podem ser acessados em formato HGT, com resolução radiométrica de 16 bits. Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são organizados em tiles de 1°x1° e oferecem 30 m de resolução vertical para os Estados Unidos e 90 m de resolução vertical para as outras localidades (EMBRAPA, 2013).

### **3.5 Modelagem Computacional**

Um modelo é uma simplificação representativa de um objeto real, processo, conceito ou sistema, que podem ser agrupados em diferentes esquemas e ser representado por uma equação ou um conjunto de equações, que transmite uma compreensão conceitual de um sistema ou processo em termos quantitativos (RECKHOW & CHAPA, 1983).

A modelagem consiste na tradução para a linguagem matemática do modelo conceptual do fenômeno de interesse. Os diferentes modelos matemáticos são diferentes arranjos, incluindo um número maior ou menor de causas e efeitos, e de agentes intervenientes em diferentes formas. Por esta razão os modelos matemáticos são a grande encruzilhada do processo de modelagem, pois dependendo da possibilidade de resolvê-los, quatro rotas são possíveis, tais modelo são: físico, numérico, analítico e analógico (ROSMAN *et al*, 2001).

Os modelos matemáticos têm evoluído desde os primeiros anos do século XX. Em 1925 ocorreu o primeiro estudo com uso do modelo Streeter e Phelps aplicado à qualidade de água no rio Ohio, onde se verificou o decaimento da matéria orgânica pela curva da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e de oxigênio dissolvido, sendo que, a partir de 1960, ocorreu o avanço para sistema mais complexo, devido à inovação dos computadores que culminou na subdivisão (Quadro 3.1) da evolução do desenvolvimento dos modelos (CHAPRA, 1997).

**Quadro 3.1-** Evolução dos modelos matemáticos de qualidade de água.

Período	Problema	Variáveis	Sistema	Cinética	Método
1925 - 1960 Streeter e Phelps	Efluentes primário não tratados	DBO/OD	1D	Linear	Analítico
1960 - 1970 Computadores	Efluente primário e secundário	DBO/OD	1D, 2D	Linear	Analítico e numérico
1970 - 1977 Biologia	Eutrofização	Nutrientes	1D, 2D, 3D	Não linear	Numérico
1977 - Atual Tóxicos	Elementos tóxicos	Orgânicos e metais	Interação água/sedimento	Linear	Analítico e numérico

Fonte: Chapra, 1997.

Conforme Fragoso *et al.* (2009), existem mais 4.000 modelos ecológicos diferentes sendo utilizados como ferramentas de pesquisa e gerenciamento ambiental, cujo início ocorreu na década de 20, mas o uso abrangente dos métodos numéricos ecológicos deu-se a partir dos anos 70, em consequência do avanço e acessibilidade aos computadores, sendo extremamente importante encontrar um equilíbrio entre complexidade e foco do problema, visto que, existem muitos problemas no desenvolvimento desta técnica:

- Frequentemente não se tem informação suficiente para desenvolver ou aplicar um modelo.
- A estimativa dos valores dos parâmetros ainda requer muito esforço computacional, de campo e experimental.
- Nem sempre os modelos refletem as reais propriedades dos ecossistemas, em particular suas adaptabilidades e habilidades de reconhecer uma mudança de estado do ecossistema quando submetido a fortes distúrbios.

Um modelo matemático é a representação de algum objeto ou sistema em uma linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas perante diferentes entradas. Quanto maior o número de entrada, mais complexo fica o modelo, que podem subdividir-se em modelos de bacia hidrográfica, de rios, de lagos e estuários, de açudes, de qualidade de água e ecológicos (FRAGOSO *et al.*, 2009). Conforme o autor, os modelos matemáticos podem ser classificados sobre vários critérios, ou seja, dependem de

variáveis externas e de estado, das aproximações matemáticas utilizadas e do comportamento do ecossistema aquático, podendo ser representado por:

- Linear x Não Linear - Na equação linear a variável aparece elevada a potência de ordem 1, caso contrário, ela torna-se não linear.

- Contínuo x Discreto - No modelo contínuo, as funções são contínuas no tempo, ou seja, as mudanças ocorrem continuamente com o avanço tempo. No modelo discreto, as mudanças nas variáveis ocorrem aleatória ou em intervalos discretos independentemente da passagem do tempo.

- Estático x Dinâmico - No sistema estático ou que tem um estado estável (permanente), suas entradas e saídas não variam com a passagem do tempo. Quando o sistema depende do tempo é denominado de dinâmico (não permanente).

- Concentrado x Distribuído - No modelo concentrado considera-se que a espacialização das variáveis físicas, químicas e biológicas é homogênea em ambientes bem misturados (pequenas dimensões). No modelo distribuído leva-se em conta a heterogeneidade das variáveis nos ambientes (grandes dimensões).

- Estocástico x Determinístico - No sistema determinístico as variáveis de estado ou as mudanças são bem definidas, ou seja, as relações entre as funções governantes e as variáveis de estado são fixadas e as saídas são únicas. No entanto, se ocorrer alguma aleatoriedade ou probabilidade associada com uma das variáveis de saída do modelo, o mesmo é denominado de estocástico.

- Conceitual x Empírico - No modelo conceitual são considerados as características físicas. No Empírico, os valores calculados são ajustados aos dados observados por meio de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

Conforme Von Sperling (2007), as principais limitações dos modelos ambientais são: não linearidade das equações, dificuldade na representação dos sistemas em escala real, dificuldade na quantificação das reações bioquímicas, elevado número de parâmetros e variáveis de estado atuais e problemas de identificação em diversas equações no modelo.

Em Angelini (1995), constam as principais fases para a elaboração de um modelo matemático, independentemente do tipo a que se aplica, ou seja, de rios, de açudes, de qualidade de água. A mesma salienta que estas fases nem sempre se desenvolvem como descrito abaixo, pois muitas vezes elas interagem devido as novas descobertas e problemas que vão surgindo à medida que o modelo vai sendo elaborado.

- Reconhecer e delimitar o sistema de interesse expressando-o, inicialmente sobre forma verbal e, posteriormente, criando o diagrama conceitual para visualizar as interações entre os componentes.

- Escolher a estrutura quantitativa geral, selecionando as formas funcionais das equações e a unidade básica de tempo, codificando-as no computador para a realização das simulações. Estas estruturas podem ser: equações diferenciais ou de diferença, matriz algébrica e modelos de compartimentos.

- Observar a validade do modelo a fim de confirmar se este é adequado para satisfazer os objetivos propostos. Esta fase compreende:

- a) Análise de sensibilidade: mede-se a sensibilidade dos parâmetros, isto é, em que medida os parâmetros modificam os resultados do modelo e, conseqüentemente, do ecossistema.

- b) Calibração: descobre-se que valores minimizam a diferença entre os dados observados e os calculados pelo modelo.

- c) Validação: é o teste que o modelador fará para saber se os parâmetros encontrados na calibração são válidos para outros períodos do mesmo sistema.

Segundo Amanda (2007), através da aplicação da modelagem hidrodinâmica é possível obter em cada instante de tempo o padrão de circulação de um corpo de d'água, sendo que, os modelos podem ser tridimensionais, bidimensionais ou unidimensionais:

- Modelos tridimensionais: podem ser gerais (3Dg) ou simples (3D). Os modelos 3Dg possuem todas as dimensões (x, y, z, t) e incluem todas as equações; incluindo também gradientes de densidade, podendo ser aplicados a qualquer caso. O modelo 3D não inclui gradientes de densidade, possuindo uma hidrodinâmica mais simples, sendo aplicado a locais onde não há ou a estratificação pode ser desprezada.

- Modelos bidimensionais: são divididos em dois tipos. Podem ser bidimensionais em planta (2DH) e bidimensionais em perfil (2DV). Nos modelos 2DH o fluxo é promediado na vertical, cujas dimensões são: x, y e t. Estes modelos são aplicáveis a corpos d'água pouco estratificados tendendo a verticalmente homogêneos. Os modelos 2DV se aplicam mais a corpos d'água com variação vertical de densidade, onde as promediações são feitas sobre as variáveis laterais, restando às dimensões x, z e t.

- Modelo Unidimensional: aplicáveis a corpos d'água com seção transversal homogênea, possuindo variáveis médias na seção transversal. Possuem as dimensões x e t.

De acordo com Ferziger (2002), os métodos de discretização mais usuais na resolução dos modelos numéricos na dinâmica dos fluidos são denominados de diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos.

- Método das Diferenças Finitas - Este método é considerado mais antigo para a resolução de equações diferenciais parciais, desenvolvido por Euler no século XVIII. É também o mais fácil método usado para geometrias simples. O domínio da solução é coberto por uma malha, em cada ponto da malha, a equação diferencial é aproximado por substituição das derivadas parciais por aproximações em termos dos valores nodais das funções. O resultado é uma equação algébrica por nó da grade. A princípio este método pode ser aplicado para qualquer tipo de malha. No entanto, em todas as aplicações conhecidas, tem sido aplicado malha estruturada.

- Método dos Volumes Finitos - Usa a forma integral das equações de conservação como ponto de partida. A solução dominante do cálculo é dividida em um número finito de volumes de controles contínuos, e as equações de conservação são aplicadas para cada volume de controle. Esse método pode ser usado para qualquer tipo de malha, adequado para geometrias complexas, onde se obtêm uma equação algébrica para cada volume de controle, em que um número dos valores nodais vizinhos aparece. A desvantagem dessa técnica quando comparada ao método das diferenças finitas é que as equações de primeira e segunda ordem são mais difíceis de desenvolver em 3D, devido ao fato de requerer três níveis de aproximação: interpolação, diferenciação e integração.

- Método dos Elementos Finitos – Esse método é similar ao método dos volumes finitos de várias maneiras. O domínio é dividido em um conjunto de volumes discretos ou elementos finitos, que são geralmente não estruturadas, em 2D com malhas triângulos ou quadriláteros, enquanto em 3D tetraedros ou hexaedros são mais utilizadas. A característica que se distingue nesse método, é que as equações são multiplicadas por uma função de peso antes de serem integradas no domínio inteiro. Nos métodos de elementos finitos mais simples, a solução é aproximada por uma função de forma linear dentro de cada elemento de maneira a garantir a continuidade da solução através das fronteiras do elemento.

### 3.6 Calibração de Modelos

A seguir faz uma breve citação de alguns pontos relevantes da calibração de modelos computacionais. A descrição completa encontra-se na referência técnica do SisBaHiA (Rosman, 2013).

Considerações que dever ser verificadas para realiza a modelagem:

- Verificar se as escalas características dos fenômenos de interesse e as escalas de discretização do modelo são compatíveis.
- Conferir se a geometria do domínio de interesse está adequadamente representada. Atentando-se em verificar se a discretização é adequada, visto que, uma discretização grosseira pode não capturar as feições geométricas, afetando assim, os dados medidos e os resultados do modelo.
- O modelo SisBaHiA é sensível a alteração das condições de contorno. Deve-se verificar se as escalas do intervalo de tempo e as variações de níveis são condizentes com as escalas reproduzidas pelo modelo.
- Verificar que os forçantes dos escoamentos, ex. ventos, vazões fluviais, sejam corretamente informado ao modelo e que sejam condizentes com os existentes na época de medição de níveis, evitando assim, erros simulados pelo modelo.

Resultados esperados após a calibração do modelo:

- Após a calibração do modelo ser realizada por método iterativo, os erros referentes as cotas dos níveis de água deveram ser são inferiores a 5%.
- Se o campo de velocidades estiver bem representado, os erros tendem a uma tolerância admissível, < 20%.
- Somente depois que o modelo hidrodinâmico estiver adequadamente calibrado, pode-se pensar em calibrar modelos de transporte, como os de qualidade de água. Para calibração de qualidade de água, é preciso haver bom conhecimento das cargas poluentes e dos parâmetros que definem as reações de produção e consumo dos diversos constituintes considerados.

- Para efetiva calibração de modelos de transporte de sedimentos é necessário haver dados adequados de caracterização sedimentológica, tais como distribuição granulométrica e de estoques de sedimentos no fundo de diferentes regiões do domínio.

Para uma efetiva calibração de modelos de hidrodinâmica ambiental é necessário que se siga à seguinte ordem:

Nível 1. Calibração geométrica: aferir se a modelagem digital do terreno do domínio de modelagem, feita através da malha de discretização, representa adequadamente os contornos e a batimetria da região de interesse. Para isso, é necessário que haja dados de levantamentos topo hidrográficos recentes.

Nível 2. Calibração hidrodinâmica: aferir se os modelos hidrodinâmicos representam adequadamente a variação de níveis de água e correntes na região de interesse, sob diferentes condições, e.g., marés de sizígia e de quadratura, ventos e vazões. Para isso é necessário que, além da boa modelagem digital do terreno, haja informações corretas sobre os forçantes da circulação hidrodinâmica, tais como ventos, marés e vazões afluentes.

Nível 3. Calibração modelos de transporte: aferir se os modelos de transporte de escalares, tais como sedimentos e parâmetros de qualidade de água, usando as correntes e níveis dos modelos hidrodinâmicos, são capazes de representar adequadamente as concentrações de parâmetros de qualidade de água ao longo do tempo

### **3.7 Sensoriamento Remoto**

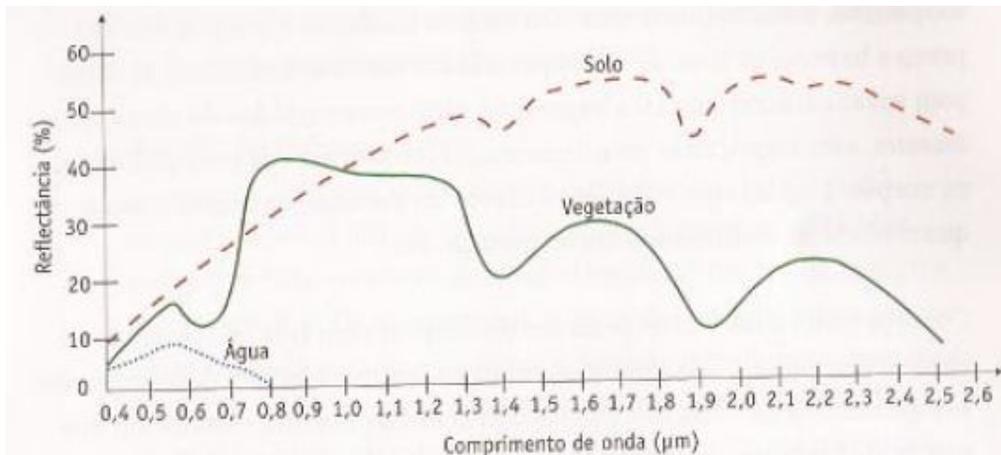
A partir da década de 1960, o sensoriamento remoto aparece nas pesquisas científicas e seu conceito era restrito a aquisição de informações de um objeto sem contato físico com ele. A partir da evolução da tecnologia de aquisição de dados, essa técnica passou a ser conceituada como a utilização de modernos sensores para a aquisição, processamento e transmissão de dados com objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio de registro e análise de interações entre a radiação eletromagnética e os alvos da superfície (NOVO, 2010).

A energia capturada e utilizada pelos sensores é a radiação eletromagnética, representada pelo espectro eletromagnético, o qual possui regiões com diferentes comprimentos de onda. As faixas mais utilizadas pelos sensores para estudos relacionados aos recursos naturais

estão entre as regiões de 0,38 – 0,72  $\mu\text{m}$  “região do visível” e entre 0,72 – 3,0  $\mu\text{m}$ , região do infravermelho próximo e médio (FLORENZANO, 2002).

As imagens captadas em diferentes faixas do espectro eletromagnético apresentam reflectâncias específicas, de acordo com a composição do alvo. A Figura 3.6 apresenta as reflectâncias da água, do solo e da vegetação. Observa-se que a água reflete na faixa do visível.

**Figura 3.6** - Espectro de reflectância da água, do solo e da vegetação.



Fonte: Adaptado de Richards, 1986 *apud* Fitz, 2008.

Segundo Fitz (2008), as imagens obtidas por meio das radiações refletidas pela superfície terrestre ou pela atmosfera dentro da faixa do visível “azul, verde e vermelha”, trazem características típicas observadas naturalmente pelo ser humano. Cada uma dessas faixas absorve e reflete determinados comprimentos de onda que interessam ao intérprete, na medida em que este pode fazer suas análises de acordo as características. O mesmo apresenta no Quadro 3.2 as principais características das bandas do satélite Landsat 5 – TM.

**Quadro 3.2** - Caracterização do sistema orbital Landsat 5 – TM.

Banda	Cor	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Características
1	Azul	0,45 – 0,52	Penetra bastante nos corpos d'água limpos, desprovidos de sedimentos em suspensão. É bastante útil em estudos de recursos hídricos. Os comprimentos de onda próximos do azul também possibilitam perceber diferenciações entre tipos de vegetação e solo exposto, além da presença de nuvens de fumaça provenientes de atividade industriais ou de queimadas.
2	Verde	0,52 – 0,60	Indica a reflectância de vegetação verde sadia. Também serve para identificar a existência de sedimentos suspensos nos corpos d'água, podendo servir como indicativo de sua qualidade.
3	Vermelho	0,63 – 0,69	Utilizada para análise de diferenciação de espécies vegetais, dada sua propriedade de absorção de clorofila. Possibilita o mapeamento de redes de drenagem. Eficaz para estudos de identificação de atividades agrícolas e delimitação de áreas urbanas.
4	Infravermelho próximo	0,76 – 0,90	Utilizada para a demarcação de redes de drenagem e de corpos d'água, em função da grande absorção de energia pela água nessa faixa do espectro. Também define áreas agrícolas, realiza estudos geológicos, geomorfológicos e de solos.
5	Infravermelho médio	1,55 – 1,75	Utilizada para análises de saúde vegetal, especialmente no que diz respeito à escassez de água, em função da boa resposta dessa faixa ao teor de umidade da vegetação.
6	Infravermelho distante ou termal	10,4 – 12,5	Utilizada para caracterizar respostas de natureza térmica de elementos de superfície terrestre. Compreende a porção de espectro que é sensível ao pico de emissão, por um corpo qualquer, de temperaturas extremas.
7	Infravermelho médio	2,08 – 2,35	Tem a finalidade de obter informações sobre geologia, geomorfologia e solos, em função de sua sensibilidade para esse tipo de identificação.

Fonte: Fitz, 2008.

### 3.8 Componentes Ópticos Ativos na Água

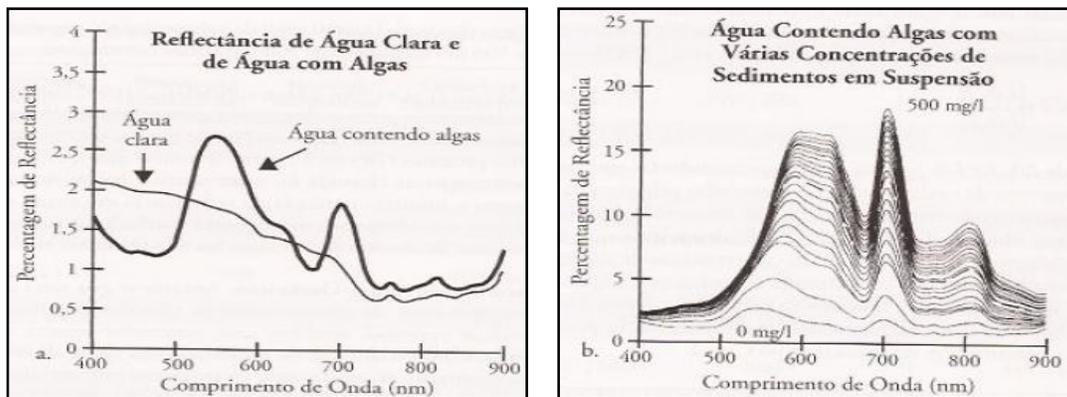
Com relação ao total de sólidos em suspensão na água, a resposta espectral está associada a uma faixa ampla do espectro, com destaque para o aumento da reflectância "espalhamento" na faixa entre 600 e 700 nm, podendo se expandir para a região do infravermelho

próximo de acordo com a concentração e tipo de material (NOVO, 2010; WACHHOLZ, 2011).

Segundo Jensen (2011), a clorofila *a* provoca mudança na água pura, ocasionando mudança em suas características de reflectância espectral. Quando sedimentos em suspensão e clorofila estão presentes no corpo d'água ao mesmo tempo, uma resposta espectral muito diferente é produzida. Podem-se visualizar as características da reflectância espectral da água clara e da água contendo clorofila *a* na Figura 3.7a, e da água contendo várias concentrações de sedimentos na Figura 3.7b.

Conforme a autor supracitado, as principais evidências na água rica com clorofila são: forte absorção da luz azul pela clorofila *a* entre 400 e 500 nm; forte absorção da luz vermelha pela clorofila *a* em aproximadamente 675 nm; máximo de reflectância em torno de 550 nm (pico no verde) causado pela absorção relativamente menor luz verde pela alga; um pico de reflectância proeminente em torno de 690 – 700 nm, causado por uma interação de espalhamento celular de algas e de um efeito combinado mínimo de absorção por pigmento e água. Quando sedimentos estão presentes, o pico de reflectância na região do visível desloca-se 547 nm (luz verde) com 0 mg/l de sedimentos em suspensão para 596 nm (laranja) com 500 mg/l.

**Figura 3.7** -Reflectância da água clara com presença de algas (a), e reflectância da água contendo várias concentrações de sedimentos (b).



Fonte: Jensen, 2011.

### 3.9 Eutrofização

François Alphonse Forel (1841-1912), pesquisador suíço, é considerado o “pai” da Limnologia, o mesmo iniciou seus estudos no lago Léman (lago de Genebra, Suíça). O seu

primeiro livro sobre esta ciência foi denominado de “Manual da Ciência dos Lagos”, onde fez a primeira proposta para classificar os lagos (lagos subpolares, lagos temperados e lagos tropicais) sem considerar sua produtividade, ou seja, o estado trófico (ESTEVES, 1998).

As primeiras classificações do estado trófico foram desenvolvidas pelos limnólogos August Thienemann (1925) e Naumann (1932) e esta tipologia de classificação dividiu os ambientes aquáticos segundo sua produtividade em oligotróficos (produtividade baixa), mesotrófico (produtividade média), e eutróficos, produtividade alta (DATSENKO, 1999). A partir dos anos setenta os limnólogos, ao estudar esta questão sugeriram vários critérios e indicadores de estado trófico. Conforme o mesmo, as análises destas pesquisas concluíram que as características amplamente usadas nas avaliações de estado trófico dos açudes são: clorofila *a*, concentração de fósforo total, concentração de nitrogênio total ou inorgânico, transparência da água pelo disco de secchi.

Eutrofização é o aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos, que tem como consequência o aumento de sua produtividade. Como decorrência deste processo, o ecossistema aquático passa da condição de oligotrófico e mesotrófico para eutrófico ou mesmo hipereutrófico (ESTEVES, 1998).

Os nutrientes dentro de um açude podem ter origens distintas. Muitas vezes o aporte de nutrientes está associado ao carreamento através do escoamento superficial sobre a bacia hidrográfica durante eventos de chuva, e dependendo do tipo e uso do solo da bacia hidrográfica, o aporte de nutrientes pode ser maior ou menor. Em outros casos a fonte de nitrogênio é interna, quando os nutrientes são reciclados em função de condições climatológicas locais, hidrodinâmicas e físico-química da água armazenada (AMORIM, 2001). Pesquisas realizadas por Tundisi & Tundisi (2008) mencionam os efeitos adversos ocasionados pelo processo de eutrofização aos corpos d'águas.

- ✓ Florescimento de algas e crescimento incontrolável de outras plantas aquáticas;
- ✓ Redução do teor de oxigênio na água e anoxia (ausência de oxigênio dissolvido) nas camadas mais profundas;
- ✓ Contaminação da água por substâncias tóxicas produzidas por algumas espécies de cianofíceas, com efeitos crônicos e agudos na saúde humana;
- ✓ Aumento das concentrações de matéria orgânica, as quais, se tratadas com cloro, podem criar compostos carcinogênicos;
- ✓ Aumento da decomposição em geral do sistema, liberando gases tóxicos com odores desagradáveis ( $H_2S$  e  $CH_4$ );

- ✓ Aumento das bactérias patogênicas de vida livre ou agregadas ao material em suspensão;
- ✓ Acúmulo de plantas aquáticas no espelho d'água restringindo o acesso à pesca e atividades recreativas;
- ✓ Diminuição da transparência da água, causando a deteriorização do valor recreativo de um lago ou de um açude;
- ✓ Diminuição da biodiversidade natural (menor número de espécies e diversidade de plantas e animais);
- ✓ Alteração nas cadeias alimentares;
- ✓ Alterações na composição de espécies nos estoques pesqueiros, daquelas mais importantes para as menos importantes em termos econômicos e valor protéico;
- ✓ Mortandade massiva de peixes, causada por depleção significativa de oxigênio na coluna de água e de substâncias tóxicas;
- ✓ Aumento dos custos de tratamento de água;
- ✓ Diminuição da capacidade de fornecer usos múltiplos pelo sistema aquático;
- ✓ Redução do valor econômico de propriedades próximas e açudes eutrofizados;
- ✓ Em muitas regiões, o processo de eutrofização vem acompanhado do aumento, em geral, das doenças de veiculação hídrica.

De acordo com Davis & Koop (2006) a aceleração da eutrofização relaciona-se ao aumento dos nutrientes, incidência de radiação solar e também ao desenvolvimento da estratificação. Segundo os mesmos, os processo de estratificação dos açudes profundos de água doce da Austrália, ocorrem na primavera, com conseqüente redução da concentração de oxigênio no hipolímnio, no entanto, promove o aumento da liberação de nutrientes dos sedimentos, onde permanecem armazenado até ocorrer a mistura da coluna de água em consqüência dos ventos nos meses de maio ou junho. Este ciclo possibilita a introdução de grande carga de nutrientes para a zona fótica onde se encontram disponíveis para os fitoplâncton.

## CAPÍTULO 4 - MATERIAL E MÉTODOS

---

A seguir faz-se uma breve descrição dos procedimentos e técnicas aplicadas para desenvolver o presente trabalho. Podem-se subdividir as técnicas para processar os dados em: 1) técnica de geoprocessamento empregada para quantificar os parâmetros morfométrica; 2) uso de modelagem computacional utilizado para estimar aspectos da circulação hidrodinâmica, taxa de renovação e tempo de residência; 3) técnica de sensoriamento remoto usado para identificar a presença de componentes ópticos ativos na água do açude Acarape do Meio.

### 4.1 Análise Morfométrica

O advento das geotecnologias na área da geomorfologia permitiu uma análise mais complexa das feições do terreno. Nesta pesquisa manipulou-se aplicativos como *sufer 11* e *ArcGIS 9.3*, onde se fez uso das extensões: *3D*, *Analyst*, *Spatial Analyst*, *Topology*, *Editor*, *Georeferencing*, que possibilitou realizar análise das variáveis morfométricas extraídas de imagem SRTM (resolução 90 m) e dos dados de batimetria, resultando na elaboração do banco de dados primário e secundário, mapas temáticos de declividade, de altimetria e da rede de drenagem (Quadro 4.1).

**Quadro 4.1-** Parâmetros morfométricos secundários da bacia hidrográfica e hidráulica.

	Parâmetros	Unidade	Fórmula	Descrição	Equação
Bacia Hidrográfica	*Fator de forma		$K_f = A/L^2$	Circular $\geq 1$ Alongada $< 1$	(4.1)
	*Coeficiente de compactidade		$K_c = 0,28 \cdot (P/\sqrt{A})$	Circular = 1 Alongada $> 1$	(4.2)
	*Densidade de drenagem	Km/Km <sup>2</sup>	$D_h = Li/A$	Baixa $< 0,5 \text{ km}^{-1}$ Normal $0,5 \text{ km}^{-1}$ a $3,5 \text{ km}^{-1}$ Alta $> 3,5 \text{ km}^{-1}$	(4.3)
	***Altitude média	(m)	$E = \sum(P_m \cdot A_i)/A$	-	(4.4)
	**Declividade média	(m/m)	$S = (D \cdot l)/A$	-	(4.5)
	**Fator de envolvimento		$F = A/a$	-	(4.6)
	Bacia Hidráulica	*Desenvolvimento do volume		$D = 3 \cdot (Z_{med}/Z)$	Convexa $< 1$ Côncava $> 1$
*Desenvolvimento do perímetro			$F = \frac{p}{\pi \cdot \sqrt{a} \cdot (m^2)}$	Forma circular $F = 2$ Forma alongada $2,6 < F < 3$ Forma dentrítica $F > 3$	(4.7)
*Profundidade relativa		(%)	$Z_r = 88,6 \cdot (Z/\sqrt{a})$	-	(4.8)

Fonte: \*Sperling. 1999; \*\*Teixeira. 2010; \*\*\* Villela & Mattos. 1975.

Área da bacia de drenagem (A). Área entre duas curvas de níveis (A<sub>i</sub>). Área do açude (a). Comprimento total do rio (L). Comprimento total dos cursos d'água (Li). Comprimento total das curvas de níveis (l). Distâncias entre as curvas de níveis "30 m" (D). Perímetro da bacia de drenagem (P). Ponto médio entre duas curvas de níveis (P<sub>m</sub>). Perímetro do açude (p). Perímetro da área de drenagem (P). Profundidade máxima (Z). Profundidade média (Z<sub>med</sub>). Volume do açude (V).

A partir do processamento de imagem ResourceSat-1, sensor LISS-3, do dia 04 de outubro de 2012 estimou-se o uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio - CE.

## 4.2 Modelagem Ambiental

O programa SisBaHiA começou a ser desenvolvido a partir de 1987 no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa (COPPE) na área de concentração de Engenharia Costeira e Oceanográfica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A plataforma modela sistemas hídricos continentais, baías, estuários e costas, através da interface composta dos modelos: hidrodinâmico, transporte Euleriano, qualidade de água e

eutrofização, transporte de sedimento e evolução morfológica de fundo, transporte Lagrangeano probabilístico e determinístico, campo próximo para emissários e fontes pontuais, geração e propagação de ondas.

Nos três tópicos seguintes, faz-se uma breve descrição das principais equações governantes do modelo hidrodinâmico, modelo de transporte Lagrangeano e modelo de transporte Euleriano. A formulação completa das equações do programa SisBaHiA e trabalhos desenvolvidos podem ser encontrados no *site* [www.sisbahia.ufrj.br](http://www.sisbahia.ufrj.br).

#### 4.2.1 Circulação Hidrodinâmica

O modelo hidrodinâmico foi aplicado para determinar o comportamento da circulação da velocidade das correntes, que são alteradas pela presença de variáveis climatológicas e de condição de contorno. As principais equações governantes do modelo hidrodinâmico são citadas a seguir:

Equação de quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta v \end{aligned} \quad (4.9)$$

Equação de quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \end{aligned} \quad (4.10)$$

Equação da continuidade do volume:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.11)$$

**Quadro 4.2** - Definição da equação da quantidade do movimento 3D.

$\frac{\partial u}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento, i.e., em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos advectivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para lugares onde o nível de água é mais baixo.
$-\frac{1}{\rho_o} g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamento de lugares onde a água é mais densa para lugares onde a água é menos densa.
$\frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right)$	Representa a resultante das tensões turbulentas dinâmicas no escoamento, i.e., em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos difusivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa.
$2\Phi \sin \theta v$	Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra.

Fonte: ROSMAN, 2013.

**Quadro 4.3** - Definição da equação do continuidade do volume

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$	Faz com que o divergente da velocidade do escoamento seja nulo. Ou seja, uma massa fluida escoar de forma incompressível, i.e. muda de forma mas permanece com o mesmo volume à medida que se movimenta.
---	--

Fonte: ROSMAN, 2013.

#### 4.2.2 Tempo de Residência

O modelo transporte Lagrangeano foi aplicado para estimar aspectos relacionados a compartimentação espacial e temporal do tempo de residência da água do açude Acarape do Meio.

Segundo Rosman (2013), o modelo de transporte Lagrangeano é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Utiliza o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico. Em geral, as fontes contaminantes no modelo são representadas por pequenas partículas dispersas na massa d'água na região fonte, onde são calculadas as trajetórias individuais de cada partícula.

O autor supracitado especifica que as partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e são advectadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico. A posição de qualquer partícula no instante seguinte,  $P^{n+1}$ , é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida,  $P^n$ :

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + T, A, D \quad (4.12)$$

onde T,A,D., são termos de alta ordem desprezados.

### 4.2.3 Taxa de Renovação da Água

A partir da aplicação do modelo transporte Euleriano estimou-se os aspectos relacionados à compartimentação espacial e temporal das taxas de renovação da água do açude Acarape do Meio.

Segundo Rosman (2013), o modelo Euleriano é de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. O modelo tem capacidade para simular o transporte de escalares que se encontram dissolvidos na coluna de água, tais como substâncias genéricas, contaminantes, ou parâmetros de qualidade da água.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = & -\frac{C}{H} (q_P - q_E) + \left(\frac{C_{Ia} - C}{H}\right) q_{Ia} + \Sigma R + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \underbrace{H \left[ D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right]}_{T_{xx}} \frac{\partial C}{\partial x} + \right. \\ & \underbrace{H \left[ D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right]}_{T_{xy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \underbrace{H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right|}_{T_{xt}} \frac{\partial C}{\partial t} \left. + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \underbrace{H \left[ D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right]}_{T_{yx}} \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{H \left[ D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right]}_{T_{yy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \right. \right. \\ & \left. \left. \underbrace{H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right|}_{T_{yt}} \frac{\partial C}{\partial t} \right] \right. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Denificação:  $C$  é a concentração da substância de interesse;  $qP$ ,  $qE$  e  $qI$  são valores dados de vazões por unidade de área [ $m^3/s/m^2$ ], respectivamente, de precipitação, evaporação e infiltração;  $\Sigma R$  é o somatório das reações cinéticas consideradas, fontes e sumidouros;  $D_{ij}$  é o termo que representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal.

### 4.3 Dados Considerados na Modelagem Ambiental

Para representar a geometria do reservatório foi necessário inserir dados de batimetria, elaboração de malha de elementos finitos e mapa base.

Também se inseriu dados de direção e velocidades dos ventos, evaporação e precipitação. Os mesmos foram considerados no modelo como variável no tempo e uniforme no espaço.

As medidas de vazões afluentes e efluentes foram inseridas para prescrever as velocidades na fronteira de terra em alguns nós.

Inseriu-se no modelo hidrodinâmico os dados das cotas de níveis. Os níveis adsorvidos foram utilizados para verificar o resultado da calibração geométrica.

Não foi coletado informações das velocidades das correntes em consequência da baixas velocidades da circulação hidrodinâmica. Os equipamentos a disposição no momento da pesquisa, não tinha limite de acurácia “sensibilidade” para detectar as pequenas variações nas correntes.

#### 4.3.1 Batimetria

A batimetria foi realizada pela COGERH em maio de 2011. O procedimento consiste no levantamento de dados com o objetivo de obter a tabela Cota x Área x Volume. No açude Acarape do Meio foram coletados 16.028 pontos vetoriais, X (longitude), Y (latitude), Z (profundidade), a partir do uso de ecobatímetro com feixe único (*single beam*), onde se constatou a profundidade máxima de 28m. A cota do sangradouro foi considerada como o nível de referência local.

O levantamento da área molhada compreende o posicionamento planimétrico, realizado por meio de levantamento com GPS e o uso do equipamento ecobatímetro que é utilizado para determinar as profundidades. Enquanto o levantamento da parte seca pode ser realizado por meio de GPS, técnicas topográficas convencionais (ANA, 2011).

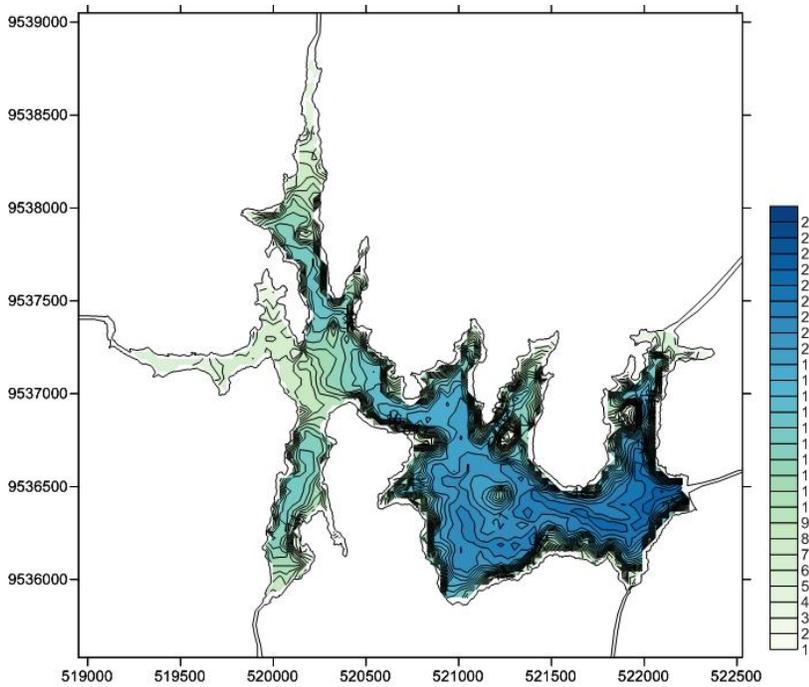
O trabalho no corpo principal, braços, afluentes e canais do açude foi efetivado por linhas regulares de sondagem (LS) equidistantes, dispostas de forma transversal e longitudinal as curvas isobatimétricas da área. Segundo a ANA (2011) a equidistância entre as linhas de sondagem transversais (ou seções topobatimétricas), no corpo principal do açude, deverá ser obtida pela seguinte Equação 4.14:

$$E_{st} = \frac{0,70A^{0,35}}{D} \quad (4.14)$$

Definição: EST = equidistância das seções topobatimétricas transversais, em quilômetros; A = área do açude em seu nível *máximo maximorum*, em hectares; D = extensão do açude “corpo principal”, em quilômetros.

À equidistância das linhas de sondagem longitudinal, podem ser de três vezes as praticadas para as linhas de sondagem transversal, conforme região que se encontre no açude.

**Figura 4.1** -Mapa das isobatas no açude Acarape do Meio realizada em maio de 2011.



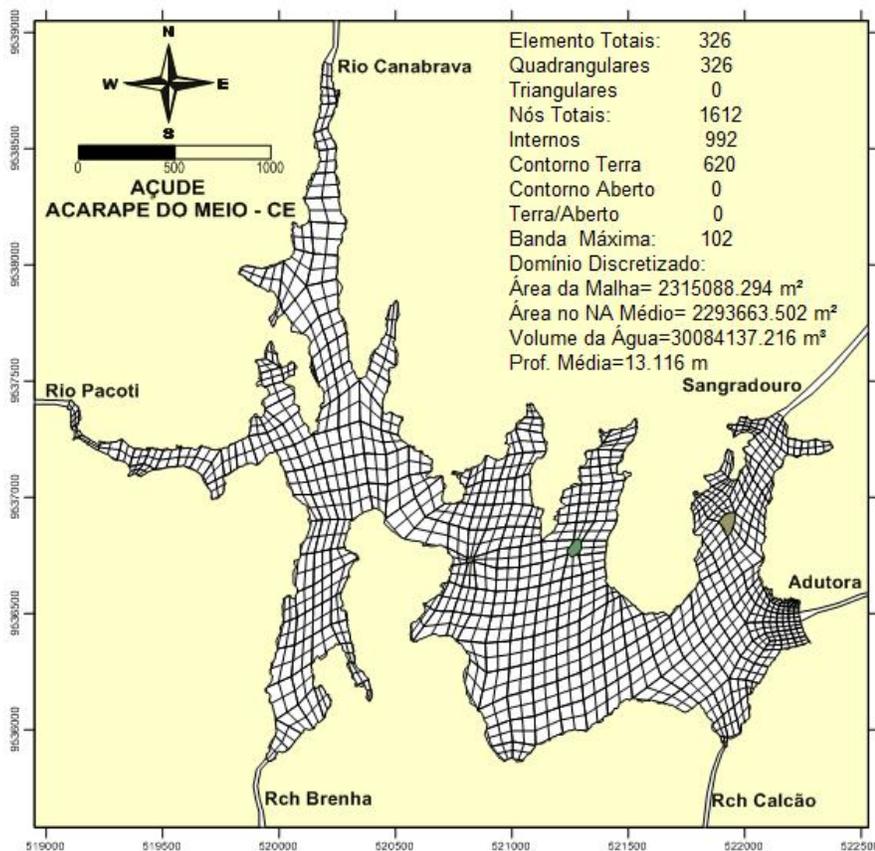
Fonte: COGERH, 2011.

### 4.3.2 Malha de Elementos Finitos

A malha de elementos finitos foi elaborada manualmente no programa Argus One com 326 elementos. No processo de implementação da malha de elementos finitos quadrangulares, procurou-se preservar os contornos naturais da represa, evitando assim, elementos com grandes distorções geométricas. Além disso, a discretização é mais refinada nas áreas mais estreitas, como entrada e saída de fluxo.

Visualiza-se na Figura 4.2, os principais tributários, o sangradouro e a localização da adutora do açude Acarape do Meio considerados no modelo hidrodinâmico. A modelagem realizada compreendeu o período chuvoso (janeiro a junho/2012) e seco (julho a dezembro/2012).

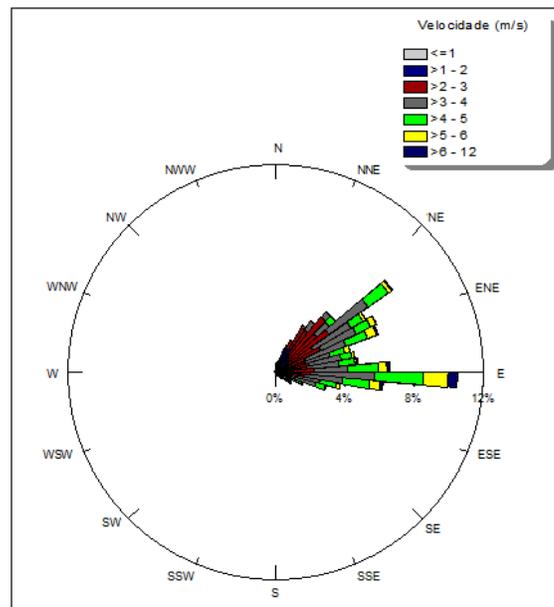
Figura 4.2 - Malha de elementos finitos quadráticos.



### 4.3.3 Ventos

Os dados de intensidade e direção dos ventos referente ao ano de 2012 foram registrados pela plataforma de coletas de dados automática do INMET, localizado no município de Guaramiranga, coordenadas UTM: 9.529.009 N, 507.668 E. A plataforma ficava a uma distância aproximada de 16 km da bacia hidráulica do açude Acarape do Meio. A direção predominante dos ventos foi de nordeste e leste e a velocidade variou de 0 a 12 m/s (Figura 4.3).

**Figura 4.3** - Rosa dos ventos apresentando dados de velocidade e direção dos ventos, em 2012.

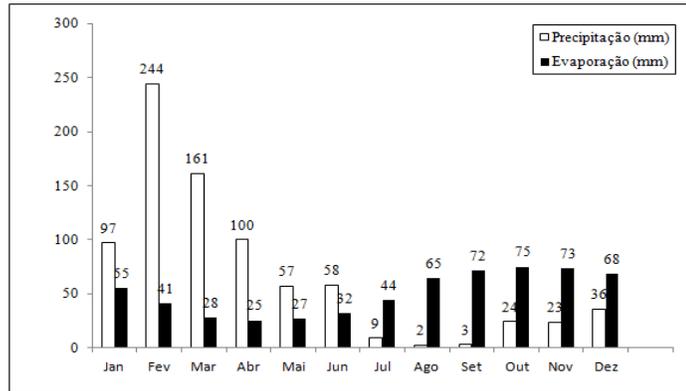


Fonte: INMET, 2012.

### 4.3.4 Precipitação e Evaporação

A precipitação do município de Guaramiranga é em média 1.737,5 mm (IPECE, 2004). No entanto, o ano de 2012 foi considerado seco, onde se registrou precipitação em torno de 814 mm (Figura 4.4). Os meses que mais choveram foram fevereiro (244 mm) e março (162 mm). A evaporação total estimada foi de 605 mm para o ano de 2012.

**Figura 4.4** - Precipitação e evaporação do município de Guaramiranga/CE, em 2012.



Fonte: INMET, 2012.

### 4.3.5 Vazões

A instalação das réguas mímimétricas foram feitas no mês de dezembro de 2011. O perfil topográfico das seções dos rios afluentes Pacoti e Canabrava (Figura 4.5 e Figura 4.6) foi realizado com uso de equipamentos como: mira, fita linimétrica, estação total, i.e., aparelho que armazena internamente em microprocessador interno as informações dos ângulos horizontais e verticais, calcula as distâncias e determina as coordenadas. Os dados das vazões das outras seções “Brenha e Canabrava” foram feitas a partir do uso da formula empírica de regressão linear simples (Equação 4.15).

$$y = a_0 + a_1x \quad (4.15)$$

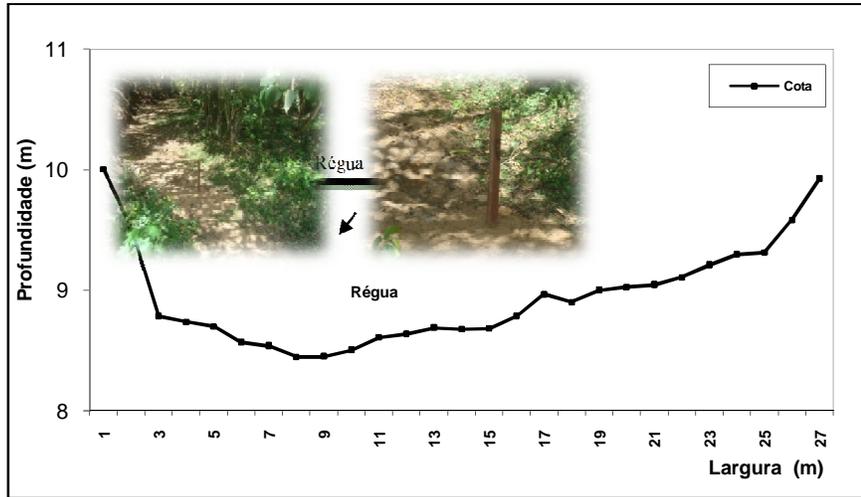
Onde: x: leitura da régua observada no local com curva de descarga; y: leitura da régua no local sem curva de descarga;  $a_0$  e  $a_1$ : são os coeficientes pelo método dos mínimos quadrados ou por ajuste gráfico.

No período de chuvas em 2012, as medições de vazões foram realizadas semanalmente com uso do medidor de vazão ADV “Acoustic Doppler Velocimeter” nas seções do rio Pacoti e do riacho Canabrava (Tabela 4.1). Nos demais dias foi registrado a cota da leitura da régua. As medidas dos dados hidrológicos foram feitas nos meses de fevereiro a abril/2012, representativo das chuvas (Figura 4.7).

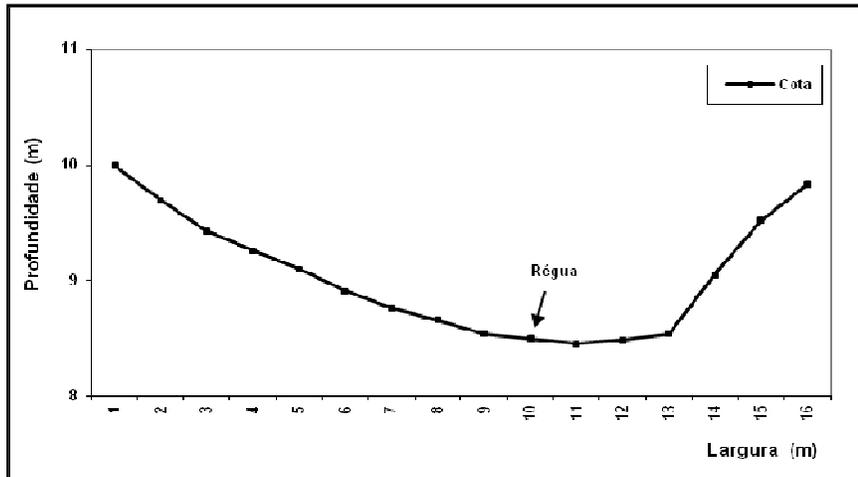
**Tabela 4.1** – Coordenadas de localização das seções no leito do rio Pacoti e riacho Canabrava, 2011.

Datum Horizontal: SAD69, zona 24M	Acarape do Meio	Seções	
		Rio Pacoti	Riacho Canabrava
E	522.254	517.915	520.150
N	9.536.421	9.537.415	9.540.130

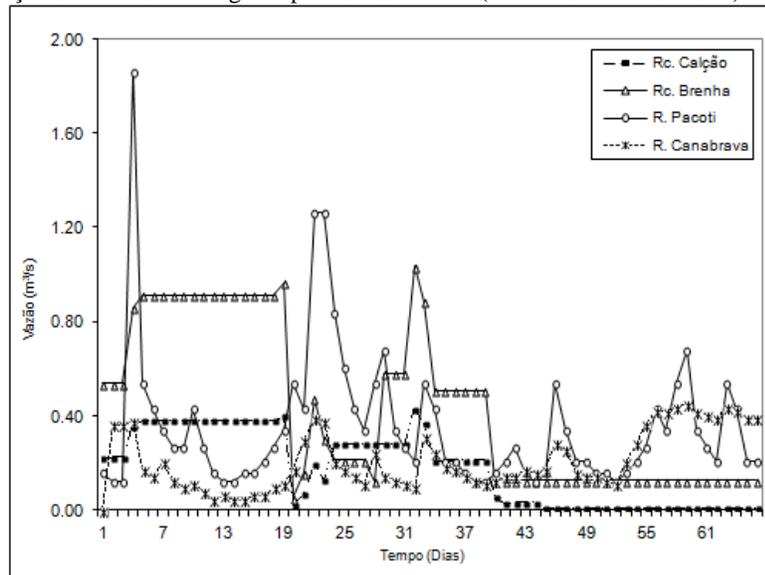
**Figura 4.5** - Seção transversal do rio Pacoti, dezembro de 2011.



**Figura 4.6** - Seção transversal do rio Canabrava, dezembro de 2011.



**Figura 4.7** - Variação das vazões ao longo do período de chuvas (fevereiro a abril de 2012).



Fonte: COGERH, 2012.

#### 4.4 Calibração do Modelo Hidrodinâmico

Para obter-se resultados aproximados da circulação hidrodinâmica do açude Aca-rape do Meio, a partir do uso do modelo hidrodinâmico foi necessário inserir no programa SisBaHiA dados confiáveis e que representassem a geometria complexa do açude e também as variáveis que interferem na hidrodinâmica. A seguir faz-se menção dos dados processados pelo modelo:

- Calibração geométrica - Elaboração da malha de elementos finitos com contornos similares ao perímetro do açude e entrada de dados de batimetria com 16.028 pontos verticais representativos dos compartimentos da represa.
- Calibração hidrodinâmica - Absorção das cotas de níveis e inserção das vazões afluentes e efluentes oriundas da saída pela tomada de água. Cita-se também a entrada de dados climatológicos como vento, precipitação e evaporação registrados próximo a área de estudo.

Não foi realizado medidas de velocidade das correntes, devido à limitação do equipamento em detectar pequenas velocidades.

#### 4.5 Componentes Ópticos Ativos na Água

Foram adquiridas quatro imagens do satélite Landsat 5 - TM, com resolução espacial de 30 m, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referente às datas: 01 de agosto de 2001, 27 de julho de 2005, 03 de julho de 2008 e 29 de agosto de 2011. O intervalo temporal entre as imagens visa verificar o comportamento dos componentes ópticos ativos ao longo dos anos em relação a presença de clorofila *a*.

As imagens foram processadas com uso do programa Envi 4.5 ao qual foi necessário fazer algumas correções:

- Correção geométrica - Esta etapa compreende a aquisição de pontos de controle da imagem georreferenciada para ajustar a cena que se deseja trabalhar os resultados.
- Correção Atmosférica - Fez-se a correção atmosférica através da ferramenta *Dark Subtration*, com o objetivo de corrigir a atenuação atmosférica que ocasionam alteração na reflectância da imagem. Este método corrige o espalhamento atmosférico na qual a interferência atmosférica é avaliada diretamente a partir dos números digitais, no entanto, a absorção é ignorada.
- Classificação da imagem - Realizou-se o processo da imagem por agrupamentos de padrões semelhantes. Aplicou-se o fatiamento em classes com intervalos 0.05 "valor absoluto" de reflectância, aplicados na banda 2 pela ferramenta *density slice*.

A conversão da reflectância em albedo foi feita pela Equação 4.16, segundo pesquisa realizada por Liang, 2000.

$$\alpha_{visível} = 0,443 \alpha_1 + 0,317 \alpha_2 + 0,240 \alpha_3 \quad (4.16)$$

A coleta dos dados de clorofila *a* foram realizadas em: 01 de agosto de 2001, 25 de julho de 2005, 29 de julho de 2008, 16 de março de 2011. Para os anos de 2008 e 2011 as datas não coincidem com a passagem das imagens de satélite.

A estimativa dos parâmetros ópticos ativos presente na água foi realizada apenas pelo parâmetro clorofila *a*, pois não existiam dados de sedimentos para o período em estudo. A clorofila *a* foi coletada em campo e analisada em laboratório pelo método Sedgewick-Rafter do Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater.

A partir da clorofila *a* realizou-se a classificação do índice de estado trófico da qualidade da água, cuja classificação seguiu o método do Índice de Estado Trófico (IET) ado-

tado pela Cetesb (2002). Esse método foi desenvolvido por Carlson, mas modificado por Toledo *et al.* (1984), cuja classificação se estabelece de acordo com os níveis e valores apresentados no Quadro 2.2.

**Quadro 4.4** - Classificação do estado trófico de acordo com uso IET modificado por Toledo *et al.*, 1984.

Estado trófico	Clorofila <i>a</i> ( $\mu\text{g/L}$ )
Ultraoligotrófico	$CI \leq 1,17$
Oligotrófico	$1,17 < CI \leq 3,24$
Mesotrófico	$3,24 < CI \leq 11,03$
Eutrófico	$11,03 < CI \leq 30,55$
Supereutrófico	$30,55 < CI \leq 69,05$
Hipereutrófico	$69,05 > CI$

Fonte: Cetesb, 2002.

A amostragem espacial das campanhas para coletar esse parâmetro foi realizada em oito pontos dentro da bacia hidráulica (Tabela 4.2). Salienta-se que os pontos amostrados nas respostas espectrais são referentes à mesma localização dos pontos do monitoramento da Clorofila *a*.

**Tabela 4.2** - Pontos amostrados para coleta da clorofila *a* e para os espectros das imagens Landsat 5 - TM.

Coordenadas UTM		Ponto
E	N	
520.104	9.536.098	ACA - 01
520.265	9.537.325	ACA - 02
520.194	9.538.250	ACA - 03
520.680	9.536.911	ACA - 04
521.095	9.536.519	ACA - 05
521.035	9.536.034	ACA - 06
522.090	9.537.231	ACA - 08
522.294	9.536.523	ACA - 09

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise Morfométrica

O açude Acarape do Meio foi construído em 1924, com capacidade volumétrica de 31.500.000 m<sup>3</sup>; mas, em consequência do assoreamento, constatou-se através de batimetria, realizada em maio de 2011, que ocorreu o assoreamento de aproximadamente 1.906.612 m<sup>3</sup>, o que corresponde a 6% do volume. Pode-se verificar por diferença das cotas (Tabela 5.1) que o açude tem aproximadamente 28 m de profundidade máxima.

**Tabela 5.1** - Dados da área e do volume registrados na batimetria (2011) e do projeto (1924).

Cota (m)	Batimetria		Projeto		Diferença	
	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (%)	Volume (%)
102,95	0,00	0,00	-	-	-	-
103,00	0,90	0,02	-	-	-	-
104,00	3.435	1.074	0	0	-	-
105,00	18.188	9.730	20.000	10.000	90,94%	97,30%
106,00	59.220	46.248	70.000	50.000	84,60%	92,50%
107,00	129.546	136.927	130.000	150.000	99,65%	91,28%
108,00	235.387	315.912	210.000	320.000	112,09%	98,72%
109,00	372.765	616.791	300.000	580.000	124,25%	106,34%
110,00	492.377	1.053.433	400.000	930.000	123,09%	113,27%
111,00	590.000	1.593.350	490.000	1.380.000	120,41%	115,46%
112,00	684.063	2.231.147	570.000	1.910.000	120,01%	116,81%
113,00	753.123	2.950.536	650.000	2.510.000	115,87%	117,55%
114,00	817.952	3.736.630	730.000	3.210.000	112,05%	116,41%
115,00	911.260	4.596.398	840.000	3.990.000	108,48%	115,20%
116,00	1.046.119	5.565.463	990.000	4.900.000	105,67%	113,58%
117,00	1.173.948	6.679.820	1.120.000	5.960.000	104,82%	112,08%
118,00	1.278.141	7.904.577	1.260.000	7.150.000	101,44%	110,55%
119,00	1.379.144	9.234.479	1.323.000	8.490.000	104,24%	108,77%
120,00	1.471.101	10.659.125	1.412.000	9.980.000	104,19%	106,80%
121,00	1.561.892	12.175.603	1.478.000	11.620.000	105,68%	104,78%
122,00	1.661.004	13.786.437	1.555.000	13.400.000	106,82%	102,88%
123,00	1.746.311	15.491.635	1.615.000	15.290.000	108,13%	101,32%
124,00	1.824.595	17.276.795	1.677.000	17.250.000	108,80%	100,16%
125,00	1.898.278	19.138.587	1.804.000	19.500.000	105,23%	98,15%
126,00	1.969.052	21.072.874	1.873.000	21.800.000	105,13%	96,66%
127,00	2.040.000	23.076.985	1.993.000	24.300.000	102,36%	94,97%
128,00	2.115.366	25.154.303	1.999.000	27.000.000	105,82%	93,16%
129,00	2.195.907	27.309.542	2.067.000	30.000.000	106,24%	91,03%
130,00	2.281.314	29.547.744	2.197.392	31.470.588	103,82%	93,89%
130,02	2.238.798	29.593.388	2.200.000	31.500.000	101,76%	93,95%

Fonte: COGERH, 2011.

A partir dos resultados de batimetria e imagem RSTM determinaram-se os dados morfométricos primários da bacia hidrográfica: área, perímetro, comprimento total da rede de drenagem, somatório das curvas de níveis, distância entre as curvas de níveis e comprimento total rio Pacoti (Tabela 5.2).

Em relação à bacia hidráulica estimou-se: área, volume, profundidade máxima e perímetro.

A partir da determinação dos parâmetros primários determinaram-se os secundários para a bacia hidrográfica: fator de forma, coeficiente de compacidade, densidade de drenagem, fator de envolvimento, declividade média da área de drenagem, altitude média (Tabela 5.3).

Quanto a bacia hidráulica determinou-se: desenvolvimento do perímetro, profundidade relativa, desenvolvimento do volume.

O entendimento das variáveis morfométricas auxiliam na compreensão dos processos físicos que predominam na massa líquida e podem ser utilizados para explicar resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico.

**Tabela 5.2** - Parâmetros morfométricos primários da bacia hidrográfica e hidráulica - 2013.

	Parâmetros	Resultados
Bacia Hidrográfica	Área (m <sup>2</sup> )	210.000.000
	Perímetro	82.466
	Comprimento total da rede de drenagem (m)	150.306
	Somatório das curvas de níveis (m)	1.487.171.92
	Distância entre as curvas de níveis (m)	30
	Comprimento total do rio Pacoti (m)	36.591
Bacia Hidráulica	Área (m <sup>2</sup> )	2.294.233
	Volume (m <sup>3</sup> )	30.084.137
	Profundidade máxima (m)	28
	Perímetro (m)	82.466

**Tabela 5.3** - Resultados morfométricos secundários da bacia hidrográfica e hidráulica - 2013.

	Parâmetros	Resultados
Bacia Hidrográfica	Fator de forma	0,16
	Coefficiente de compacidade	1,59
	Densidadedrenagem km/km <sup>2</sup>	0,71
	Fator de envolvimento	91,53
	Declividade média da área de drenagem (m/m)	0,2124
	Altitude média (m)	526
Bacia Hidráulica	Desenvolvimento do perímetro	5,38
	Profundidade relativa (%)	1,58
	Desenvolvimento do volume	1,43

Quanto aos aspectos relacionados à bacia hidrográfica determinou-se que:

A área de drenagem do Açude Acarape apresenta variáveis de uma bacia alongada, visto que, o resultado do fator de forma de 0,13 relacionado com o coeficiente de compacidade de 1,59, a caracteriza com forma da bacia que é pouco propensa a inundações. Segundo Villela & Mattos (1975), uma bacia estreita e longa, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão.

O resultado da densidade de drenagem identificou um padrão na faixa normal (0,71), sendo que tal resultado correlaciona-se a pouca ação antrópica do meio, devido a altas declividades da área. A rede de drenagem é um importante indicador de alterações ocorridas na composição da paisagem, seja por mudanças na sua estruturação, forma ou por perda ou ganho de canais, contudo, a urbanização e a agricultura são fatores antrópicos capazes de provocar alterações consideráveis (COLLARES, 2000).

Pesquisas realizadas por Christofolletti (1980, 1981) constataram que nas rochas com granulometria fina, a infiltração é mais dificultada, ocasionando condições ideais para um maior escoamento superficial, gerando possibilidades para esculturação de canais e elevando a densidade da drenagem, no entanto, o contrário ocorre com rochas de granulometria grossa.

O resultando do fator de envolvimento de 91,53 é indicativo de área que tem propensão para o transporte de sedimentos, principalmente se a área não estiver preservada. Segundo Sperling (1999), nos lagos naturais os valores do fator de envolvimento mais comuns

são da ordem de algumas dezenas, mas em represas, cujas bacias hidrográficas são geralmente bem maiores em relação ao tamanho do corpo d'água, o fator de envolvimento atinge algumas centenas.

O autor supracitado enfatiza que este parâmetro indica indiretamente o grau de probabilidade da bacia de drenagem contribuir com aporte de material ao corpo d'água. Quanto maior o seu valor, maior é a perspectiva de transporte de material que podem ocasionar processos de assoreamento e eutrofização.

Estudos realizados na Lagoa da Pampulha com área da bacia hidrográfica (97,91 km<sup>2</sup>) inferior ao açude Acarape do Meio, identificou aumento dos valores do fator de envolvimento de 37 para 49,74, sendo esse indicativo da influência da alteração referente ao carregamento de sólidos (RESCK, 2007).

Determinou-se a altitude média de 526 m, com as respectivas áreas localizadas acima e abaixo dessa cota, ou seja, quantificou-se que 50.019,92 m<sup>2</sup> (45%) que estar acima de 50% (cota 526m) e 60.536,41 (55%) estão abaixo desse valor de referência. A bacia hidrográfica do açude está localizada em área de serras "Guaramiranga, Baturité" cujos valores de altimetria variam de 210 a 1.080 m.

A determinação da declividade média de 0,2124 m/m ou 21,24% significa que para cada 100 m de extensão ao longo da bacia de drenagem, ocorre uma elevação na altimetria de 21,24 m.

A magnitude dos picos da enchente, a maior ou menor oportunidade de infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos depende da rapidez com que ocorre o escoamento sobre terrenos da bacia. A declividade dos terrenos de uma bacia controla em parte a velocidade de escoamento superficial de maneira a afetar o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que contribuem para a rede de drenagem das bacias (VILLELA & MATTOS, 1975).

Quanto aos aspectos relacionados à bacia hidráulica determinou-se que:

O padrão dentrítico do desenvolvimento do perímetro correlaciona-se com a variabilidade da rede de drenagem que é composto por quatro sub-bacias. O resultado desse parâmetro é indicativo do grau de irregularidade do corpo d'água.

Segundo Sperling (1999), altos valores do desenvolvimento do perímetro, indicam uma maior região litorânea na absorção de pulsos poluidores, pois a vegetação existente às

margens apresenta uma elevada capacidade de assimilação de impacto. Conforme o mesmo, na região litorânea existe comunidades aquáticas bem desenvolvidas e diversificadas (macrófitas, perifiton), ocorrem também processos de natureza física ou mecânica (retenção de partículas suspensas) e biológica (assimilação de matéria orgânica, de metais pesados e eliminação de nitrogênio pelo processo de desnitrificação); no entanto, ambientes com contorno dentrítico apresentam elevado tempo de residência da água.

A forma côncava do desenvolvimento do volume “semelhante a um U” tem sido associada à represa com uma disposição para a ressuspensão dos sedimentos de fundo, no entanto, essa característica pode estar mascarada, visto que, o entorno da bacia hidráulica são circundadas por áreas íngremes e conseqüentemente impede a ação dos ventos, cuja frequência de velocidades dos ventos na área é predominantemente de 4 m/s.

Represas com desenvolvimento do volume maior que 1 ( $> 1$ ) encontram-se mais expostos ao vento, podendo assim, influenciar na hidrodinâmica, provocando um maior revolvimento do material de fundo, o que ocorre principalmente em lagos rasos (SPERLING, 1999).

A pequena profundidade relativa (1,58%) é indicativo das represas rasas com propensão a evitar processos de estratificações térmicas, pois fonte externa “vento” pode ocasionar a mistura da coluna d’água. No entanto, as altas declividades na área de entorno do açude, que varia principalmente de ondulado a forte ondulada dificulta a ação dos ventos que são capazes de promover o revolvimento do fundo “mistura”, principalmente nas áreas, localizadas em locais mais distantes do barramento.

Pesquisas realizadas por Sperling (1999) identificaram que represas pequenas e profundas apresentam um alto valor da profundidade relativa, ou seja, a área superficial é relativamente pequena em relação à alta profundidade, sendo que, o contrário ocorre com corpos d’água grandes e rasos. Conforme o pesquisador, açudes com profundidade relativa pouco elevada (na faixa de 2% a 5%), podem circular completamente, desde que haja um suficiente aporte de energia externa (ventos), o contrário ocorre em ambientes aquáticos de elevada profundidade relativa que apresentam dificuldade em circular integralmente toda a coluna d’água. De acordo com autor, a circulação vertical da coluna d’água acarreta efeitos positivos para a oxigenação da água, em contrapartida pode ressuspender os compostos como gases tóxicos e nutrientes presentes nas regiões mais profundas e provocar danos para a biodiversidade do meio aquático.

A determinação dos parâmetros desenvolvimento do volume e profundidade relativa deram suporte a escolha do modelo para simular a circulação do hidrodinâmica do açude Acarape do Meio, visto que, o mesmo aplica-se a ambientes com pouca estratificação da coluna de água.

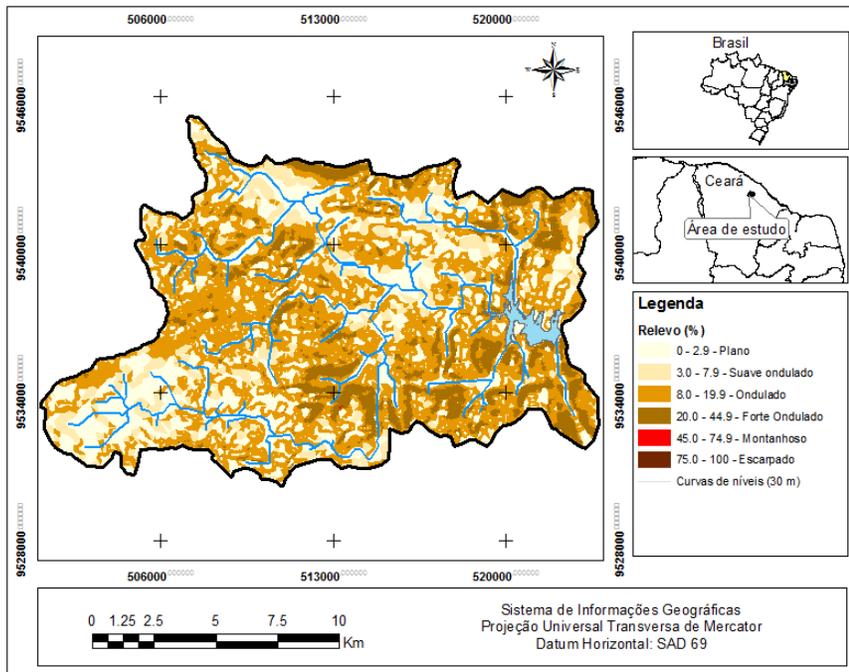
A partir do processamento da imagem SRTM realizou-se a classificação da bacia hidrográfica em classe de declividade do relevo de acordo com os padrões de classificação da Embrapa (2006).

Encontra-se na Tabela 5.4 o resultado da classificação do relevo e as respectivas áreas correspondentes a cada classe (Figura 5.1), onde se identificou que a maior área é correspondente ao relevo ondulado (45,28%), seguindo do relevo plano (31,10%) e forte ondulado (12,19%).

**Tabela 5.4** - Classificação do relevo da bacia hidrográfica do Acarape do Meio – 2013.

Classificação	Declividade (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)
Plano	< 2,9	65,28	31,10
Suave ondulado	3 – 7,9	23,94	11,40
Ondulado	8 – 19,9	95,06	45,28
Forte ondulado	20 – 44,9	25,60	12,19
Montanhoso	45- 74,9	0,01	0,01
Escarpado	75 - 100	0	0

**Figura 5.1** - Mapa do Relevo da área de drenagem do açude Acarape do Meio - 2013.



O resultado da declividade média de 0,2124 m/m “21,24%”, corresponde ao padrão de classificação forte ondulado. Segundo Christofolletti (1980), as classes de relevo foram determinadas a partir do cálculo das áreas existentes entre cada faixa altimétrica, com a finalidade de exprimir a distribuição do volume rochoso (Tabela 5.5).

**Tabela 5.5** - Valores das áreas entre as cotas da bacia hidrográfica do açude.

Cotas (m)	Cota média (m)	Área (Km <sup>2</sup> )	*Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Área relativa (%)	Área relativa acumulada (%)	Cota média x Área
1080 F 1040	1060	0,07	0,07	0,03	0,03	72,80
1040 F 0991	1016	0,61	0,68	0,29	0,32	623,61
0991 F 0949	0970	1,23	1,91	0,59	0,91	1.194,01
0949 F 0906	0928	3,45	5,37	1,64	2,56	3.203,78
0906 F 0862	0884	7,36	12,72	3,50	6,06	6.503,76
0862 F 0818	0840	11,50	24,22	5,48	11,54	9.661,21
0818 F 0775	0797	9,26	33,48	4,41	15,94	7.379,82
0775 F 0732	0754	8,45	41,93	4,02	19,97	6.368,87
0732 F 0688	0710	7,76	49,69	3,69	23,66	5.507,71
0688 F 0645	0667	9,91	59,60	4,72	28,38	6.612,38
0645 F 0601	0623	10,35	69,95	4,93	33,31	6.449,83
0601 F 0558	0580	12,00	81,95	5,71	39,02	6.958,54
0558 F 0514	0536	13,01	94,97	6,20	45,22	6.975,66
0514 F 0470	0492	15,66	110,63	7,46	52,68	7.705,80
0470 F 0427	0449	20,86	131,49	9,93	62,61	9.366,74
0427 F 0383	0405	25,21	156,70	12,00	74,62	10.208,75
0383 F 0340	0362	15,63	172,32	7,44	82,06	5.657,27
0340 F 0296	0318	11,69	184,02	5,57	87,63	3.718,88
0296 F 0253	0275	8,33	192,35	3,97	91,59	2.291,63
0253 F 0210	0232	17,65	210,00	8,41	100	4.095,19
SOMA		210				110.556,33

Pode-se constatar que a região tem áreas fortemente inclinadas, cuja altimetria varia de aproximadamente 200 a 1100 m, que conseqüentemente tem propensão a ocasionar escoamento superficial rápido (Figura 5.2). No entanto, determinou-se que a bacia hidrográfica apresentou coeficiente de compactidade e fator de forma de bacia hidrográficas mais alongadas, ou seja, menos propensa a enchentes.

Segundo Teixeira (2010), áreas com altos índices na altimetria não são apropriadas para culturas perenes sendo próprias para pastagens ou reflorestamento e apresenta problemas de erosão e impedimento ao uso de máquinas agrícolas.

Figura 5.2 - Curva hipsométrica da área de drenagem do açude Acarape do Meio - 2013.

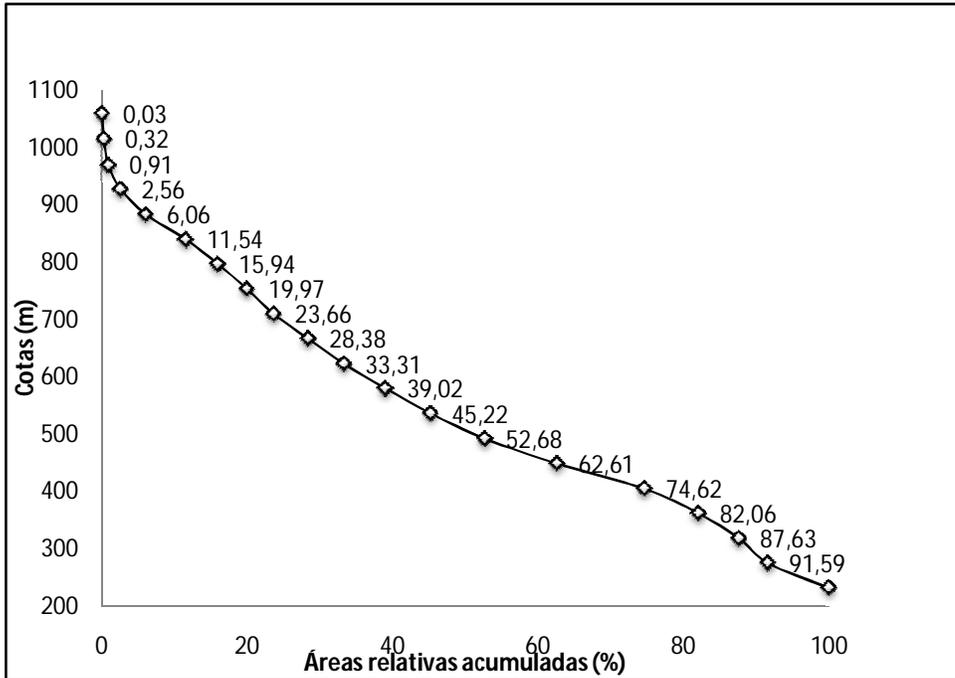
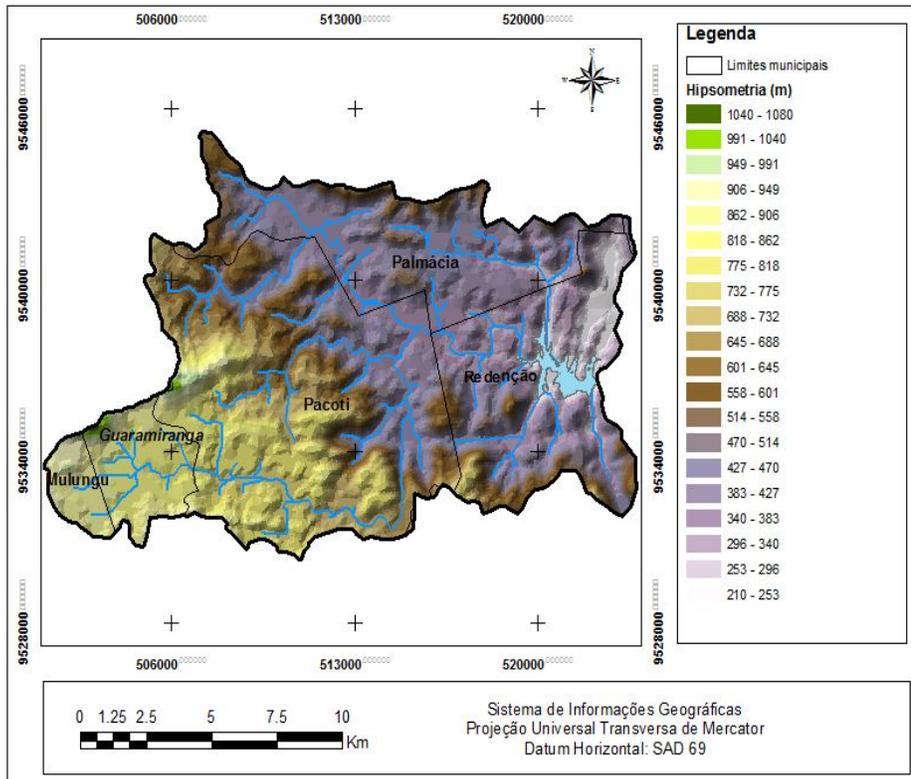


Figura 5.3 - Mapa hipsométrico da área de drenagem do açude Acarape do Meio - 2013.



A partir do processamento da imagem de satélite ResourceSat-1, sensor LISS-3, referente ao dia 04 de outubro de 2012, identificou-se as áreas degradadas na bacia hidrográfica.

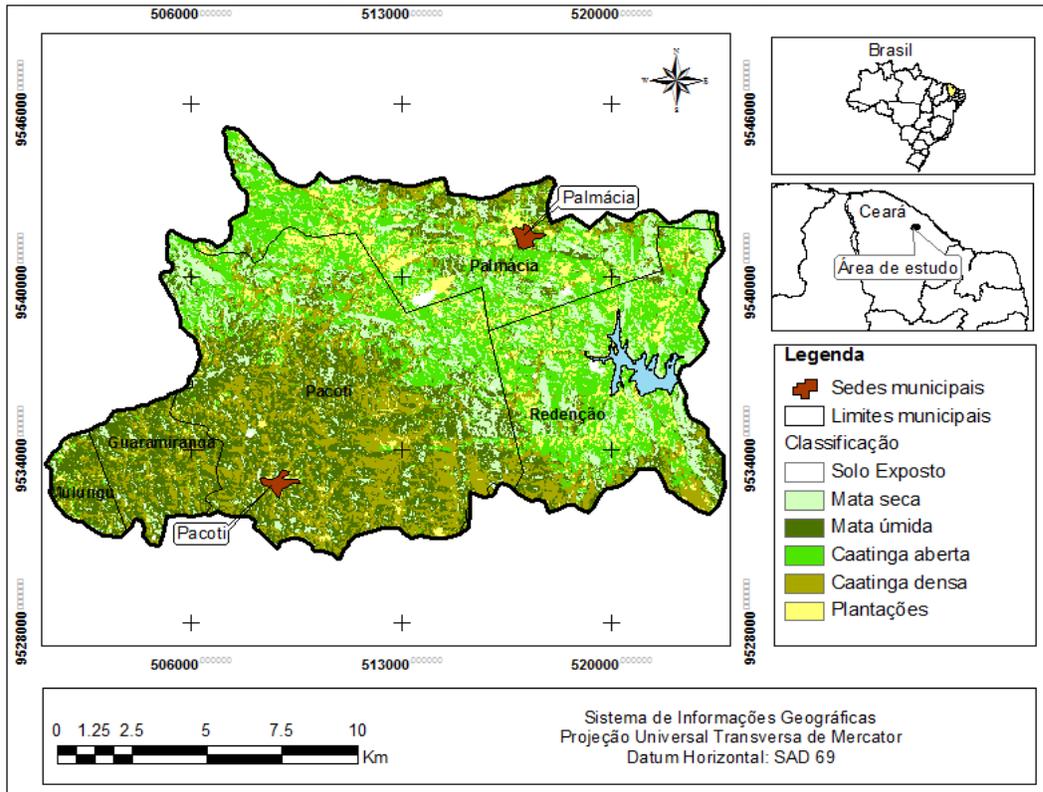
Adotou-se a classificação não supervisionada, composição R5G4B3, onde se identificou que 8,66% da área em estudo têm algum tipo de cobertura vegetal “Mata Seca, Mata Úmida, Caatinga Aberta e Caatinga densa” e 10,31% representam as áreas degradadas “solo exposto e plantações” (Tabela 5.6).

A área degradada é composta dos solos expostos e das plantações, sendo que, às sedes municipais do município de Pacoti, com população de 11.097 habitantes (IPECE, 2009), e de Palmácia, com 12.005 habitantes (IPECE, 2012) estão incluídas neste grupo. Pode-se verificar pela imagem que não existem açudes à montante (Figura 5.4).

**Tabela 5.6** - Resultado da classificação da imagem ResourceSat-1 da bacia hidrográfica - 2012.

Classe	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Água	2,29	1,09
Solo exposto	0,64	0,31
Mata Seca	34,28	16,33
Mata Úmida	54,38	25,90
Caatinga Aberta	56,16	26,75
Caatinga Densa	41,20	19,62
Plantações	21,01	10,00
Total	210	100

Figura 5.4 - Classificação não supervisionada da bacia hidrográfica do Acarape do Meio, 2012.

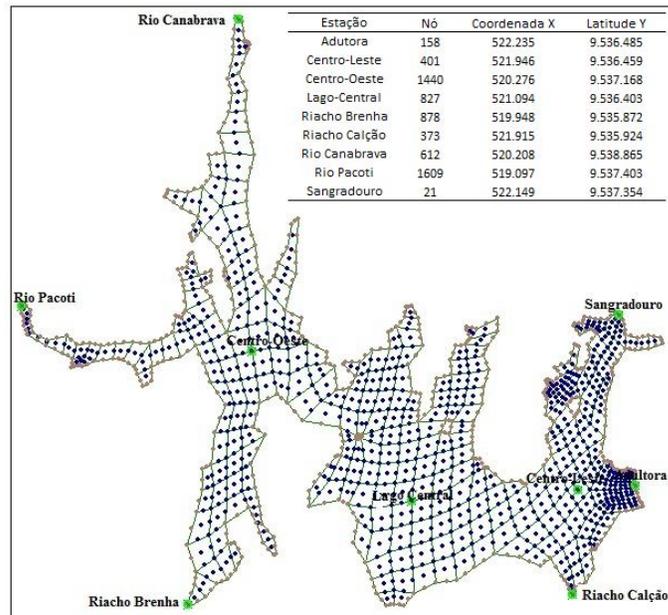


## 5.2 Circulação Hidrodinâmica

Para simular a circulação hidrodinâmica do açude Acarape do Meio - CE foi aplicado o módulo tridimensional (3D) analítico numérico com 11 níveis verticais para perfis de velocidade no campo de escoamento horizontal, acoplado ao módulo 2DH.

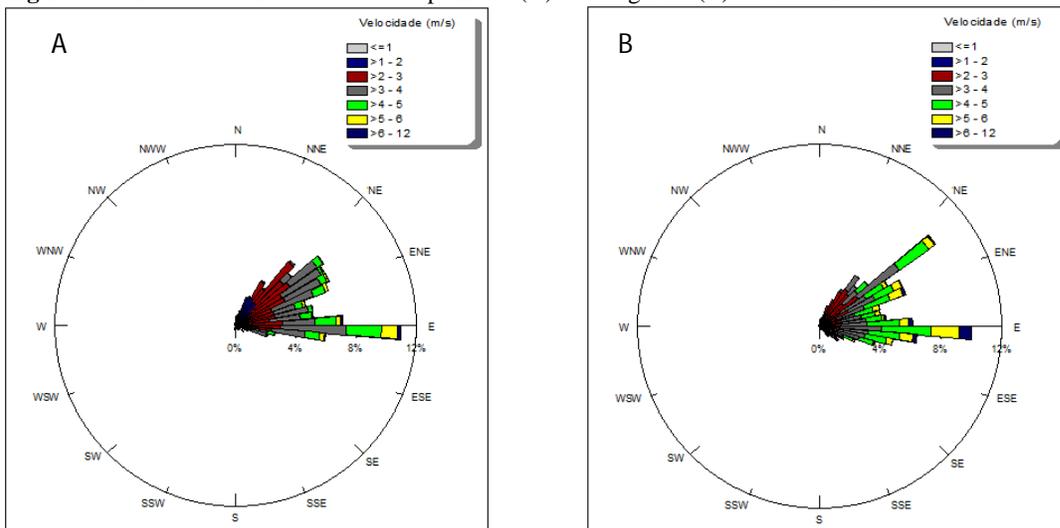
Foram especificadas algumas estações na malha de elementos finitos, com objetivo de visualização dos resultados ao longo dos compartimentos aquáticos representativos das zonas “rio, transição, lacustre”, sendo que, o ponto da adutora (Figura 5.5) corresponde ao monitoramento quantitativo “cotas de níveis” realizados pela COGERH.

**Figura 5.5** - Representação da localização das estações no modelo hidrodinâmico.



A partir da visualização da Figura 5.6A, pode-se inferir que as velocidades dos ventos predominantes na área de estudo são frequentes no intervalo de 3 a 4 m/s, contudo, no segundo semestre (Figura 5.6B) ocorreu à redução dos ventos na faixa supracitada e ocorre o aumento na faixa de 4 a 5 m/s, que são responsáveis por alterações das correntes de velocidades no perfil da coluna de água. A estação automática do INMET que registra as informações climatológicas de vento e precipitação fica localizada na serra de Guaramiranga, o que corresponde a uma distância de aproximadamente 16 km do açude.

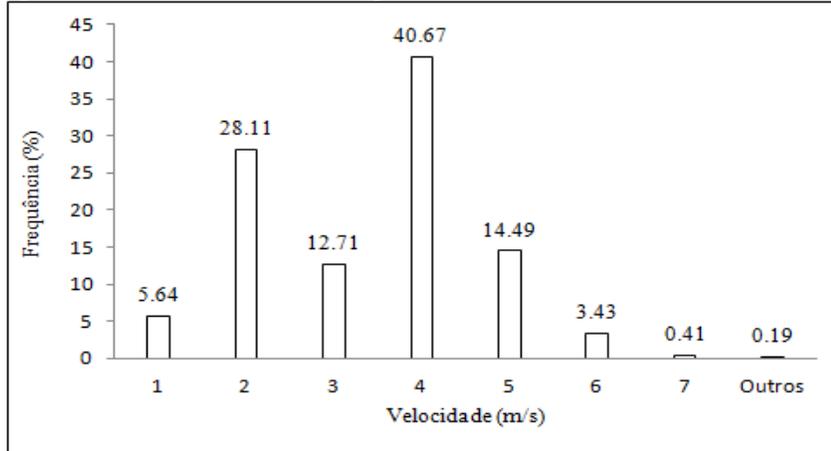
**Figura 5.6** - Rosa dos ventos referente ao primeiro (A) e ao segundo (B) semestre/2012.



Fonte: INMET, 2012

A partir do histograma (Figura 5.7) verificou-se que as velocidade do vento é predominante na faixa que varia de 3 a 4 m/s, ou seja, possuem a maior frequência (40,67%) na área de estudo. Os dados forma registrados a cada 3 horas.

**Figura 5.7-** Frequência das velocidades dos ventos presente na área de estudo, em 2012.

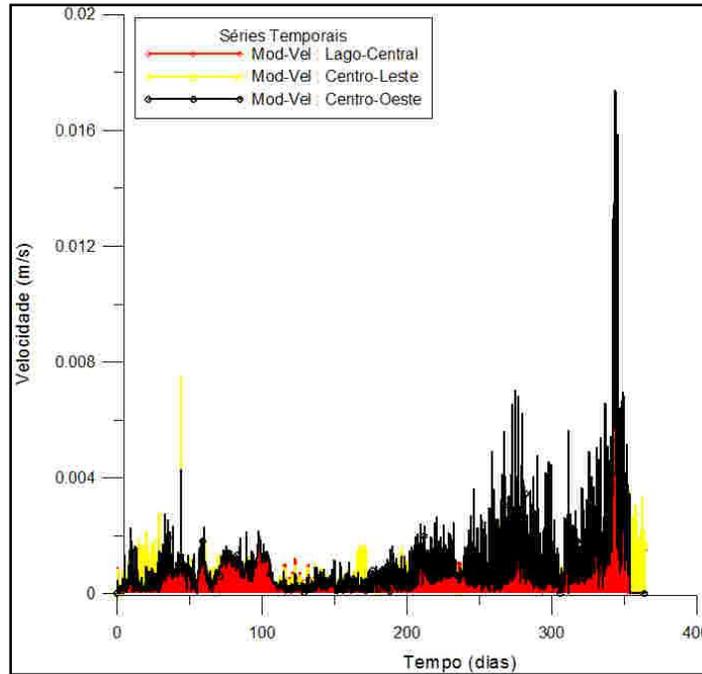


A Figura 5.8 representa o comportamento da circulação hidrodinâmica do açude Acarape do Meio – CE para o primeiro e segundo semestre de 2012. Pode-se constatar que ocorreu o aumento na velocidade das correntes no segundo semestre, que se relaciona com o aumento da velocidade dos ventos para esse período.

A estação Centro-Oeste apresentou o maior de velocidade da circulação das correntes para todo o período analisado. Esse comportamento pode estar relacionado com a menor profundidade da coluna d'água. Nesta região pode ocorrer o revolvimento de sedimentos de fundo e conseqüente ocasionar a mistura da coluna de água.

Em suma, em ambientes rasos os ventos favorecem os processos de mistura da coluna de água, o contrário ocorre em zonas mais profundas. O aporte das vazões afluentes, a presença de variáveis climatológicas como ventos, radiação solar e a compartimentação morfométrica são os principais fatores que alteram o comportamento da hidrodinâmico dos açudes.

**Figura 5.8** - Representação temporal da circulação hidrodinâmica pelo módulo 2DH nas estações do açude Acarape do Meio/2012.



A Figura 5.9 tem o objetivo de mostrar o comportamento da circulação hidrodinâmica das vazões afluentes para o primeiro semestre, com presença de ventos 1 m/s e direção do vento de 163° para o dia 11 de abril, a partir do módulo 2DH promediado na vertical. A velocidade dos ventos foi à menor registrada para o período em que ocorreu precipitação na área. Para estas condições a velocidade das correntes atingiram média de 0,0266 m/s.

Pode-se visualizar que as maiores velocidades das correntes ocorreram nas áreas rasas e de reentrância do açude. Nos demais compartimentos, o módulo de velocidade não teve a mesma sensibilidade para registrar alterações significativas nas correntes de velocidade da circulação hidrodinâmica.

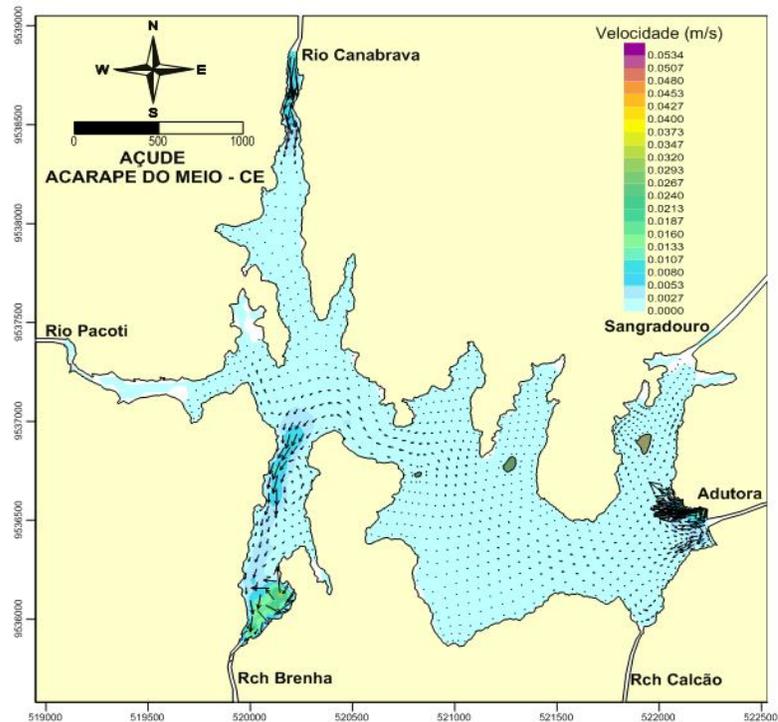
Saliente-se que o aporte das vazões afluentes no primeiro semestre é representativo de período de estiagem “pouca precipitação”, ou seja, em períodos de invernos mais intensos as chuvas podem contribuir com o aumento das vazões e conseqüentemente ocasionar maior alteração na circulação hidrodinâmica.

Franz (2012) desenvolveu pesquisas visando verificar o comportamento das vazões afluentes na circulação hidrodinâmica do açude Iraí a partir do programa SisBaHiA, assim como, realizado no Acarape do Meio. O açude Iraí tem capacidade de armazenamento de

58.000.000 m<sup>3</sup> e profundidade média de 4,73 m. Foi constatado que os ventos de 9,5 m/s “valor máximo” provoca correntes com velocidade de 0,232 m/s nos locais mais rasos, enquanto que no instante sem vento, mas com aporte afluyente, este valor foi de apenas 0,0493 m/s.

Faz-se a observação que as cores em branco que aparece nas figuras dos resultados das simulações são áreas secas, pois o açude estava com pouca capacidade de armazenamento de água, devido ao período de estiagem.

**Figura 5.9** - Simulação da circulação hidrodinâmica a partir do módulo 2DH para o dia 11 de abril de 2012.



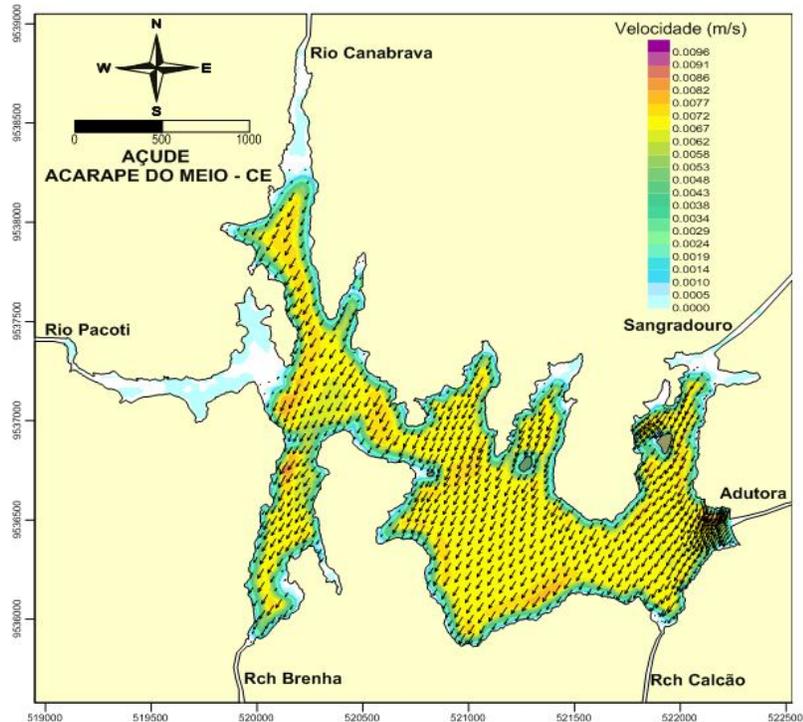
Os resultados expostos na Figura 5.10 a Figura 5.21 visam representar a circulação hidrodinâmica para o segundo semestre de 2012 com aplicação do módulo 3D nos diferentes compartimentos do açude Acarape do Meio, na presença de diferentes velocidades dos ventos, que estão representados na Figura 5.6. Foi constatado, com base nesta figura, que as maiores variações ocorreram principalmente no faixa de 2 a 5 m/s, representadas pela direção predominante nas zonas Nordeste a Leste.

A velocidade dos ventos em torno de 2 m/s representa 28,11% da frequência. Pode-se visualizar na Figura 5.10 a Figura 5.12 para o dia 8 de agosto, que a ação do vento com direção de 18° é mais intensa na superfície, cuja velocidade média na coluna de água é

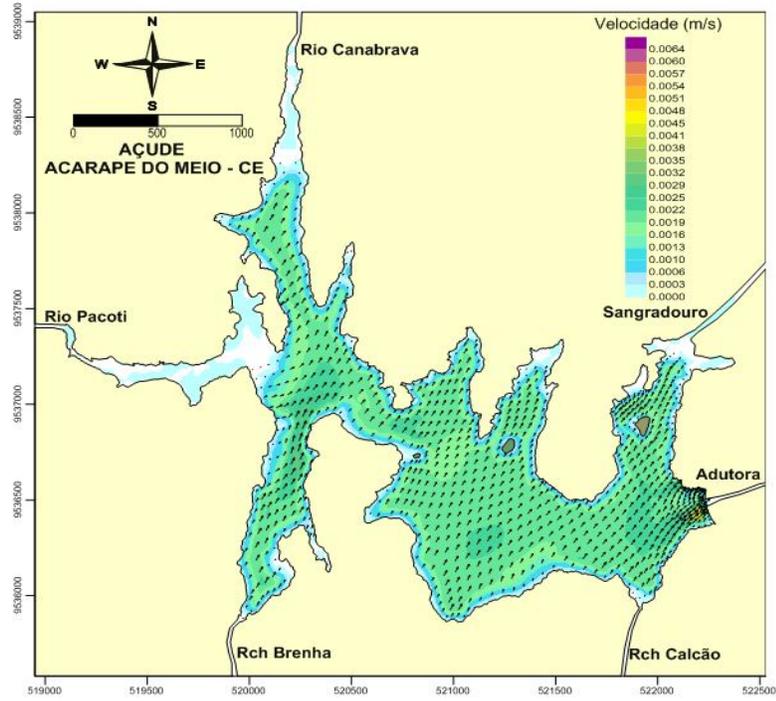
0,0048 m/s. Visualiza-se que a partir da zona intermediária ocorreu a inversão da direção dos correntes, ou seja, ocorre o acúmulo “empilhamento” da água na margem oposta ao vento, causando correntes de regresso pela camada mais profunda. Observa-se que a velocidade média dominante na camada do meio é menor (0,0030 m/s) que as correntes no fundo (0,0034 m/s) principalmente nas zonas de transição e lacustre.

Simulação da hidrodinâmica com o programa SisBaHiA para velocidade de ventos similares ao que ocorre no Acarape do Meio, foi feita por Santos (2012) no açude de Vargem das Flores – MG, que tem profundidade máxima de 20,6 m, onde foi identificado que as velocidades são baixas em todo o domínio do açude e não ultrapassam 0,11 m/s para ventos de 2,6 m/s, exceto nos deltas de alguns tributários, como o do Córrego Água Suja, onde as velocidades residuais são intensificadas pela vazão, alcançando 0,24 m/s.

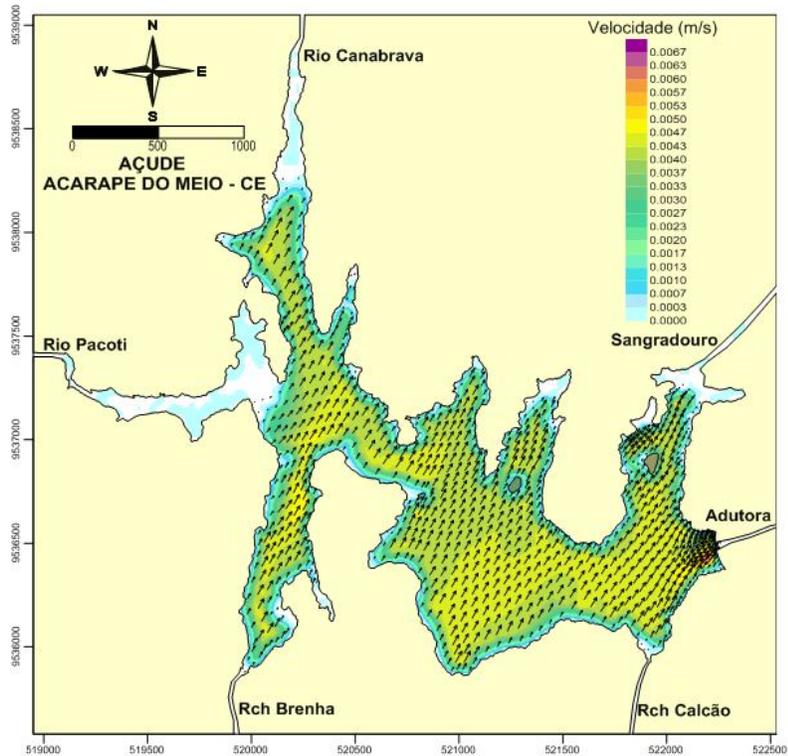
**Figura 5.10** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 2m/s no dia 08/08/2012.



**Figura 5.11** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 2 m/s no dia 08/08/2012.

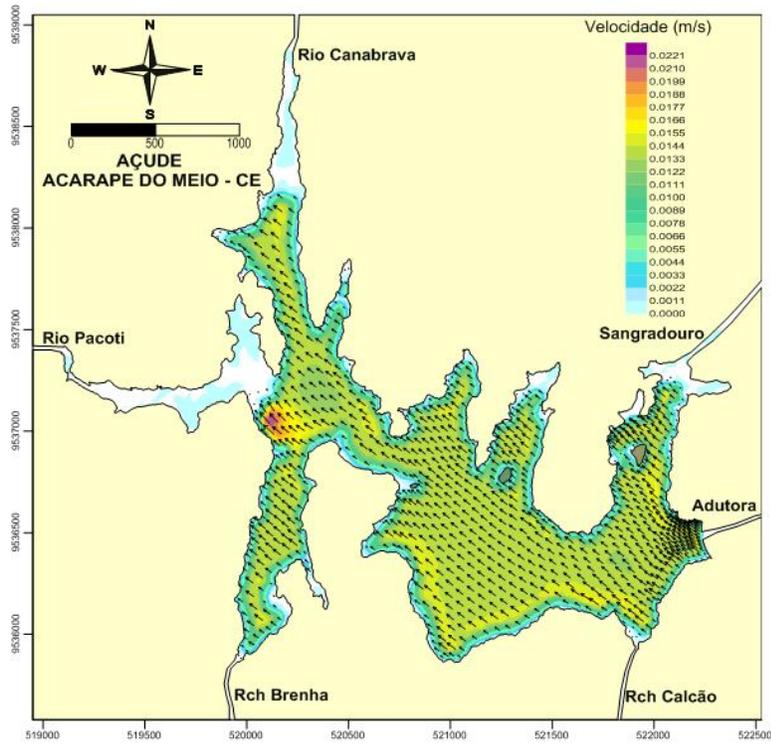


**Figura 5.12** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada do fundo com vento de 2 m/s no dia 08/08/2012.

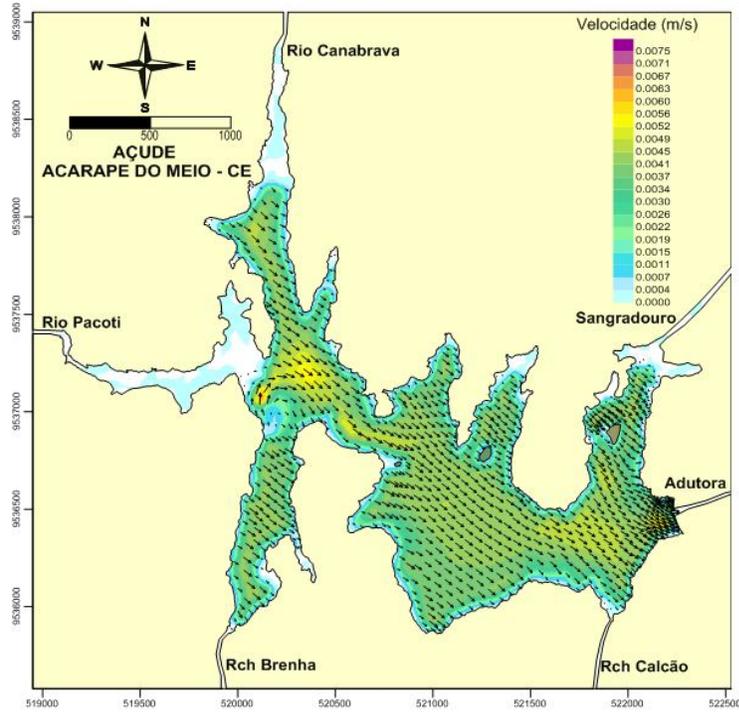


A velocidade do vento com cerca de 3 m/s apresenta frequência de 12,71% para o período em estudo. Visualiza-se a partir da Figura 5.13 a Figura 5.15, que no dia 10 de agosto o vento com direção de 101°, atingiu velocidades médias dominantes na superfície de 0,0108 m/s. A camada do meio apresentou velocidades médias de 0,0037 m/s e o fundo de 0,0039 m/s.

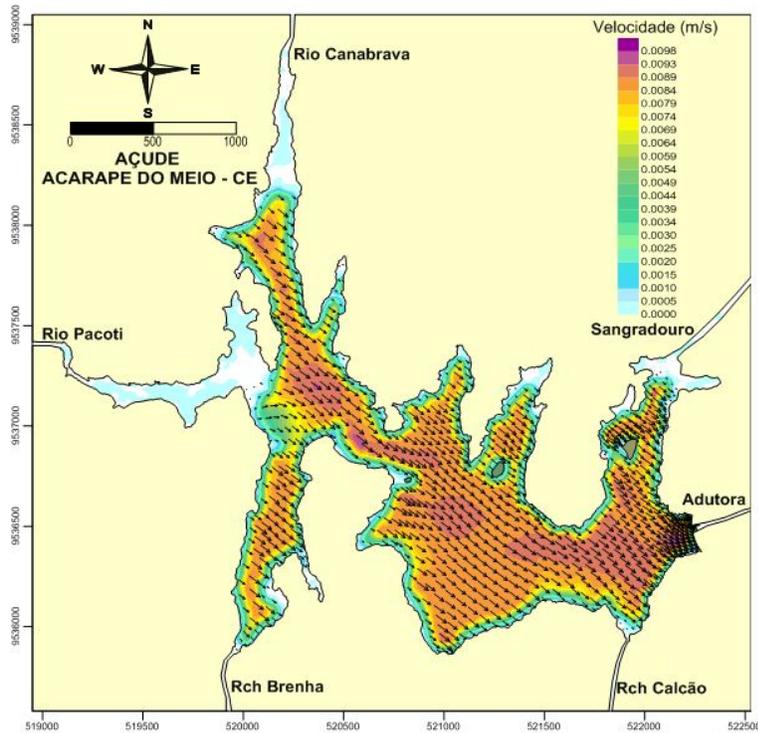
**Figura 5.13** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 3 m/s no dia 10/08/2012.



**Figura 5.14** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 3 m/s no dia 10/08/2012.



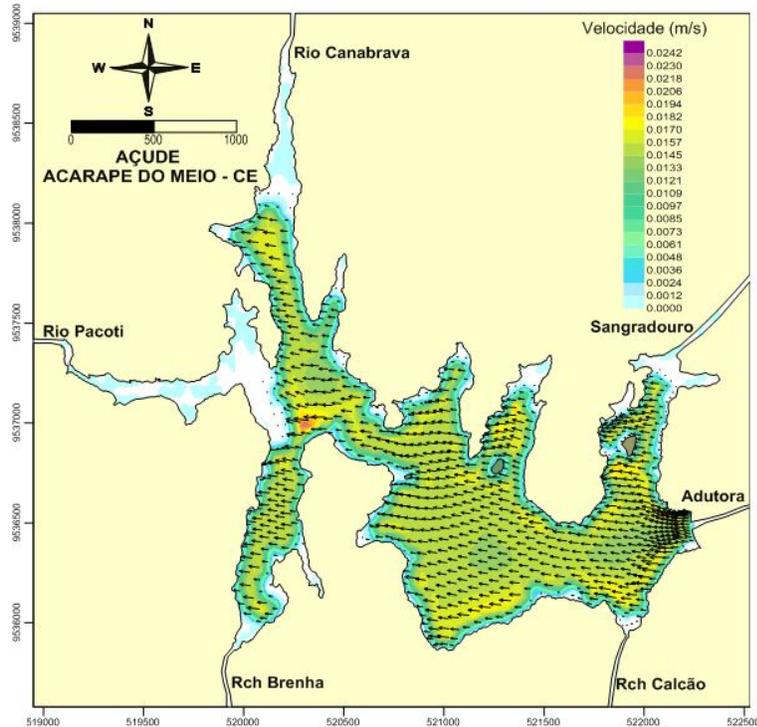
**Figura 5.15** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada do fundo com vento de 3 m/s no dia 10/08/2012.



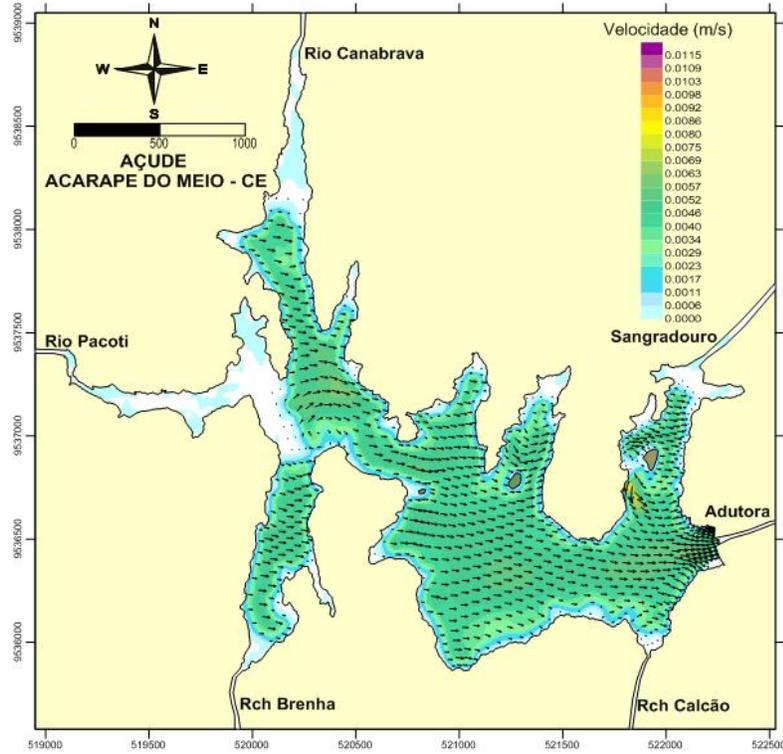
As velocidades de aproximadamente 4 m/s são dominantes na região, cuja frequência atingiu valores de 40,67%. Visualiza-se na Figura 5.16 a Figura 5.18, que no dia 28 de setembro, o vento na direção 91° atingiu velocidade média na superfície de 0,0119 m/s. A camada do meio apresentou velocidades médias de 0,0057 m/s e o fundo de 0,0055 m/s.

Em reservatório com rios perenes utilizados para geração de energia elétrica os valores das correntes da circulação hidrodinâmica são significativamente elevados quando se compara aos valores encontrados no Açude Acarape do Meio. Spiegelberg (2010) estudou a hidrodinâmica do reservatório da Usina Hidroelétrica de Estreito no Rio Tocantins com uso do SisBaHiA, e constatou que a intensidade das velocidades em todo o reservatório durante os períodos de estiagem tem valores inferiores a 0,3 m/s. Durante a cheia, o reservatório apresentou velocidades consideravelmente mais elevadas. A região central do reservatório possui diversas ilhas e curvas, e nestes pontos de estrangulamento da área da seção hidráulica ocorrem maiores velocidades em períodos de cheias, as velocidades atingem 1,4 m/s.

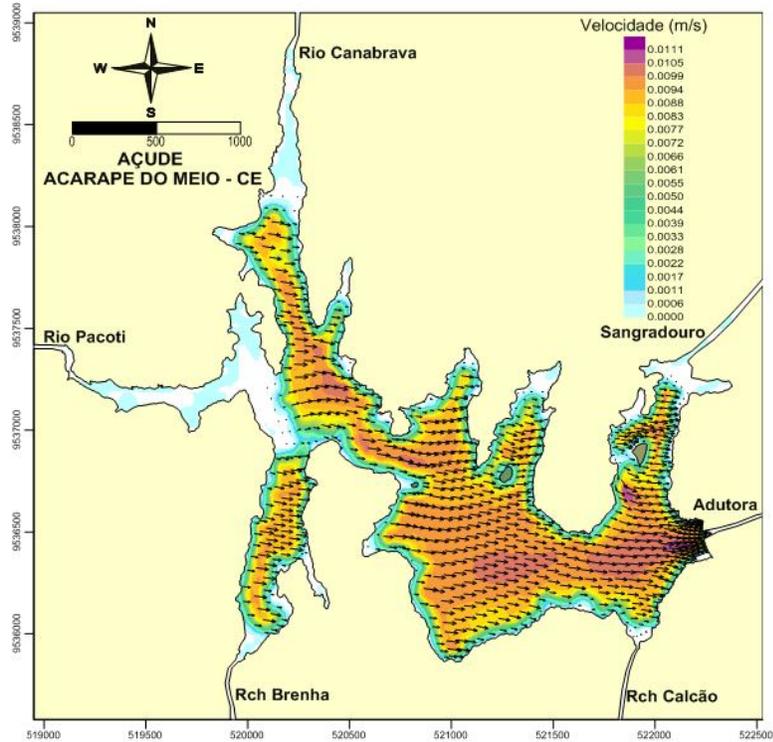
**Figura 5.16** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 4 m/s no dia 28/09/2012.



**Figura 5.17** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 4 m/s no dia 28/09/2012.



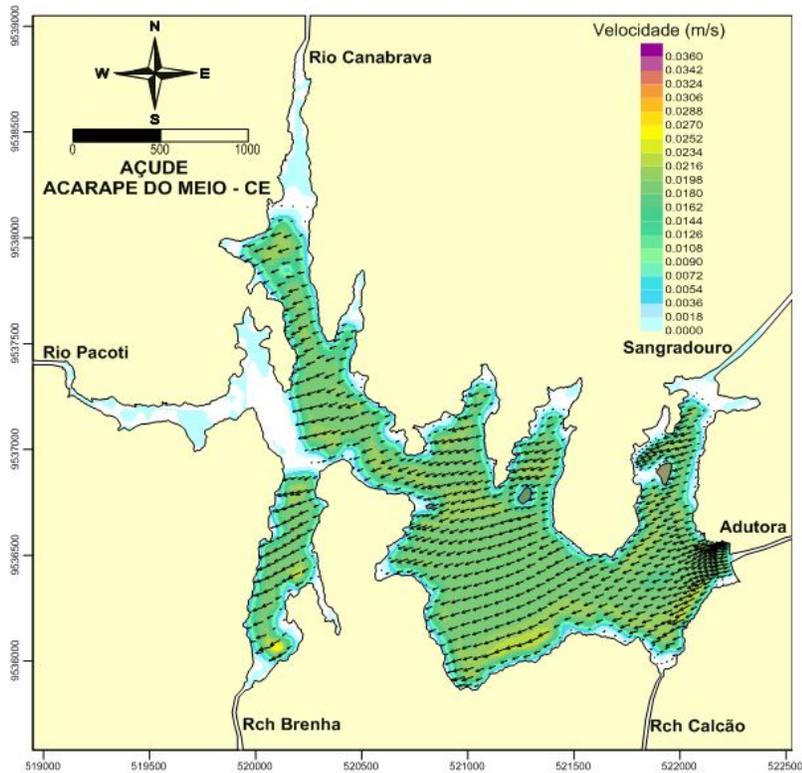
**Figura 5.18** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada do fundo com vento de 4 m/s no dia 28/09/2012.



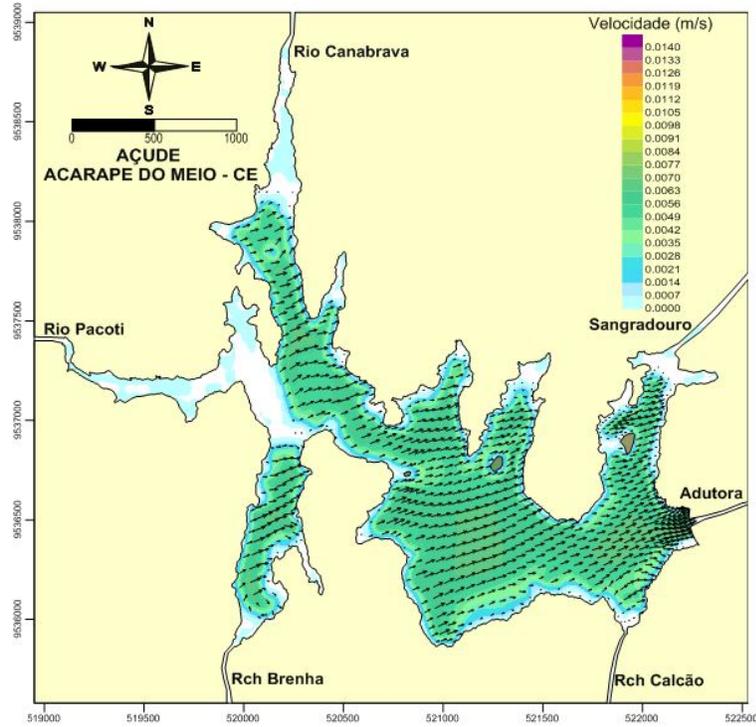
As velocidades do vento em torno de 5 m/s apresentou frequência 14,49%. Em 21 de outubro constatou-se que as velocidades médias superficiais com direção dos ventos de 90° atingiram valores médios na camada superficial de 0,0180 m/s (Figura 5.19). Na camada do meio o domínio da modelagem atingiu valores médios de 0,0070 (Figura 5.20) e no fundo de 0,0068 (Figura 5.21). Observa-se que a partir da velocidade do vento com 4 m/s, as velocidades intermediárias passaram a ser superior a de fundo.

Valores de circulação hidrodinâmica similar ao que ocorre no açude Acarape do Meio foi verificado no reservatório Serra Azul, utilizando o programa SisBaHiA. O Reservatório Serra Azul tem profundidade média de 8,9 m e foi constatado no instante de menor intensidade de vento (0,5 m/s), velocidades da circulação hidrodinâmica de 0,01 m/s (FERNANDES, 2012).

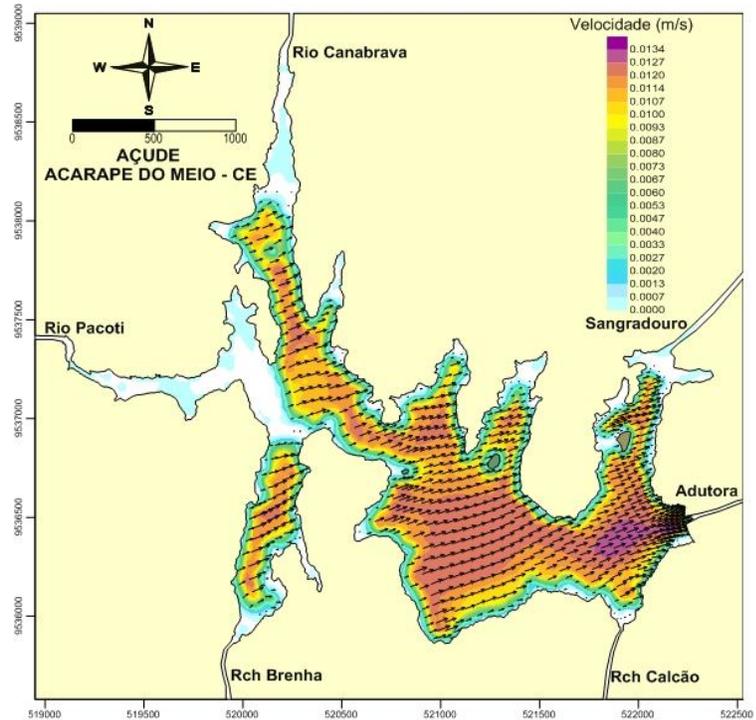
**Figura 5.19** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 5 m/s no dia 21/10/2012.



**Figura 5.20** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada intermediária com vento de 5 m/s no dia 21/10/2012.



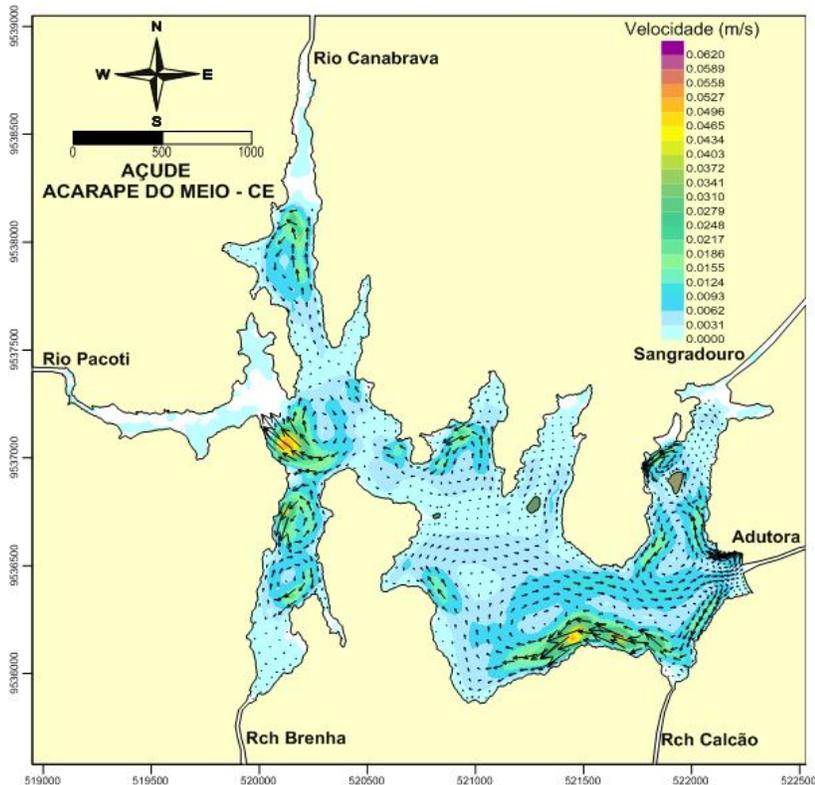
**Figura 5.21** - Simulação da circulação hidrodinâmica na camada superficial com vento de 5 m/s no dia 21/10/2012.



No dia 14 de fevereiro ocorreu um evento considerado extremo, em que, o vento atingiu velocidades de pico de 12 m/s à 1h00 da manhã na direção do vento de 99°. Esse foi o maior valor registrado em 2012. O episódio pode ter ocasionado mudanças significativas na biodiversidade do ambiente, causado pelo revolvimento dos sedimentos “nutrientes” de fundo para o perfil da coluna de água. Visualiza-se na Figura 5.22 que as correntes de velocidades na superfície atingiram valores de 0,0620 m/s nas zonas mais rasas.

Evento como este pode ocasionar a mortandade de peixes em represas, pela presença de gases tóxicos formados pela decomposição heterotrófica da matéria orgânica na camada do hipolímnio em ambientes estratificados, que retorna a camada superficial, ou mesmo causando asfixia em decorrência da redução do oxigênio da camada do epilímnio. No Ceará já ocorreram diversas eventos de mortandades de peixes, principalmente em produção intensiva “gaiolas”.

**Figura 5.22** - Simulação da circulação hidrodinâmica (módulo 2DH) com vento de 12m/s no dia 14/02/2012.



Em suma, constatou-se que na camada superficial, as velocidades superficiais são mais elevadas, principalmente nas áreas de reentrâncias do manancial, devida a pouca profundidade. Nestas áreas fluviais as velocidades aumentam significativamente quando se compara com a zona de transição e lacustre.

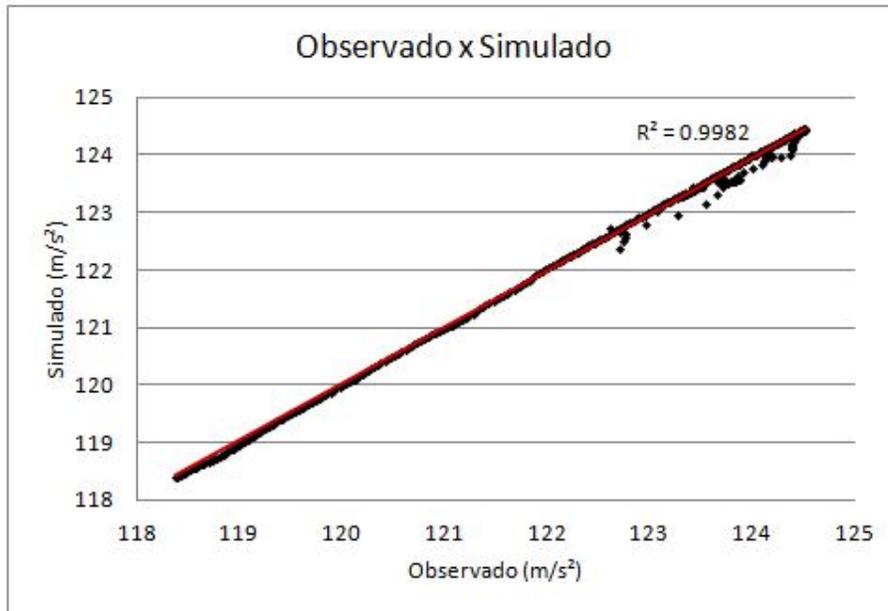
Também se verificou que as correntes na zona intermédia são menores que a zona do fundo, na presença de ventos com velocidades mais baixas e invertendo-se com valores superiores a 4 m/s. Em todos os perfis analisados ocorreram à inversão do fluxo das correntes de velocidades a partir da zona intermediária.

### 5.2.1 Aspectos Relacionados à Calibração do Modelo

Diariamente foram coletadas as cotas dos níveis do manancial, representativo da capacidade de armazenamento e que foram absorvidos no modelo hidrodinâmico como parâmetro de calibração. Pode-se verificar a partir da Figura 5.23 que os níveis simulados foram similares aos observados em campo “*in loco*”, tal resultado é um indicador de calibração do modelo numérico do período em estudo. Não foram realizadas medidas de velocidades das correntes devido à falta de equipamentos adequados, visto que, as correntes são muitos lentos, necessitando de equipamento muitos sensíveis para identificar as velocidades.

Obteve-se pela aplicação da estatística do  $R^2$  “função poliminial” um valor de 0,99, ou seja, os níveis simulados pelo modelo hidrodinâmico 2DH foram expressivos, podendo-se inferir que se alcançou uma calibração significativa. Existem diversos fatores que contribuem com o erro simulado de 0,01, dentre estes, citam-se: a longa distância de 16 km entre a estação do INMET e o açude Acarape do Meio; o entorno do açude apresenta contornos íngremes e conseqüentemente altera a direção e as velocidades dos ventos. Além destes, pode-se fazer inferência aos dados de entrada do modelo, como: confecção de malhas e batimetria conforme sua geometria, dados fluviométricos representativos do período de chuvas.

**Figura 5.23** - Representação dos níveis observados x simulados para o ano de 2012.

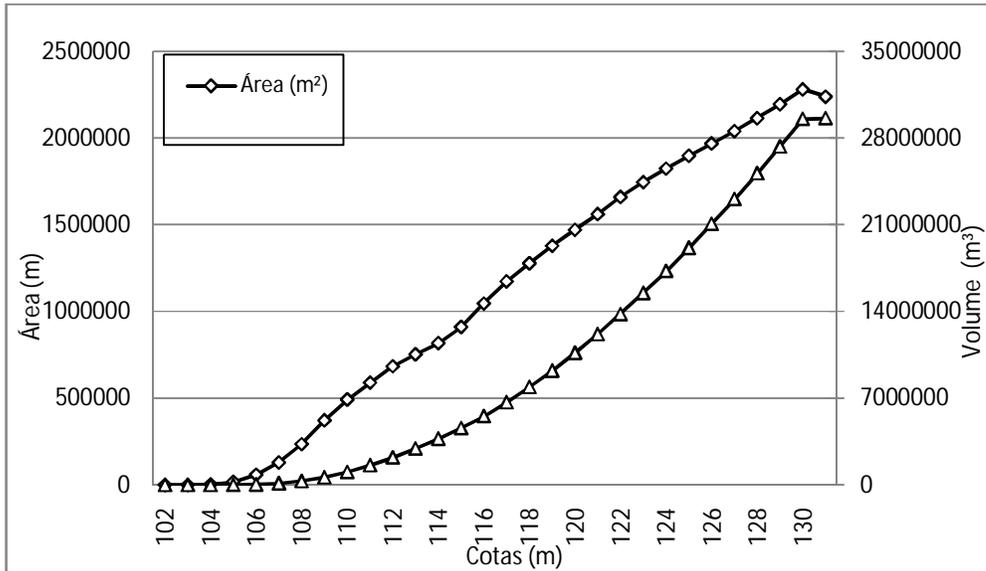


No início do ano (01 de janeiro/2012) o volume armazenado na represa estava na cota 124,42 m (18.005.996 m<sup>3</sup>) e terminou o ano (31 de dezembro/2012) na cota 118,35 (7.618.998 m<sup>3</sup>), ou seja, 25% da capacidade total.

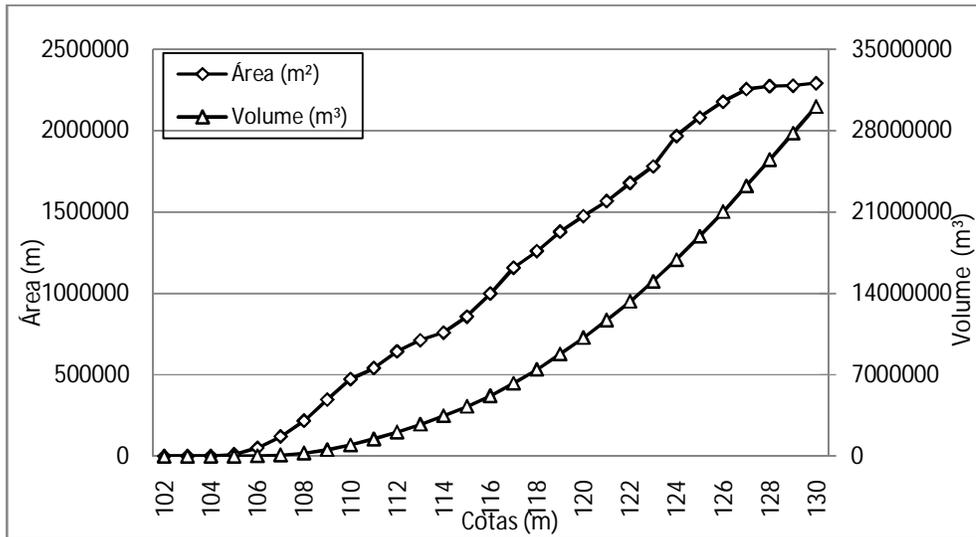
A redução do volume total deve-se a processos naturais de evaporação, atendimento aos múltiplos usos: atender parte da demanda do abastecimento da capital cearense, dessententação de animais no entorno e irrigação de culturas. É preocupante ver a pouca disponibilidade da água, pois o volume morto de 3.008.414 m<sup>3</sup> destina-se principalmente a acomodar a carga de sedimentos afluentes e a sobrevivência da biodiversidade existente na represa.

Também se obteve bom resultado de calibração pelas curvas hipsométricas “cota-área-volume”. Visualizar na Figura 5.24 os resultados com base na batimetria e na Figura 5.25, os resultados simulados pelo modelo.

**Figura 5.24** - Curva hipsométrica a partir dos dados de campo de batimetria, 2012.



**Figura 5.25** - Curva hipsométrica simulada pelo modelo hidrodinâmico, 2012.



### 5.3 Taxa de Renovação

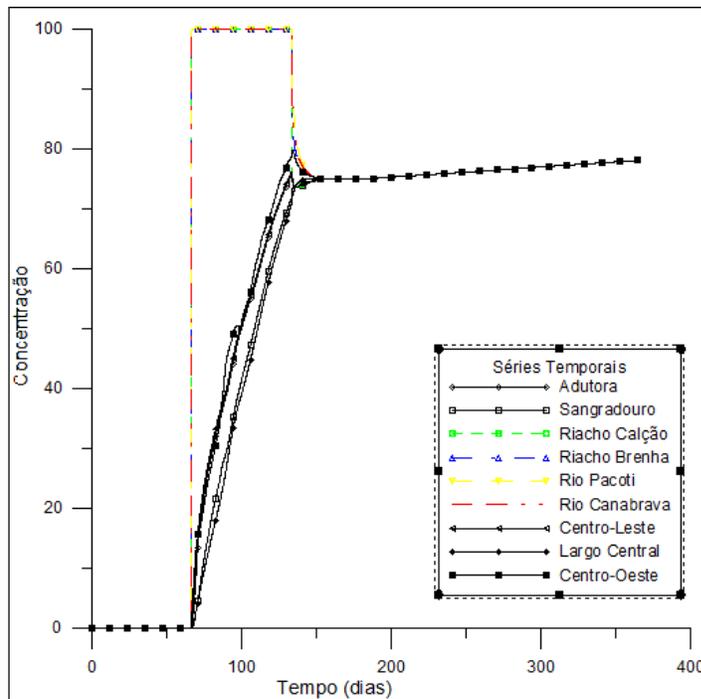
Verifica-se a partir da visualização da Figura 5.26 que as taxas de renovação estão associadas ao início do fluxo no final do mês de fevereiro/2012. Foi estimado pelo modelo que ocorreu renovação total (100%) das águas apenas nas quatro áreas de reentrâncias proveniente das contribuições dos fluxos afluentes no período de chuvas (final de fevereiro a a-

bril/2012), cujas linhas de contribuições dos rios e riachos encontram-se destacadas na figura abaixo.

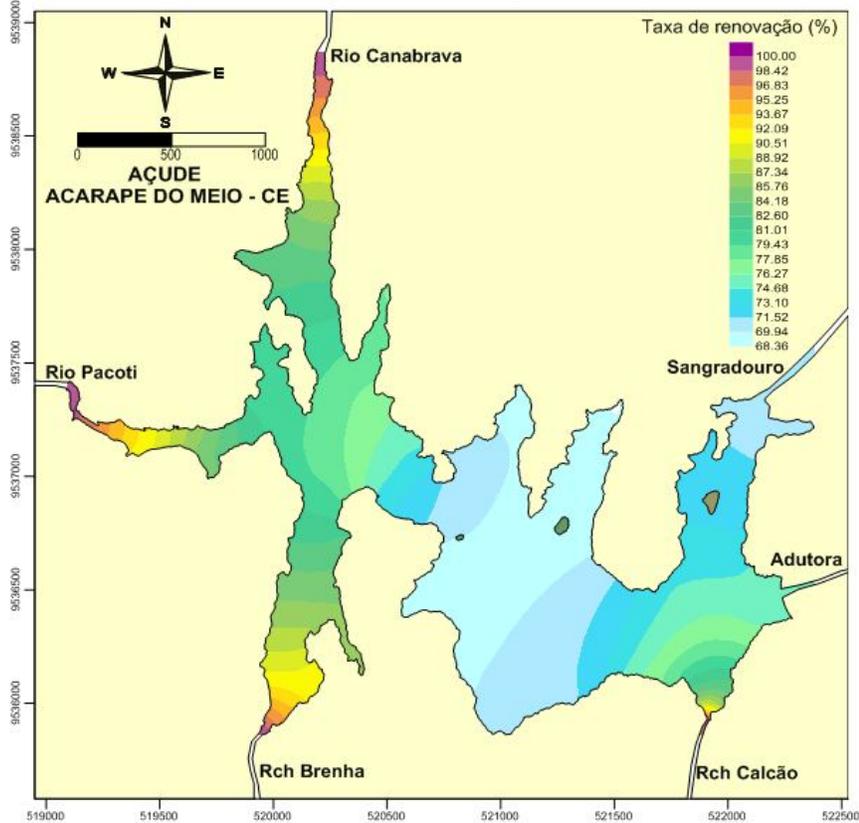
Para as demais estações visualiza-se que a taxa de renovação a não atingiu 100% de renovação da coluna d'água. Observa-se que as curvas se mantiveram quase constantes a partir do término do aporte das vazões afluentes. Sendo que, a pequena ascendência "todas as curvas" pode associar-se a presença de vento na superfície com posterior defluencia pela adutora.

Visualiza-se na Figura 5.27, a espacialização do comportamento hidrodinâmico das taxas de renovação. Como supracitado, obteve-se renovação total da coluna d'água apenas nas reentrâncias da represa e os menores valores de renovação estão na região central da represa.

**Figura 5.26** - Comportamento hidrodinâmico das taxas de renovação nas estações plotadas na malha de elementos finitos, 2012.



**Figura 5.27** - Simulação das taxas de renovação no açude Acarape do Meio, 2012.



#### 5.4 Tempo de Residência

Em relação ao resultado (Figura 5.28) do modelo de transporte Lagrangeano com relação às estimativas dos tempos de residência “Langrangeano 2DH” destaca-se os seguintes aspectos:

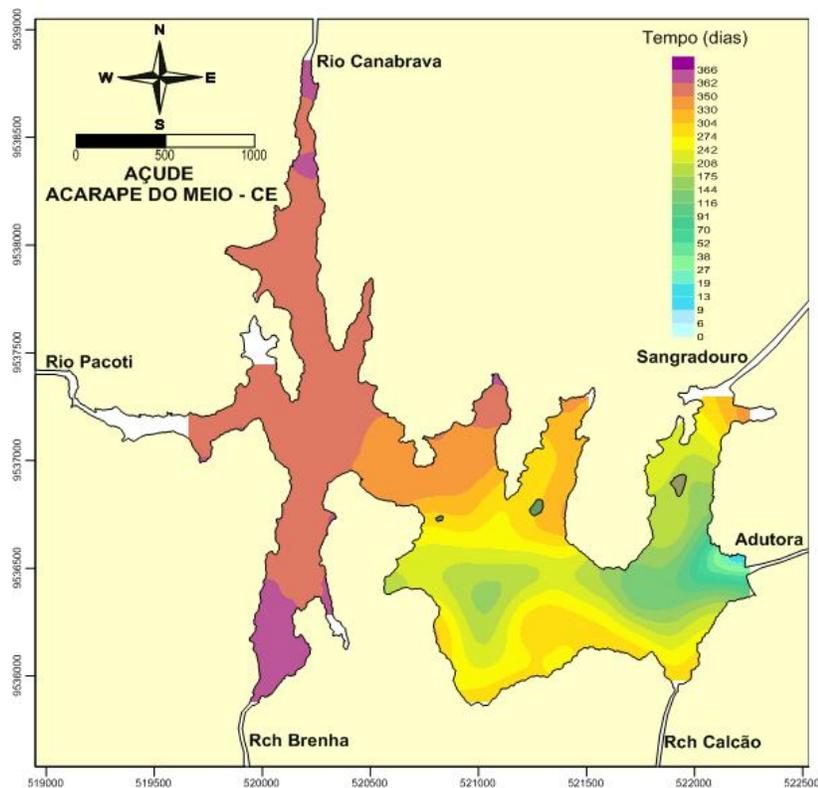
- Identificou-se regiões com tempo de tempo de retenção hidráulica superiores a 1 ano.
- Os fluxos afluentes nas reentrâncias possuem os maiores valores de tempos residuais.
- A maioria dos compartimentos do açude tem tempo de residência superior a 100 dias.
- O tempo de residência depende essencialmente do aporte dos fluxos das vazões de montante e da morfometria do açude. Os altos valores de retenção associam-se ao período de estiagem na região “pouca precipitação”.

- Açudes com tempo de residência elevado favorecem os processos de estratificação, que ocasiona alterações nos processos cinéticos, promovendo a proliferação de organismos resistentes às altas concentrações de material dissolvido e particulado.

Segundo Sperling (1999), um lago com contorno irregular das margens, ou seja, possui o formato dendrítico “várias reentrâncias ou baías”, o tempo de residência da água é mais elevado e favorece o acúmulo de material nestas regiões, que são ambientes rasos, de pouca movimentação da água e com a coluna líquida intensamente exposta à radiação solar. Todas estas condições proporcionam tanto a atividade de decomposição de matéria orgânica quanto o crescimento de microalgas.

Açudes rasos e com alto tempo de residência é esperada uma forte influência de ventos na circulação hidrodinâmica (FRANZ, 2010).

**Figura 5.28** - Visualização espacial do tempo de residência no açude.



O tempo de residência - TR da água é uma das variáveis mais importantes que influencia os processos químicos e biológicos que ocorrem nos açudes, podendo induzir condições favoráveis para a ciclagem dos nutrientes e para o desenvolvimento do fitoplâncton e das macrófitas aquáticas, ou seja, quanto maiores os tempos de residência, maiores tenderão

a serem as alterações na qualidade da água do reservatório em relação as dos rios originais (STRASKRABA, 1999 *apud* LACTEC, 2009). O mesmo considera que reservatórios com tempos de residência inferiores a duas semanas sejam ecossistemas com comportamentos similares aos de rios; com TR superiores a duas semanas e menor que um ano sejam ambientes com posição intermediária entre rio e lago; e com TR superiores a um ano, sejam ecossistemas com características bastante próximas a lacustres.

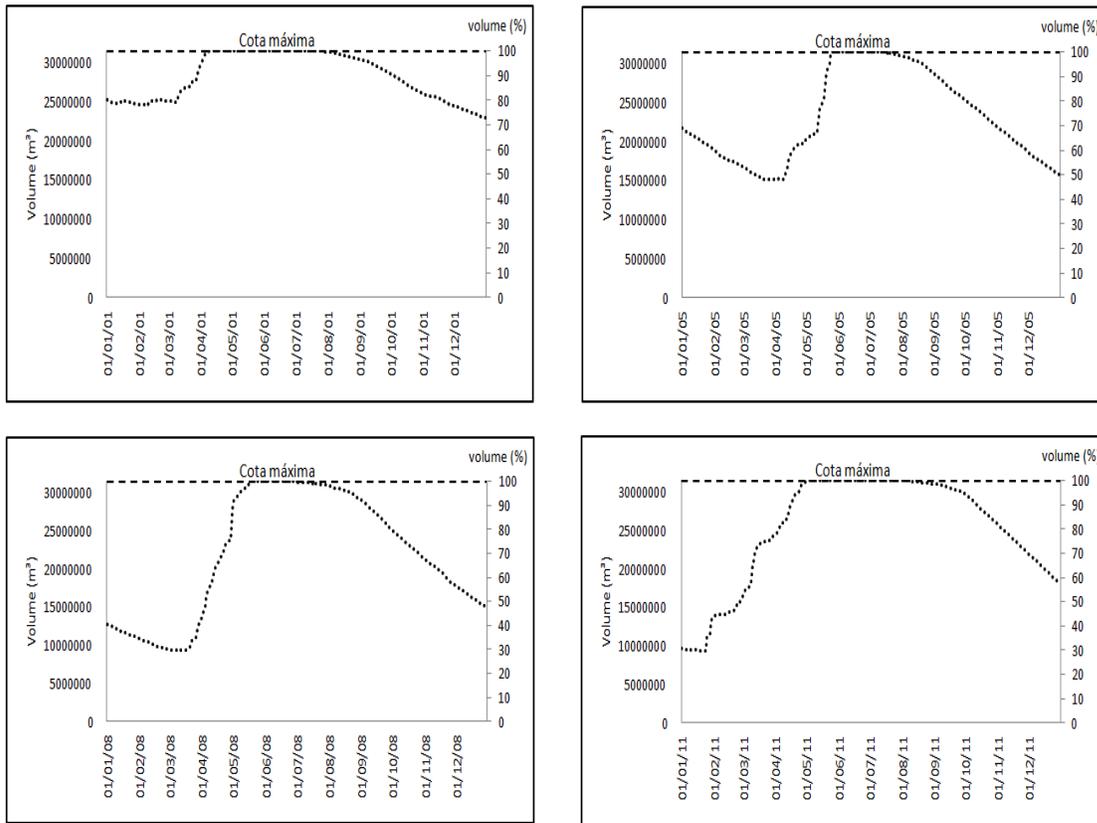
## **5.5 Componentes Ópticos Ativos Presente na Água**

Após o processamento digital das quatro imagens Landsat 5 – TM, composição R5G4B3, foi possível verificar que ocorreu um aumento dos principais constituintes com base na resposta espectral dos componentes opticamente ativos presentes na água.

Salienta-se que existe limitação quanto ao processamento da imagem quando existe cobertura de nuvem total ou mesmo parcial. Também ocorre a perda de refinamento dos espectros quando se compara com dados de sensores hiperespectrais.

Pode-se constatar com base na Figura 5.29 que o açude sangrou em todos os anos a que se referem os períodos em estudo. A seguir, apresentam-se os volumes para os respectivos períodos em que foram obtidas as imagens: 01 de agosto de 2001 (99,53% do volume), 27 de julho de 2005 (99,86% do volume), 03 de julho de 2008 (99,72% do volume) e 29 de agosto de 2011 (98,74% do volume).

**Figura 5.29** - Níveis volumétricos do açude Acarape do Meio, referentes aos anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.



Fonte: COGERH.

Para todas as imagens foram coletados espectros relativos aos oitos pontos de monitoramento qualitativo realizado pela COGERH. As bandas espectrais selecionadas (0,40 - 0,90  $\mu\text{m}$ ) abrangem a região do espectro eletromagnético do visível e que interagem com o corpo hídrico.

As amostras espectrais para o dia 01 de agosto de 2001 apresenta um pico de reflectância em 0,569  $\mu\text{m}$ , “banda 2/verde”, atingindo valores de reflectância na faixa de 1,38 a 1,97%. Observa-se que o ponto ACA – 03 e ACA – 09 apresentam maior concentração de substância e que correspondem aos pontos de maior reflectância na imagem fatiada (Figura 5.30).

Em 27 de julho de 2005 (Figura 5.30) ocorreu o descolamento do pico de reflectância da região do verde (0,7 a 1%) para o vermelho próximo, que variou de 1,08 a 1,62%. Dentre as imagens processadas, esta apresenta resposta espectral de menor albedo. O comportamento espectral indica que existe predominância de sedimentos em relação à de fitoplâncton.

ton. A maior reflectância ocorre no ponto ACA – 03, que se relaciona com a informação espectral da imagem fatiada.

A presença de sólidos em suspensão pode ser proveniente do aporte de sedimentos proveniente da bacia de contribuição devido às chuvas presentes na região e corrobora com o resultando do fator de envolvimento de 0,91, que indica bacia de drenagem com propensão para ao transporte de sedimentos. Foi verificado pelo processamento da imagem Resource Sat de 2012 que a bacia de drenagem encontra-se 10,31% degradada e no entorno existem alterações antrópicas.

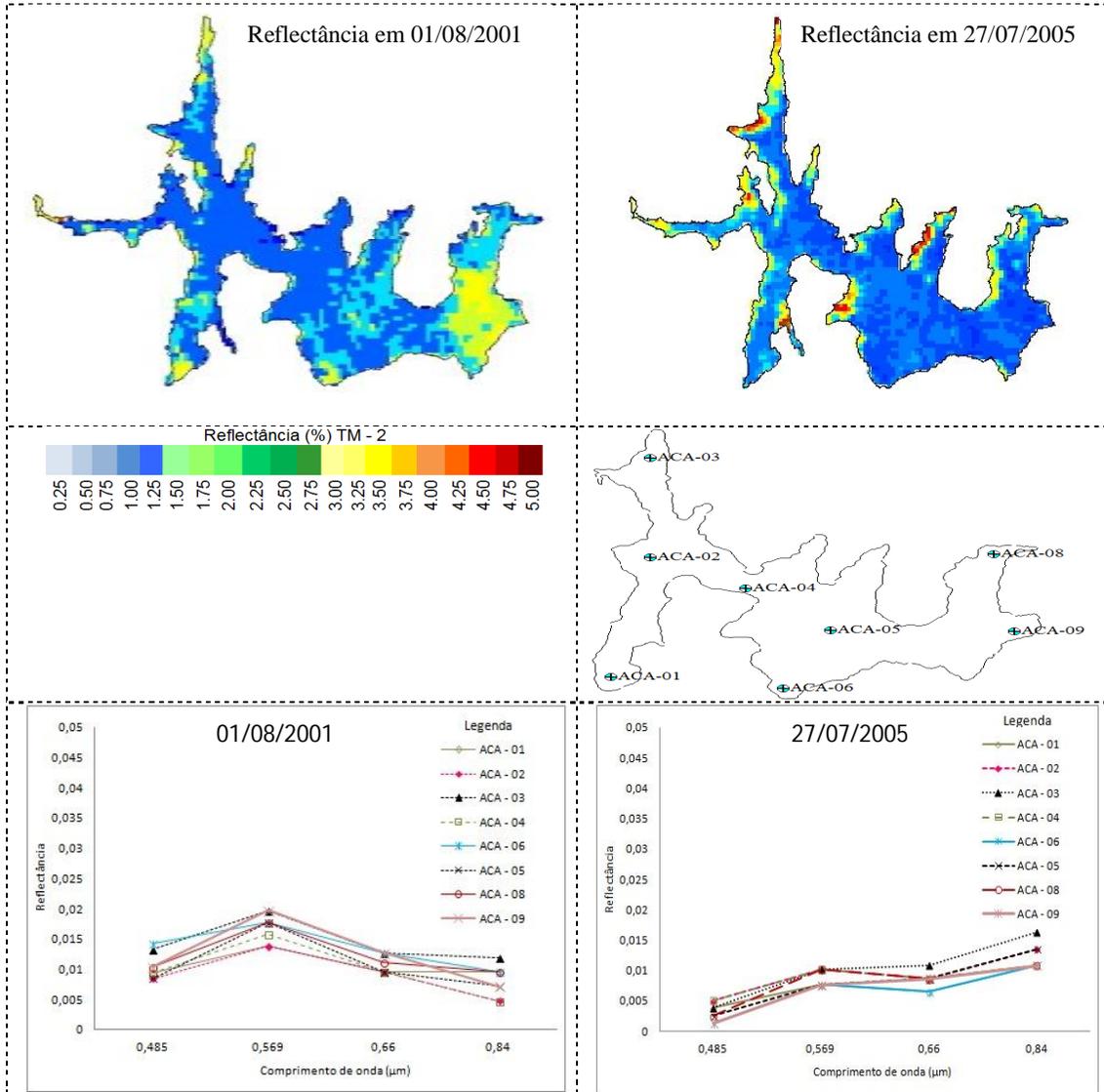
Pode-se verificar a partir da análise das curvas espectrais e visualização das imagens fatiadas que ocorre correlação com os resultados de clorofila *a* realizados em laboratório (Tabela 5.7), principalmente quanto ao ponto ACA - 03 "afluência do rio Canabrava", que apresentou maior concentração dos constituintes em ambas as imagens. Em contrapartida, o ponto ACA-04, ACA – 02, em 2001, continham menores quantidades de substâncias em suspensão e que foram confirmados através da clorofila *a*.

Pesquisas realizadas por Ennes & Galo (2010) utilizando imagem hiperespectral, Hyperion/EO1, e multiespectrais, MODIS, Landsat e SBERS, confirmaram a dominância de fitoplâncton no reservatório com usos de correlações de Pearson, a partir das respostas espectrais dos componentes ópticos ativos e resultados determinados em laboratórios: pigmentos totais, sólidos totais, e em campo: transparência, onde se identificou significância substancial (0,70) entre pigmentos totais e a banda B3 (760 – 900nm) do sensor Landsat 5 – TM.

**Tabela 5.7** - Dados de clorofila *a* coletado e analisados em laboratório.

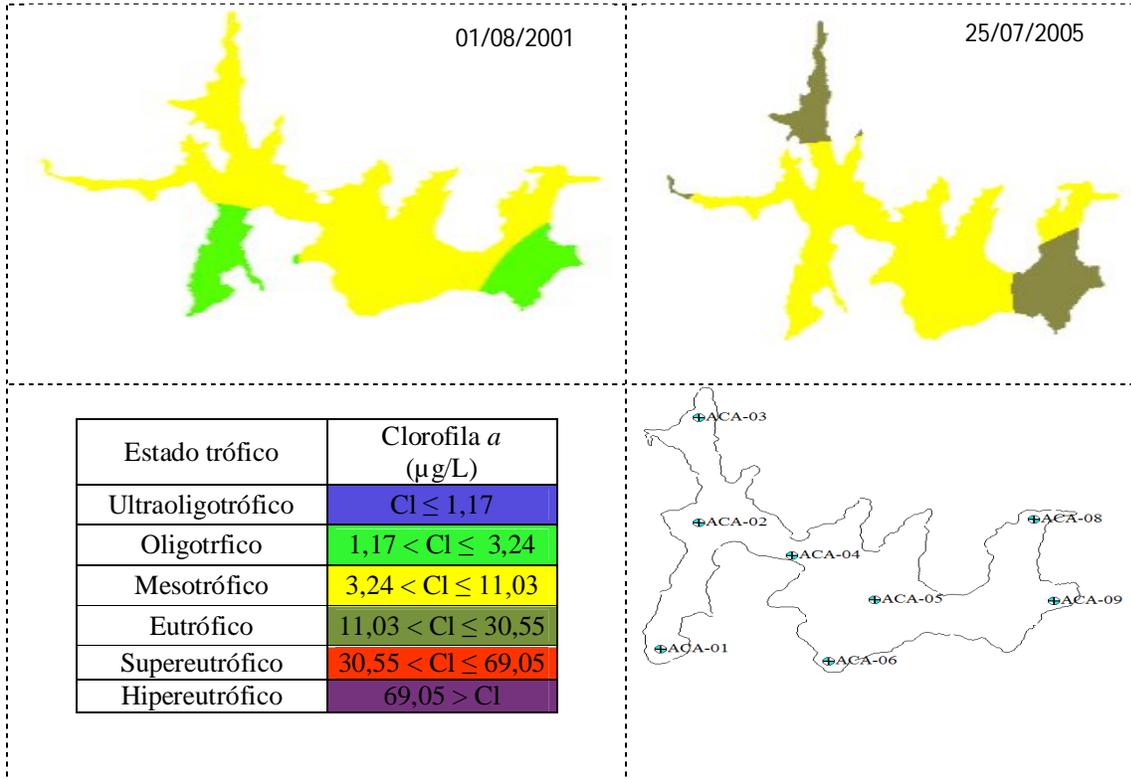
Ponto	Clorofila a (µg/L)			
	01//8/01	25/07/05	29/07/08	16/03/11
ACA - 01	-	6,13	18,77	96,3
ACA -02	2,8	6,73	26,93	100,86
ACA - 03	3,3	10,8	22,2	132,97
ACA - 04	2,3	6,9	35,69	132,79
ACA - 05	3,3	7,2	27,54	157
ACA - 06	3,1	4,99	24,7	154,06
ACA - 08	3,6	6,47	13,53	148,45
ACA - 09	-	12,08	17,32	127,36

**Figura 5.30** - Resposta espectral das imagens de satélite Landsat 5 – TM em 2001 e 2005.



Resultados da compartimentação espacial e temporal a partir do índice de estado trófico para a clorofila *a* podem ser visualizados na Figura 5.31. Os resultados apresentados são referentes aos períodos das imagens de satélite analisadas. Para 2001 e 2005, constatou-se que a maior compartimentação espacial encontrava-se na classe mesotrófico em ambos os períodos.

**Figura 5.31** - Resultado de clorofila *a* determinados em laboratório em 2001 e 2005.

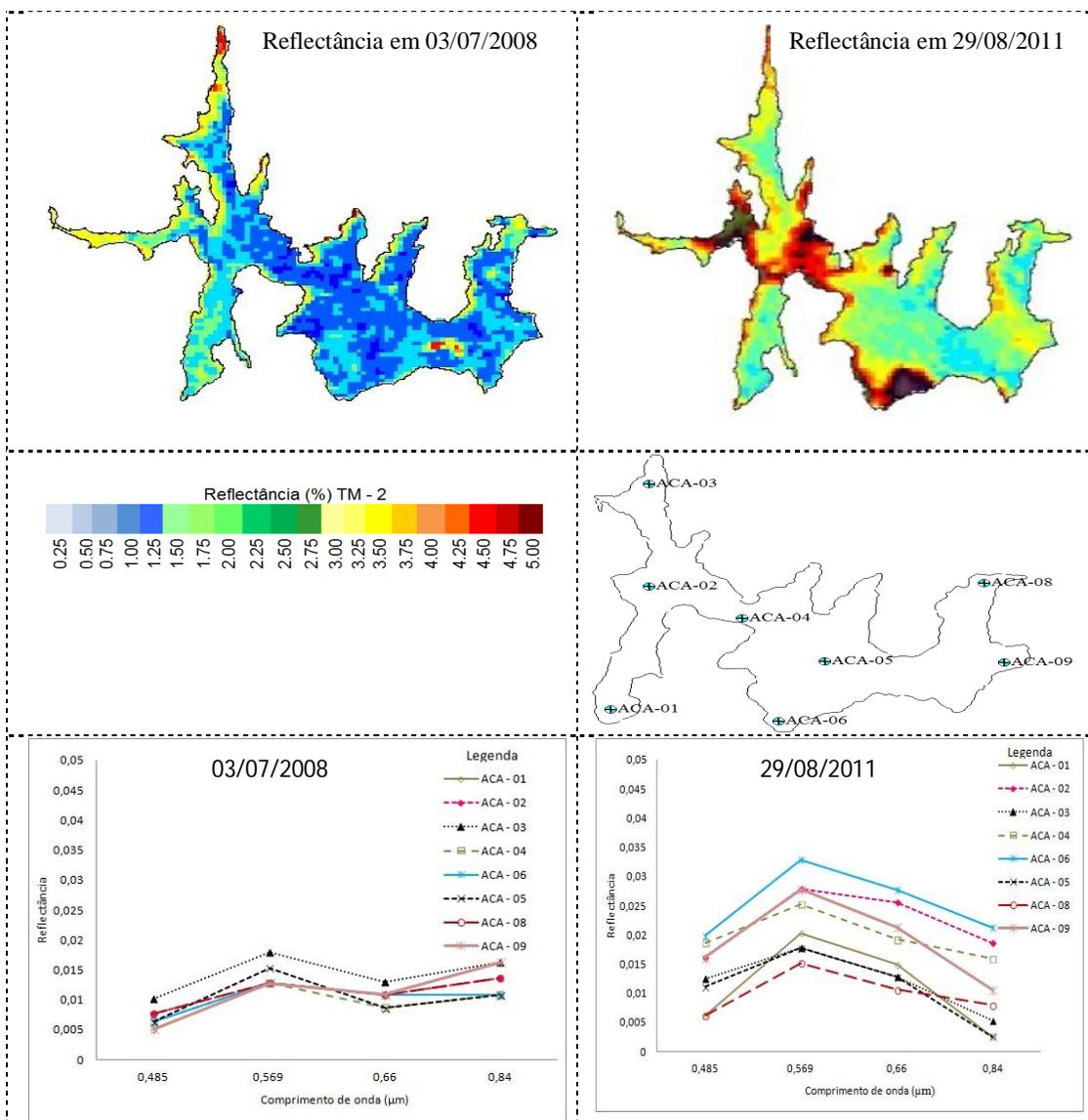


Em 03 de julho de 2008 as respostas espectrais nos pontos amostrais correspondem a um pico de reflectância em  $0,569 \mu\text{m}$  “verde”, atingindo valores de reflectância na faixa de 1,27 a 1,79%. Também se verificou um pico na região do vermelho próximo, cuja reflectância oscilou na faixa de 1,08 a 1,62% (Figura 5.32). O ponto ACA – 03 “maior reflectância” correlaciona-se ao ponto de maior reflectância na imagem fatiada.

Em 29 de agosto de 2011 ocorreram os maiores picos de reflectância referente a todas as imagens analisadas e que são indicativos da presença de fitoplâncton, ou seja, as amostras espectrais variaram na faixa de 1,51 a 3,28% no pico de  $0,569 \mu\text{m}$  “banda verde”. O ponto ACA - 06 apresentou maior reflectância e o ponto ACA - 08 refletiu menos. Os resultados das curvas espectrais são legitimados pela imagem fatiada nos postos supracitados.

Pesquisas realizada por Trentin (2009), no açude Passo Real utilizando imagem de satélite Landsat 5 – TM identificou os compartimentos do açude a partir da reflectância dos constituintes ópticos ativos presentes na água, onde existiam compartimentos com maior concentração de substâncias e outros que refletiam menos.

Figura 5.32 - Resposta espectral das imagens de satélite Landsat 5 – TM em 2008 e 2011.

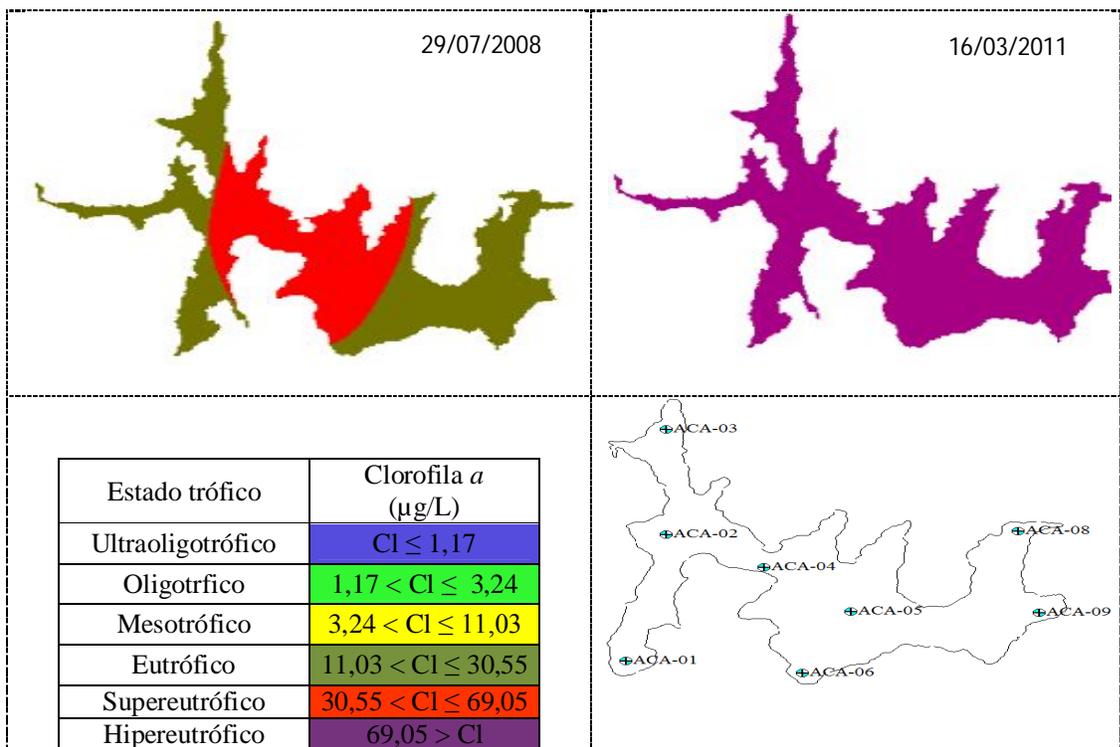


Em todos os períodos analisados o açude atingiu a sua cota máxima, este comportamento hidrológico favorece a renovação das águas, contribuindo no controle dos processos de eutrofização. No entanto, constatou-se que em 2008 e principalmente em 2011, a renovação do volume armazenado provenientes dos afluxos não foi suficiente para reduzir os índices de substância no corpo hídrico, que ocasionou o aumento no índice de estado trófico que variou no intervalo de eutrófico e supereutrófico em 2008 e hipereutrófico em 2011 (Figura 5.33).

O aumento da concentração dos constituintes ópticos ativos no corpo hídrico pode estar associado a processo de degradação da bacia, aporte de efluentes pelos tributários ou

diretamente lançado na bacia hidráulica. É comum a prática de agricultura de sequeiro na área de preservação permanente, assim como, é comum à presença de animais no entorno do açude.

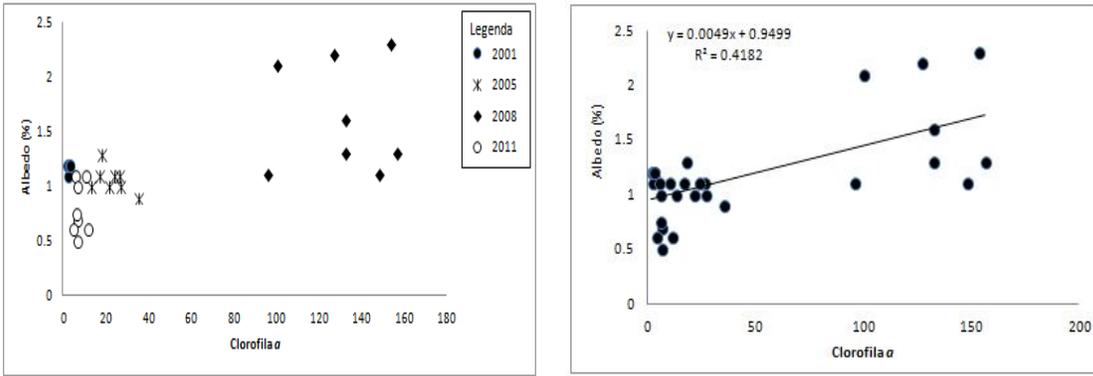
**Figura 5.33** - Resultado de clorofila *a* determinados em laboratório em 2008 e 2011.



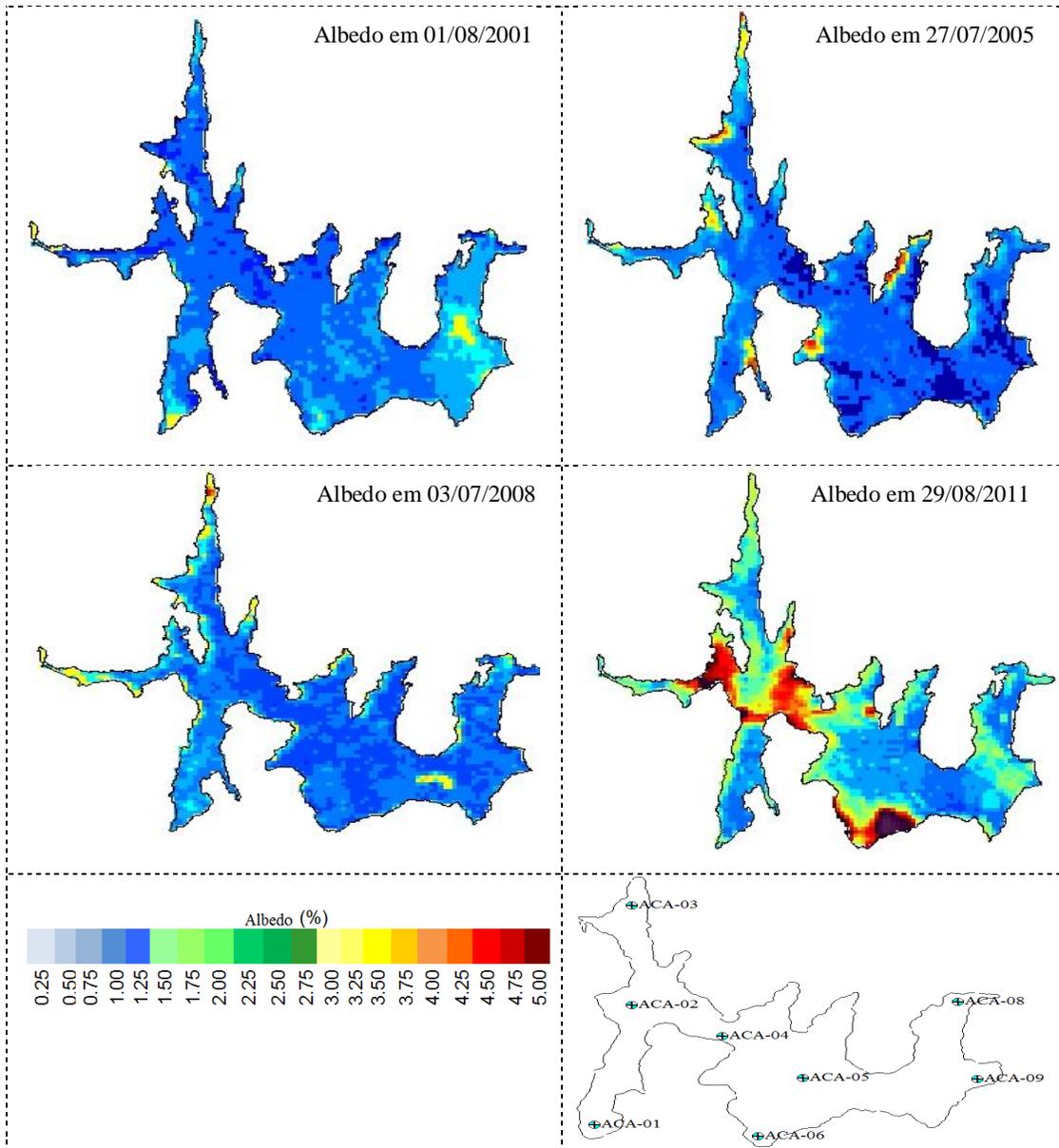
Resultados da análise de regressão linear entre clorofila *a* e albedo foram significativos com relação ao aumento da concentração de clorofila *a* nas imagens processadas. A Figura 5.34 apresenta no lado esquerdo a localização da resposta espectral do albedo em relação à presença de clorofila *a*, e do lado direito os resultados de regressão ( $R^2 = 0,42$ ) que foram significativos.

Pode-se visualiza-se na Figura 5.35 a reflectância do albedo nos períodos em análise.

**Figura 5.34** - Regressão linear entre o albedo das imagens Landsat 5 - TM e a clorofila *a*.



**Figura 5.35** - Espacialização do resultado da reflectância do albedo nas imagens Landsat 5 – TM.



Diante dos resultados, torna-se necessário o estudo mais aprofundado dos fatores condicionantes de alteração da qualidade da água do Acarape do Meio, pois a revonação das águas está sendo insuficiente para manter o equilíbrio das condições ambientais.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

---

A aplicação de geotecnologias em imagem SRTM permitiu de forma precisa e eficaz a caracterização da bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio/CE. Em ambiente SIG foi possível verificar a avanço da degradação da área de drenagem por meio da manipulação das informações da imagem ResourceSat 2012, onde se constatou que 10,31% da área foi retirada para plantações de culturas e construção de núcleos urbanos: Pacoti e Palmácia.

Apesar da influência antrópica na bacia hidrográfica, a mesma, mantém-se relativamente preservada, visto que, aproximadamente 89,69 % da área permanecem cobertas por algum tipo de vegetação. A conservação do ambiente pode estar relacionada aos altos relevos, onde se identificou que a declividade média da área de drenagem é forte ondulada.

A partir da análise dos dados secundários, determinou-se que a profundidade relativa tem atributos de ambientes rasos, mais suscetíveis a sofrerem processos de eutrofização devido à mistura da coluna d'água por ação da forçante externo como o vento.

Resultados de fator de forma e coeficiente de compacidade identificaram que a bacia hidrográfica é mais alongada e menos propensa a enchentes. O desenvolvimento do volume em formato mais semelhante ao U, indica reservatório mais susceptível a ação dos ventos e a processo de eutrofização.

A densidade de drenagem apresentou padrão normal e o fator de envolvimento indica que a bacia de drenagem do açude apresenta áreas que contribuem com o processo de assoreamento e conseqüente eutrofização devido ao carreamento dos sedimentos.

O açude apresentou formato dendrítico com elevado desenvolvimento de perímetro e com áreas a propensão a desenvolver região litorânea, capazes de absorver certa parcela dos resíduos poluidores. Apesar do manancial apresentar capacidade de assimilar impactos e oferece maior resistência ao estabelecimento da eutrofização nas regiões mais rasas. Nas áreas dendríticas e mais rasas apresentaram os maiores valores de tempo de residência, devido à redução da aeração proveniente da ação dos ventos, que propicia condições favoráveis ao florescimento de fitoplâncton "*Bloom*". A aeração é fundamental para oxigenar a região onde ocorrem os processos de degradação da matéria orgânica, de maneira a evitar ambientes anóxicos e tóxicos.

O modelo hidrodinâmico mostrou-se eficiente nos resultados estimados para os níveis, onde se verificaram valores de regressão linear de 0,99 com relação os observados “*in loco*”.

Identificou-se a partir da análise do módulo de velocidade, que os fluxos das vazões afluentes não causam alteração significativa da circulação hidrodinâmica das águas nas zonas lacustre e de transição, apenas nas áreas de reentrâncias. No entanto, o vento é o principal forçante externo no estabelecimento dos compartimentos.

Verificou-se que as correntes de velocidade intensificaram-se no segundo semestre, principalmente na estação localizada na zona mais rasa. É possível que essa região permaneça constantemente desestratificada em relação aos demais perfis verticais que são mais profundos.

Os ventos reinantes na região são provenientes da direção Nordeste e Leste com frequência predominante no intervalo de 4 m/s. A velocidade supracitada na camada da superfície do açude, com uso do modelo 3D, alcançaram valores médios de 0,0119 m/s. Averiguou-se que a ação do vento é mais intensa na camada da superfície e que as correntes de velocidades camadas mais profundas. Nestas zonas ocorrem à inversão das correntes, que é inversamente contrária a que incidem na superfície, ou seja, a partir da camada intermediária ocorre o empilhamento da massa de água no lado oposto da represa, que retorna pelas camadas inferiores em sentido contrário às velocidades de superfície.

Pode-se constatar que a chuva é a principal forçante de alteração nas taxas de renovação, pois ocorreu alteração nos resultados, a partir do aporte de vazões afluente, mantendo-se quase que constante após cessar as vazões afluentes. A renovação total da massa de água só foi possível nas quatro áreas de reentrâncias. Nos demais compartimentos as taxas não atingiram 100%.

A estimativa do tempo de residências são superiores a 100 dias na maioria dos compartimentos do açude. Os maiores valores do tempo de retenção hidráulica ficaram localizados nas áreas rasas e dentríticas que resultou em valores superiores a 365 dias. Os altos tempos de residência associam-se ao período estiagem na região.

Os espectros de reflectância da imagem Landsat 5 – TM estimou que as maiores concentrações dos constituintes ópticos ativos presentes nas águas do açude Acarape do Meio, são provenientes do rio Canabrava.

Constatou-se o acelerado processo de eutrofização do açude, a partir dos resultados do aumento do albedo ao longo dos anos, que corroboraram com os resultados de clorofila *a* analisada em laboratório.

O aporte dos fluxos afluentes, a presença de variáveis climatológicas como ventos, radiação solar e a compartimentação “morfometria” são os principais fatores que alteram o comportamento da hidrodinâmica dos açudes.

## **6.1 Sugestões e Recomendações**

O uso do modelo matemático SisBaHiA mostrou-se uma técnica eficiente para a estimação do comportamento hidrodinâmica do açude Acarape do Meio/CE. Sugere-se que o mesmo seja aplicado para realizar diagnóstico ou prognóstico dos parâmetros qualitativos.

A utilização da imagem Landsat apresentou limitação no reconhecimento da assinatura espectral dos componentes óticos ativos presente no corpo hídrico. Recomenda-se que nos próximos estudos seja utilizada imagem que tenham melhor resolução.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] ANA. Revisão do Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas e Elaboração dos Planos de Gerenciamento das Águas das Bacias do Litoral, Acaraú e Coreaú, no Estado do Ceará. Fase 1: Estudos Básicos e Diagnóstico. Fortaleza – CE. 2010
- [2] ANA. Agência Nacional de Águas. Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume. Brasília, 2011.
- [3] ANGELINI, R. Ecossistemas e Modelagem Ecológica. Núcleo de Pesquisas em limnologia. Ictiologia e Aquicultura - NUPELIA; Universidade Estadual de Maringá – Paraná. 1995.
- [4] AMANDA, M. Análise de Alternativas Hidrodinâmicas para o Sistema Lagunar da Baixada de Jacarepaguá. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 132p. 2007.
- [5] AMORIM, B. Análise Comparativa de Processos de Eutrofização da Água em Açudes do estado do Ceará e sua Relação com as Características Morfológicas, Hidrológicas e Climáticas. (Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 174p. 2001.
- [6] ARAÚJO, S. C. de S. Modelos de Simulação Baseados em Raciocínio Qualitativo para Avaliação da Qualidade da Água em Hidrográficas. Universidade de Brasília (Tese de Doutorado). Brasília. 2005.
- [7] ASSIREU. A. T.; NOVO. E. M. L. de M.; ROLAND. F.; PACHECO. F. S.; ALCÂNTARA. E. H.; STECH. J. L. O comportamento do Rio ao Longo do Açude Observado a Partir de Sensoriamento Remoto, Dados *in situ* e Ensaio de Laboratório. INPE. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal. Brasil. 25-30, abril 2009.
- [8] CÂMARA. G.; QUEIROZ. G. R. Arquitetura de sistemas de informações geográficas. Fundamentos de Geoprocessamento. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap3-arquitetura.pdf>. Acesso em: 01 junho/2013.
- [9] CASSETI. Valter. Ambiente e Apropriação do Relevo. 1º Ed. São Paulo: Contexto. 1995.
- [10] CEARÁ. Fundação Instituto de Planejamento do Estado do Ceará (IPLANCE). Atlas do Ceará. Fortaleza. IPLANCE. 64p. 1995.
- [11] CEBALLOS, B. S. O. Utilização de Indicadores Microbiológicos na Tipologia de Ecossistemas Aquáticos do Trópico Semiárido. São Paulo, SP. (Tese de Doutorado, Instituto de Ciências Biomédicas II – USP, SP). 192p. 1995.
- [12] CETESB - Proposta de Índices de Qualidade de Água para o Estado de São Paulo. Coletânea de Textos da Cetesb. 2002.
- [13] CHAPRA. S.C. Surface Water Quality Modeling. McGraw-Hill. 1997.

- [14] CHRISTOFOLETTI. A. Geomorfoogia. São Paulo. Edgard Blucher. 2ª ed. 1980.
- [15] CHRISTOFOLETTI. A. Variabilidade Espacial e Temporal da Densidade de Drenagem. *Notícia Geomorfológica*. v.21, n.42..3-22p. 1981.
- [16] COLLARES. E. G. Avaliação de Alterações em Redes de Drenagem de Microbacias como Subsídio ao Zoneamento Geoambiental de Bacias Hidrográficas: Aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari – SP. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de São Paulo. São Carlos. . 194p. 2000.
- [17] DATSENKO, I. S. Estudo da Qualidade da Água dos Açudes do Estado do Ceará. Relatório não Publicado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.
- [18] DAVIS, J. R. & KOOP, K. Eutrophication in Australian Rivers, Reservoirs and Estuaries – A Southern Hemisphere Perspective on the Science and its Implications. *Hydrobiologia*, 559:23–76. Springer. 2006.
- [19] EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. Disponível em: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/srtm.htm>. Acesso em: 01 junho/2013.
- [20] ENNES, R., GALO, M. L. B. T. Simulação Espectral de Dados Multiespectrais do Comportamento Espectral de um Corpo D'água a Partir de Dados Hiperespectrais. Simpósio de Ciências e Geodésias. Recife – PE. 2010.
- [21] ESTEVES. F. A. Fundamentos de Limnologia. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência. 1998.
- [22] FERNANDES. D. P. Avaliação Limnológica. Morfometria. Batimetria e Modelagem Hidrodinâmica em Açude: Serra Azul – MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2012.
- [23] FERZINGER. J. H.; PERIC. M. Computational Methods for Fluid Dynamics. New York: 3. ed. Springer. 2002.
- [24] FITZ, P. R. Geoprocessamento sem Complicação. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- [25] FLORENZANO. T. G. Imagens de Satélite para Estudos Ambientais. São Paulo. Oficina de Textos. 2002.
- [26] FRAGOSO. J. C. R.; FERREIRA. T. F.; MARQUES. D. M. Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos. São Paulo: Oficina de Textos. 2009.
- [27] FRANZ. G. A. S. Desenvolvimento. Aplicação e Análise Do Modelo de Qualidade da Água e Eutrofização do Sisbahia. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). CURITIBA – PR. 158p. 2010.
- [28] IBAMA. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente. Modelagem Matemática de Qualidade da Água AHE Paulistas. Relatório Simulações. Maio 2005.
- [29] IBGE. Manual Técnico de Geomorfologia. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2009.

- [30] IBGE. Histórico das Cidades. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=230440>. Acesso em: 13 abril/2012.
- [31] IPECE. Perfil básico municipal de Guaramiranga. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil\\_basico/PBM\\_2004\\_PDF/Guaramiranga.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/PBM_2004_PDF/Guaramiranga.pdf). Acesso em: 05 junho/2013.
- [32] IPECE - Perfil Básico Municipal de Redenção. 2006. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil\\_basico/PBM\\_2006/Redencao.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/PBM_2006/Redencao.pdf). Acesso em: 20março/2011.
- [33] IPECE. Perfil básico municipal de Pacoti. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil\\_basico/pbm-2009/Pacoti\\_Br\\_office.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/pbm-2009/Pacoti_Br_office.pdf). Acesso em: 08 maio/2013.
- [34] IPECE. Perfil básico municipal de Palmácia. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil\\_basico/pbm-2012/Palmacia.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/pbm-2012/Palmacia.pdf). Acessado em: 08 maio/2013.
- [35] IPECE. Perfil Municipal de Fortaleza. Tema I: Aspectos Demográficos. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ipece-informe/ipece\\_Informe\\_30\\_13\\_abril\\_2012.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ipece-informe/ipece_Informe_30_13_abril_2012.pdf). Acesso em: 05 junho/2013b.
- [36] JENSEN. J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma Perspectiva em Recursos Terrestres. 2ª ed. Parêntese. 587p. 2011.
- [37] KÖPPEN. W. Climatologia: Con un Studio de Los Climas de la Tierra. México: Fondo de Cultura Económica. 172p. 1948.
- [38] LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Modelagem Matemática da Qualidade da Água para UHE Mauá. Relatório Final. Curitiba. Junho 2009.
- [39] LARENTIS. D. G. Modelagem Matemática da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Sistema Taquari-Antas – RS. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande dos Sul.Porto Alegre. 2004.
- [40] LIANG, S. Narrowband to Broadband Conversions of Land Surface Albedo I Algorithms. Remote Sensing of Environment 76, 213 - 238. 2000.
- [41] MARTIN, J. L., MCCTUTCHEON, S. C. Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modelaging. 1998.
- [42] NOVO. E. M. L. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. 4º ed. São Paulo. Edgar Blucher. 383p. 2010.
- [43] OLIVEIRA; F. L. S.; CRUZ. M. L. B.; ALMEIDA. L. Q. Análise dos Impactos Ambientais nas Nascentes do Rio Pacoti nos Municípios de Pacoti e Guaramiranga. Ceará. Brasil. VI Seminário Latino Americano de Geografia Física. II Seminário Ibero Americano de Geografia Física Universidade de Coimbra. Maio 2010.

[44] PEREIRA, R. S. Modelos de Qualidade de Água. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH; Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Revista Eletrônica de Recursos Hídricos, n.1, 37-48. 2004.

[45] RMF. Região Metropolitana de Fortaleza. Disponível em: [http://www.observatoriodasmetropoles.ufrj.br/como\\_anda/como\\_anda\\_RM\\_fortaleza.pdf](http://www.observatoriodasmetropoles.ufrj.br/como_anda/como_anda_RM_fortaleza.pdf). Acesso em: 08 maio/2013.

[46] RESCK. R. P. Avaliação Morfológica e Estudo da Variação Horizontal de Parâmetros Limnológicos do Açude da Pampulha. (Dissertação de Mestrado em Ecologia e Conservação da Vida Silvestre). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 74p. 2007.

[47] RECKHOW. K. H. CHAPA. S. C. Engineering Approaches for Lake Management. Volume 1: Data Analysis and Empirical Modeling. 337p. 1983.

[48] ROSMAN. P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Rio de Janeiro. Programa COPPE: Engenharia Oceânica. Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica. 2013.

[49] ROSMAN. P.C.C. “Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental”. In: ROSMAN.P.C.C., MASCARENHAS. F.C.B., MIGUEZ. M.G. CAMPOS. R. O. G., EIGER. S. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5.1 ed., capítulo 1. Rio de Janeiro. RJ. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2001.

[50] ROSMAN. P.C.C. “Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos”. In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol. 3). Capítulo 3. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. 1997.

[51] SANTOS. S. P. Morfometria, Compartimentação e Hidrodinâmica de um Açude Periurbano Tropical: Prognósticos sobre o Tempo de Vida Útil do Açude de Vargem das Flores. (Dissertação de Mestrado em Ciências Biológicas). Minas Gerais- B. Horizonte – Brasil. 130p. 2012.

[52] SPIEGELBERG. G. Um Modelo Morfodinâmico: Desenvolvimento e Aplicação no Açude da Usina Hidroelétrica de Estreito no Rio Tocantins. (Mestrado em Engenharia Oceânica). Rio de Janeiro. RJ – Brasil. 106p. Dezembro 2010.

[53] SRH - Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Plano de Gerenciamento de Águas das Bacias Metropolitanas. 2001.

[54] SPERLING, E. V. Morfologia de Lagos e Represas. Desa/UFMG. 137 p. 1999.

[55] STRINGARI. C. E., MELLO. L. F., MARQUES. W. C. Estudo Numérico Lagrangeano do Deslocamento de Manchas de Óleo. V Simpósio Brasileiro de Oceanografia (V SOB) - Oceanografia e Políticas Públicas. Santos. SP. Brasil. 2011.

[56] TEIXEIRA. C. A. Apostila de hidrologia aplicada. Universidade Tecnológica do Paraná. Curitiba. 2010.

[57] TRENTIN, A. B. Sensoriamento Remoto Aplicado ao Estudo do Comportamento Espectral da Água o Açude Passo Real - RS. (Dissertação de Mestrado em Análise Ambiental e Dinâmica Espacial). Santa Maria, RS. 92p. 2009.

[58] TUNDISI, J. G.; TUNDISI, M. T. M. Limnologia: Ciência da Terra. São Paulo: Oficina de Textos. 2008.

[59] VILLELA, S.M. & MATTOS, A. (1975). Hidrologia Aplicada. Ed. McGraw-Hill.

[60] VON SPERLING, M. Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios. DE-SA/UFGM. Belo Horizonte. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. v. 7). 588 p. 2007.

[61] WACHHOLZ, F. Influência da Bacia Hidrográfica e Características Espaço-Temporais de Variáveis Limnológicas sobre Açudes no Rio Jacuí – RS. (Tese de Doutorado em Organização de Espaço). Rio Claro – SP. 182p. 2011.