



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS

**QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DO AÇUDE CASTANHÃO SOBRE O
FLUXO FLUVIAL DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO E
NUTRIENTES PARA O ESTUÁRIO DO RIO JAGUARIBE, CEARÁ –
BRASIL.**

CARLOS ALBERTO GROSSI HIJO

FORTALEZA – CE

2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DO AÇUDE CASTANHÃO SOBRE O
FLUXO FLUVIAL DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO E
NUTRIENTES PARA O ESTUÁRIO DO RIO JAGUARIBE, CEARÁ –
BRASIL.**

CARLOS ALBERTO GROSSI HIJO

ORIENTADOR: DR. MAURÍCIO MUSSI MOLISANI

FORTALEZA – CE

2009

**QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DO AÇUDE CASTANHÃO SOBRE O
FLUXO FLUVIAL DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO
E NUTRIENTES PARA O ESTUÁRIO DO RIO JAGUARIBE, CEARÁ –
BRASIL.**

CARLOS ALBERTO GROSSI HIJO

**Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Ciências
Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências
do Mar, como requisito parcial para obtenção
do grau de Mestre, outorgado pela
Universidade Federal do Ceará.**

ORIENTADOR: DR. MAURÍCIO MUSSI MOLISANI

FORTALEZA – CE

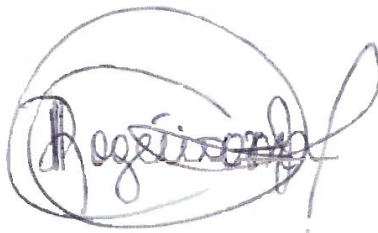
2009

FOLHA DE APROVAÇÃO

Após a finalização dos trabalhos da defesa de Dissertação de Mestrado do aluno, **CARLOS ALBERTO GROSSI HIJO**, intitulada “**QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DO AÇUDE CASTANHÃO SOBRE O FLUXO DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO E NUTRIENTES PARA O ESTUÁRIO DO RIO JAGUARIBE, CEARÁ – BRASIL.**”, a Banca Examinadora considerando o conteúdo do trabalho apresentado e a apresentação realizada, considerando a **DISSERTAÇÃO APROVADA.**



Prof. Dr. MAURÍCIO MUSSI MOLISANI
(Orientador)



Prof. ROGÉRIO CAMPOS, Ph.D.
(Membro Interno)



Prof.^a. Dr.^a. HELENA BECKER
(Membro Externo)

Fortaleza, 24 de Junho de 2009

A minha **Esposa Juliana** e ao meu **filho Carlos Augusto** que tanto amo e que me ajudaram a ter garra, paciência e perseverança.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Maurício Mussi Molisani, pela orientação, o apoio e a confiança em mim depositada ao longo do curso.

Aos amigos Cristina Rocha e Wilson Franklin, pela contribuição do laboratório no andamento deste trabalho.

Em especial a professora Helena Becker, pela oportunidade e ensinamentos durante as análises de nutrientes realizadas em seu laboratório, por sua paciência e especial atenção.

Aos colegas do Laboratório de Química Ambiental (LAQA).

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela concessão da bolsa durante o curso de mestrado.

À FUNCAP pela concessão do recurso financeiro via concessão de bolsa do Programa de Desenvolvimento Científico e Regional para o pesquisador Mauricio M. Molisani (1514-14 CV. 016/2005, Proc. Nº 222/04).

À Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos – COGERH, pelo fornecimento dos dados hidrológicos.

Ao Departamento Nacional de Obras Contra e Seca - Gerência Ceará (DNOC'S), especialmente ao Jaime que abriu caminho para a realização desta pesquisa e ao Brulino, pela ajuda e paciência durante as amostragens.

A todos os meus colegas de Mestrado e do Labomar e a todas as pessoas que, de alguma forma, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

**“No que diz respeito ao empenho,
ao compromisso, ao esforço, à
dedicação, não existe meio termo.
Ou você faz uma coisa bem feita
ou não faz.”**

(AIRTON SENNA)

RESUMO

A zona costeira abriga um mosaico de ecossistemas de alta relevância ambiental, cuja diversidade é marcada pela transição de ambientes terrestres e marinhos. Esta área representa uma elevada produção biológica sustentada por um intrincado ciclo biogeoquímico de espécies químicas que acopla processos relacionados tanto à bacia de drenagem dos rios que deságuam nestas áreas quanto os que ocorrem na zona costeira. Outra característica destas áreas é a intensa ação antrópica que tem sido responsável por alterações significativas nos fluxos fluviais destes materiais. Dentre estas alterações podemos exemplificar o barramento dos rios através da formação de reservatórios, usualmente observadas no Estado do Ceará. Devido às condições climáticas imposta pelo clima semi-árido, o Estado do Ceará tem a necessidade de manter um esquema de manejo hídrico baseado na construção de açudes que podem modificar os fluxos fluviais para a zona costeira sugerindo a indução das características destas áreas. Diante do cenário descrito, o objetivo deste estudo é quantificar os fluxos de água, nutrientes e material particulado em suspensão (MPS) ao longo do açude Castanhão e formular balanços de massa com os quais podemos inferir sobre a capacidade e a intensidade do açude em reter ou exportar materiais fluviais da bacia de drenagem do rio Jaguaribe em direção à zona costeira. Ao longo do açude Castanhão foram escolhidos três pontos para a realização das amostragens e a caracterização das concentrações, fluxos e balanços dos materiais fluviais. Segundo o balanço proposto houve uma redução das concentrações de espécies de fósforo e nitrogênio e do MPS. Associado a esta redução pode observar uma intensa redução da vazão de água na entrada em relação à saída da barragem sendo o principal processo que induz a modificação do fluxo fluvial. Os balanços de massa mostram que o açude Castanhão e a rotina de operação da barragem invertem o funcionamento natural desta parte da bacia de drenagem. Segundo os dados apresentados, o açude Castanhão modifica o fluxo fluvial de água, MPS e nutrientes no rio Jaguaribe podendo reter até 98% da carga de entrada e conseqüentemente a transferência destes materiais para a zona costeira.

Palavras Chave: Açude Castanhão, Balanço de cargas, Rio Jaguaribe, Reservatório, Nutrientes, Estuário

ABSTRACT

The coastal zone is composed by highly environmental relevance ecosystems therein biodiversity is based on transitional land and marine features. This area has large biological productivity which is sustained by intricate biogeochemistry cycle of chemical species influenced by both adjacent watershed and coastal processes. Another feature of this area is the highly anthropogenic pressures that drive significant modifications of riverine material fluxes. Among such modifications, we can exemplify the damming of rivers and reservoir flooding usually occurred on the State of Ceará. The semi-arid climate enforce a large scheme of water management based on reservoir flooding which might induce changes on riverine fluxes from watershed to the coast as well as the ecosystem feature modification. Considering the above-mentioned scenario, this work aim to quantify the fluxes and budgets of water, suspended matter, and nutrients for the Castanhão reservoir from which the reservoir retention or export capacity of the riverine fluxes of the Jaguaribe watershed to the coast were estimated. Across the Castanhão reservoir water sampled were collected at three areas to characterize the concentration, fluxes, and budgets of riverine materials. According to proposed budget, there were a reduction of suspended matter, phosphorous, and nitrogen concentration. Additionally, the strong reduction of water outflow compared to inflow into reservoir was measured and it is the main process inducing the modification of riverine material fluxes. The budgets showed that the Castanhão reservoir and the operational dam procedure invert the natural functioning of the portion of Jaguaribe drainage basin. According to these results the reservoir changes the land-sea water, suspended matter and nutrient fluxes reducing and trapping from 88% to 98% of inflow loads into reservoir over hydrological and chemical conditions measured.

Key-Words: Castanhão Reservoir, Budget, Nutrients, Jaguaribe River, Estuary.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição mundial da produção primária.	01
Figura 2. Importância relativa da produção primária nos ecossistemas terrestres, costeiros e marinhos.	02
Figura 3. Rendimento da pesca por unidade de área em função da produção primária em larga escala de sistemas estuarinos e marinhos.	03
Figura 4. Mapa ilustrativo que evidencia o percurso da bacia de drenagem do rio Jaguaribe até a zona costeira.	10
Figura 5. Distribuição mensal média das chuvas na área de estudo.	11
Figura 6. Evaporação média mensal para a região.	11
Figura 7. Mapa ilustrativo da localização dos pontos de amostragem realizados na saída de campo no Açude Castanhão.	13
Figura 8. Fotos da área de coleta do ponto 1 no Rio Jaguaribe.	14
Figura 9. Fotos da área de coleta do ponto 2 no meio do reservatório (A) e do ponto 3 mais próximo da barragem (B).	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição elementar do fitoplâncton marinho.	04
Tabela 2. Limites de detecção das técnicas analíticas para análises de nutrientes (mg/L) e clorofila <i>a</i> (µg/L).	16
Tabela 3. Vazão de entrada e saída no açude Castanhão durante o período de amostragem (m ³ /s).	19
Tabela 4. Média, desvio padrão e faixa de variação dos parâmetros físico-químicos, nutrientes e clorofila <i>a</i> analisados nos diferentes pontos do açude Castanhão.	20
Tabela 5. Concentração, fluxo e balanço de MPS no açude Castanhão.	23
Tabela 6. Concentração, fluxo e balanço de Si-D no açude Castanhão.	24
Tabela 7. Concentração, fluxo e balanço de PO ₄ ³⁻ no açude Castanhão.	25
Tabela 8. Concentração, fluxo e balanço de NH ₄ ⁺ no açude Castanhão.	26
Tabela 9. Concentração, fluxo e balanço de P-total no açude Castanhão.	27
Tabela 10. Concentração, fluxo e balanço de N-total no açude Castanhão.	27
Tabela 11. Média (desvio padrão) da concentração (µM) e razões atômicas entre o N, P e Si dissolvidos na entrada e saída do açude Castanhão.	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	–	Alumínio
Ba	–	Bário
Ca	–	Cálcio
Cd	–	Cádmio
Cu	–	Cobre
Cr	–	Cromo
Fe	–	Ferro
HCl	–	Ácido Clorídrico
Mg	–	Magnésio
Mn	–	Manganês
Na	–	Sódio
Ni	–	Níquel
N	–	Nitrogênio
NH ₄ ⁺	–	Amônio
NID	–	Nitrogênio Inorgânico Dissolvido
NO ₃ ⁻	–	Nitrato
NO ₂ ⁻	–	Nitrito
N-total; NT	–	Nitrogênio Total
P	–	Fósforo
PO ₄ ³⁻	–	Fosfato
P-total; PT	–	Fósforo Total
PID	–	Fósforo Inorgânico Dissolvido
Si-D	–	Sílica Dissolvida
Si	–	Sílica
SiO ₂	–	Dióxido de Silício
Sr	–	Estrôncio
Ti	–	Titânio
Zn	–	Zinco
APHA	–	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater
ICOLD	–	International Commission on Large Dam
LOICZ	–	Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone
WCD	–	World Commission on Dams

COGERH	–	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
DNOCS	–	Departamento Nacional de Obras Contra Secas
FUNCEME	–	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
LABOMAR	–	Instituto de Ciências do Mar
LAQA	–	Laboratório de Química Ambiental - UFC
PERH	–	Plano Estadual dos Recursos Hídricos
SEMACE	–	Superintendência do Meio Ambiente do Ceará
SUDENE	–	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SRH	–	Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará
MPS	–	Material Particulado em Suspensão
NE-SW	–	Nordeste - Sudoeste
Exp	–	Exportar
Ret	–	Reter
CV	–	Coefficiente de Variação
cm/ano	–	Centímetro por Ano
mg/L	–	Miligramas por Litro
mm	–	Milímetro
m ³	–	Metro Cúbico
m ³ /s	–	Metro Cúbico por Segundo
mg/s	–	Miligramas por Segundo
mS/cm	–	MiliSiemens por centímetro
pH	–	Potencial Hidrogeniônico
Ton	–	Tonelada
km	–	Quilômetro
km ²	–	Quilômetro Quadrado
µg/L	–	Microgramas por Litro
µm	–	Micrometro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. A produtividade biológica de ecossistemas costeiros e a importância do aporte fluvial	01
1.2. A influência da construção de barragens na modificação do aporte fluvial de espécies químicas para a zona costeira	06
1.2.1. A construção de barragens como uma questão ambiental global	06
1.2.2. A açudagem no Estado do Ceará	08
2. OBJETIVOS	09
2.1. Objetivos Específicos	09
3. ÁREA DE ESTUDO	10
4 MATERIAIS E MÉTODOS	13
4.1. Amostragem	13
4.2. Análises Químicas	16
4.3. Vazão e balanço hídrico	17
4.4. Concentração, fluxo e balanço de MPS.	17
4.5. Concentração, fluxos e balanço de nutrientes.	18
5. RESULTADOS	19
5.1. Vazão de entrada e saída no açude Castanhão	19
5.2. Parâmetros físico-químicos das áreas amostradas do açude Castanhão	20
5.2.1. Entrada (Ponto 1)	21
5.2.2. Meio (Ponto 2)	21
5.2.3. Barragem (Ponto 3)	22
5.3. Fluxo e balanço de MPS	23
5.4. Fluxos e balanço de nutrientes	24
6. DISCUSÃO	28
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

1.1. A produtividade biológica de ecossistemas costeiros e a importância do aporte fluvial

A zona costeira abriga um mosaico de ecossistemas de alta relevância ambiental, cuja diversidade é marcada pela transição de ambientes terrestres e marinhos, com interações que lhe conferem um caráter de fragilidade e de requerer, por isso, atenção especial do poder público, conforme demonstra sua inserção na constituição brasileira como área de patrimônio nacional. Esta área representa também, uma região de elevada importância no ciclo biogeoquímico de espécies químicas onde a intensa ação antrópica tem sido responsável por alterações significativas nos fluxos destes materiais (Ver *et al.*, 1999; Accornero *et al.*, 2003).

Segundo Odum (1983), a produtividade primária é a taxa de fixação do carbono durante o tempo por organismos fotossintetizantes e em áreas costeiras está entre as maiores observadas entre os ecossistemas globais (Figura 1), embora generalizações devam ser realizadas com critério (Foster & Cloern, 2007).

Os ecossistemas costeiros são considerados como um ecótono devido a ser uma zona de transição entre a unidade terrestre e marinha, conferindo características próprias associadas a características dos ecossistemas limítrofes, sendo observada uma produtividade e diversidade biológica superior aos ecossistemas terrestres e marinhos.

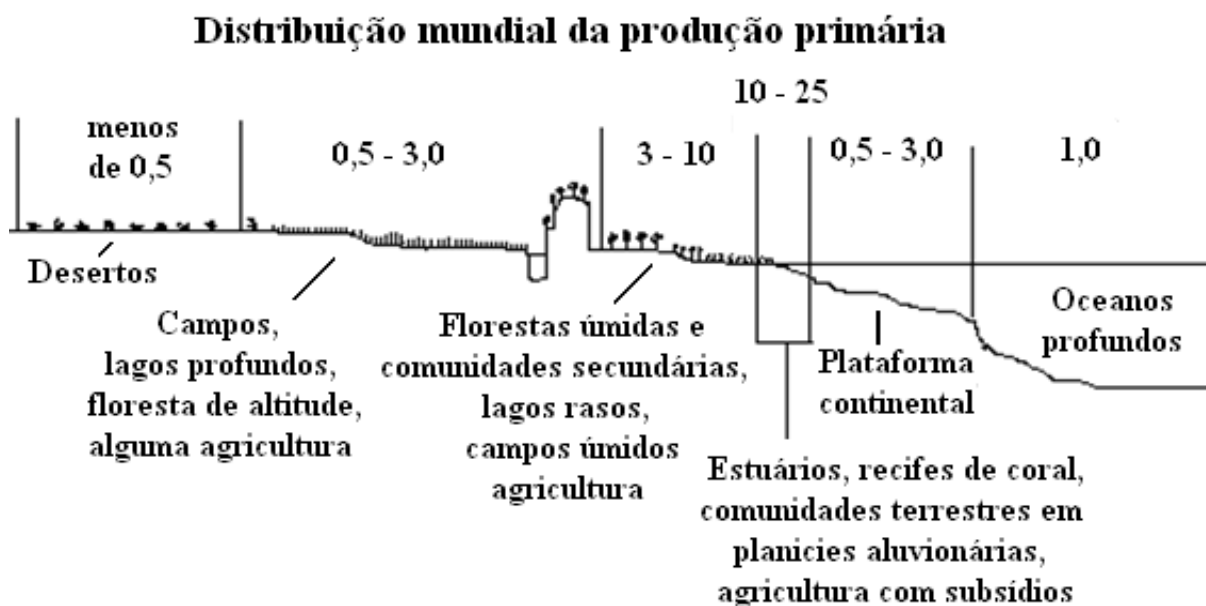


Figura 1. Distribuição mundial da produção primária em 10³ kcal /m² /ano (Odum, 1983).

Apesar de ocuparem uma área relativamente pequena em relação às outras regiões, as águas costeiras sustentam cerca de 26% da produção primária mundial, indicando uma produtividade primária similar a regiões terrestres e marinhas que apresentam áreas muito superiores (Figura 2). Esta considerável produção primária sustenta toda uma cadeia alimentar e produção biológica que origina importantes atividades humanas como a pesca (Figura 3).

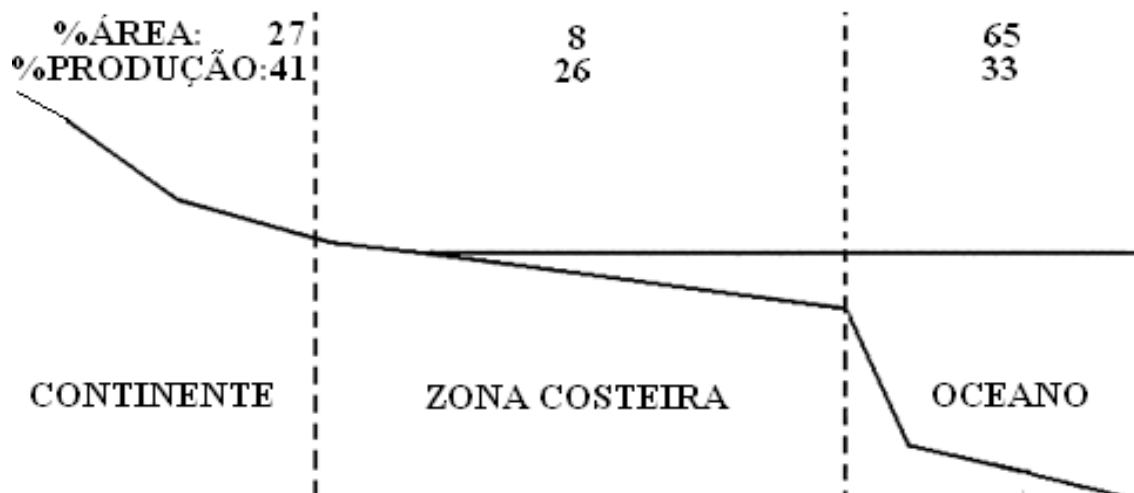


Figura 2. Importância relativa da produção primária nos ecossistemas terrestres, costeiros e marinhos. Modificado de Holligan e Boois (1993).

É interessante ressaltar que a produtividade primária conduz à formação de substâncias orgânicas ricas em energia a partir de substâncias minerais, sendo ela proveniente da fotossíntese ou quimiossíntese.

A produção primária e a biomassa vegetal podem variar expressivamente em uma escala de tempo que vai de poucos dias a anos e tal variação pode ser decorrente de um grande número de fatores que atuam de uma forma direta e indireta sobre os vegetais aquáticos e sobre o próprio processo de fotossíntese (Odum, 1983).

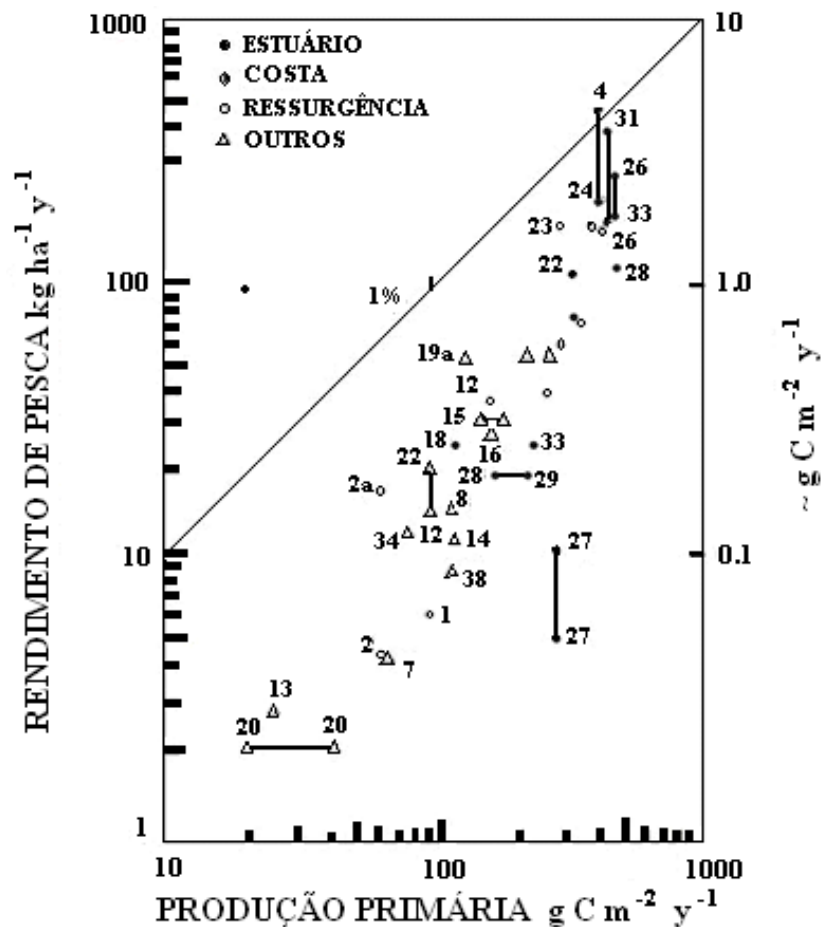


Tabela 1. Composição elementar do fitoplâncton marinho.

Elemento	Elemento : C (mol : mol)	Referências
N	0,15	b
Si (diatomáceas)	0,13	c
P	0,009	b
Ca	0,03	d, e
Fe	$2,3 \times 10^{-6} - 1,8 \times 10^{-3}$	d, e, f
Zn	6×10^{-4}	d, e
Al	1×10^{-4}	d, e
Cu	$^a 3 \times 10^{-6} - 0,006$	d, e
Ni	$^a 2 \times 10^{-5} - 0,006$	e
Cd	$^a 5 \times 10^{-7} - 0,005$	d, e
Mn	$^a 4 \times 10^{-6} - 0,004$	d, e
Ba	$^a 1 \times 10^{-5} - 0,01$	d, e
Mg	$^a 0,02$	d
Na	$^a 0,1$	d
Sr	$^a 8 \times 10^{-5}$	d
Ti	$^a 1 \times 10^{-5}$	d
Cr	$^a 2 \times 10^{-6}$	d

^a calculado dos dados com utilização do peso seco e do índice médio do fitoplâncton relacionado com o C em uma base de peso seco 50%. ^b Redfield (1958), ^c Brzezinski (1985), ^d Martin and Knauer (1973), ^e Collier and Edmond (1984), ^f Sunda and Huntsman (1995a)

Os nutrientes inorgânicos e orgânicos necessários ao crescimento e a reprodução de produtores primários costeiros podem ser necessários em maiores concentrações (macronutrientes) como nitrogênio e fósforo e em menores concentrações (macronutrientes) como zinco e cobre, entre outros.

Uma importante ou a principal fonte de muitos destes nutrientes que sustentam a produtividade primária e biológica de ecossistemas costeiros é o aporte continental relativo ao transporte fluvial, embora outros processos como a ressurgência costeira e a remineralização

aliados ao acoplamento bêntico-pelágico também disponibilizam nutrientes para a produção primária costeira (Ekau *et al.*, 1999, Knoppers *et al.*, 2002).

Entre os processos de transferência de nutrientes entre o continente e a zona costeira podemos ressaltar a erosão de rochas e solos que solubilizam estes nutrientes (ex. nitrogênio, sílica e fósforo) que são incorporados pelo ciclo hidrológico de bacias de drenagem e posteriormente irão atingir a zona costeira. Outros nutrientes são disponibilizados pela deposição atmosférica e a remineralização de compostos orgânicos oriundos de toda a biomassa vegetal e animal que disponibiliza os nutrientes constituintes da matéria orgânica para serem reaproveitados por organismos até o destino final deste transporte que é a zona costeira (Holloway *et al.*, 1998; Seitzinger *et al.*, 2005; Lacerda *et al.*, 2008).

Outras fontes de nutrientes são incluídas neste contexto originado pelas atividades antrópicas que estão modificando e influenciando o ciclo destas espécies químicas (Lacerda *et al.*, 2008). Deste modo, uma infinidade de processos bióticos, abióticos e humanos controlam a transferência de nutrientes das bacias de drenagem a zona costeira que são integradas pelo transporte fluvial.

No entanto, a expansão das atividades humanas ao longo das bacias de drenagem vem alterando a frequência e magnitude do transporte hídrico (estruturas de manejo hídrico como reservatórios e transposição de bacias), das cargas de matéria orgânica, organismos patogênicos, dos nutrientes (despejos municipais), dos pesticidas e herbicidas (agricultura), dos metais pesados, óleos e substâncias químicas tóxicas (indústrias, agricultura e navegação) e dos sedimentos (desmatamento e mineração) acarretando em importantes modificações no destino final destes materiais para a zona costeira (Lacerda *et al.*, 2002; Marques *et al.* 2004) podendo mudar tanto quantitativamente quanto qualitativamente o aporte de nutrientes para a zona costeira sugerindo importantes mudanças na estrutura biológica destas áreas.

O trabalho de Lacerda *et al.* (2008) indica que o aporte fluvial de nitrogênio e fósforo para os estuários do Estado Ceará é determinado por atividades humanas como agricultura, pecuária, águas servidas, aquíicultura ao longo da bacia de drenagem dos rios em detrimento das fontes naturais, como deposição atmosférica e erosão de rochas e solos. No rio Cocó, por exemplo, a emissão de nitrogênio e fósforo por fontes antrópicas foi estimada em 2.509 e 729 toneladas por ano, respectivamente, muito superior às estimativas de fontes naturais calculadas em 33 e 27 toneladas por ano, respectivamente.

1.2. A influência da construção de barragens na modificação do aporte fluvial de espécies químicas para a zona costeira.

Uma importante atividade humana que vem modificando o transporte fluvial de espécies químicas entre o continente e a zona costeira é a construção de reservatórios e o barramento dos rios.

1.2.1. A construção de barragens como uma questão ambiental global

Para suprir as necessidades das sociedades ao longo dos tempos, a humanidade barrou metade dos rios do mundo totalizando 45.000 barragens com altura de um prédio de quatro andares. Entre 1950 e 1986, aproximadamente 36.000 barragens de 15 metros foram construídas, representando um aumento de 688% (ICOLD, 1984; WCD, 2000). Estima-se que estas barragens formem reservatórios que retenham entre 11 e 15% do escoamento superficial fluvial global (L'vovich & White, 1990; Gornitz, 2000).

A partir deste cenário, foram levantadas hipóteses sobre a influência das barragens na modificação do transporte fluvial de materiais de interesse ambiental como água, sedimentos, espécies químicas (nutrientes e poluentes) que pode induzir importantes alterações na estrutura de ecossistemas aquáticos continentais e costeiros.

As modificações ocasionadas pelas barragens variam desde alterações perceptíveis como rios que se transformam em lagos, mudanças nos ciclos hidrológicos e no transporte de sedimentos que são medidas por estações fluviométricas, passando por mudanças ambientais sutis e extremamente controversas, como as alterações nos ciclos biogeoquímicos e na estrutura física e ecológica de ecossistemas continentais e costeiros (Millman, 1997; Vörösmarty *et al.*, 1997; Friedl & Wüest, 2002).

O trabalho pioneiro de Humborg *et al* (1997) apontou modificações nos ciclos biogeoquímicos e na estrutura biológica em ecossistemas costeiros no Mar Negro devido à construção da barragem “Iron Gates”, no Rio Danúbio. Porém esta avaliação realizada na zona costeira, não foi plenamente corroborada por um estudo realizado *in situ* no próprio reservatório, que indicou ausência de retenção de espécie química (sílica) abordada por Humborg *et al* (1997), devido às características hidráulicas e morfológicas do reservatório (Friedl *et al.*, 2004; McGinnis *et al.*, 2006).

Este cenário exemplifica como ainda é controverso o tema, em parte devido à ser uma abordagem recente, além da influência dos diversos tipos, usos e rotinas de operação de

reservatórios, parâmetros hidrológicos e climáticos, e fatores relativos a processos naturais e de ocupação humana ao longo das diversas bacias de drenagem.

Todos estes fatores associados podem fazer com que um reservatório seja um importante sumidouro ou em alguns casos uma fonte dos diversos materiais de interesse ambiental (Teodoru & Wehrli, 2005). Mesmo sendo reduzidos os estudos realizados *in situ* nos diversos tipos de reservatórios, muitos trabalhos vêm relacionando as alterações nas estruturas físicas, químicas e biológicas de ecossistemas costeiros a modificações impostas pelos reservatórios (Hungspreugs *et al.*, 2002; Molisani *et al.*, 2006a, 2007a; Schone *et al.*, 2006; Harashima *et al.*, 2006; Gong *et al.*, 2006; Jiau *et al.*, 2007).

Diante do cenário de aumento da demanda por água, as estruturas de manejo hídrico como barragens e transposição de bacias vêm alterando a quantidade e a distribuição de água nas bacias de drenagem e o transporte hídrico entre o continente e a zona costeira (Molisani *et al.*, 2006a). Como a estrutura física, produtividade biológica e funções ecológicas, e atualmente, econômicas dos estuários são determinadas pela interação entre o aporte fluvial e as forçantes oceanográficas, podemos supor que alterações da frequência e magnitude da vazão dos rios poderão induzir modificações na estrutura destes ecossistemas.

Deste modo, alguns trabalhos já questionam como serão as condições futuras dos estuários diante do cenário de intensas modificações do aporte fluvial induzidas por estratégias de manejo hídrico, além da intensa interferência humana através da emissão excessiva de nutrientes (Flemer & Champ, 2006). Estudos mostram que as variações naturais da vazão dos rios são importantes sinalizadores de processos metabólicos e comportamentais de organismos distribuídos pelo continente - zona costeira (Lytle & Poff, 2004), sugerindo que alterações artificiais na vazão dos rios podem modificar estruturas biológicas e tróficas em ecossistemas aquáticos.

Do mesmo modo, a retenção de sedimentos em reservatórios é frequentemente associada a eventos de erosão costeira; enquanto que a diminuição do fluxo fluvial pode induzir ao assoreamento de estuários (Pontee *et al.*, 2004; Milliman, 1997). Visando mitigar todos estes possíveis efeitos deletérios os estudos de vazões ecológicas vêm despontando como uma importante ferramenta atenuante dos impactos relacionados à formação de reservatórios.

1.2.2. A açudagem no Estado do Ceará

Considerando que a construção de barragens pode ser uma questão ambiental global, podemos supor que esta questão seja bastante importante no Estado do Ceará onde praticamente todos os ambientes fluviais estejam barrados formando segundo estimativas em torno de 8.000 reservatórios variando de pequenos açudes em propriedade rurais até o maior deles o açude castanhão com 6,7 bilhões de m³ (SRH, 2007; Martins *et al* 2007). Devido às condições climáticas imposta pelo clima semi-árido, o Estado tem a necessidade de manter um esquema de manejo hídrico baseado na construção de reservatórios (açudes) e no transporte desta água através de sistema de transposição que visa ofertar água para os mais diversos usos consultivos.

Por outro lado, esta retenção e redistribuição das águas fluviais sugerem um cenário preocupante de mudanças na transferência fluvial do continente para a zona costeira. O trabalho realizado por Molisani *et al.* (2006 b) faz uma análise preliminar dos fluxos fluviais para os estuários cearenses indicando que a rotina de operação dos açudes é que determina o aporte fluvial para muitos estuários cearense. Como em muitos casos estas barragens só liberam água a jusante em eventos de sangria, muitos estuários tiveram o aporte fluvial reduzido devido a influencia dos açudes.

Adicionalmente, segundo Molisani *et al.* (2007b), a posição da cascata de açudes em uma bacia de drenagem tem importante papel nas modificações do aporte fluvial, pois quanto mais à jusante em uma bacia um açude estiver localizado, maior será a regularização do escoamento superficial e a modificação no fluxo entre o continente e a zona costeira. Em alguns locais como o rio Pacoti a posição das barragens regulariza 80% ou mais da bacia de drenagem. No rio Jaguaribe há em torno de 30 açudes com capacidade de armazenamento maior que 10 hm³, sendo que 12 açudes regularizam 81% da bacia.

2. OBJETIVOS

Diante do cenário descrito, o objetivo deste estudo é quantificar os fluxos de água, nutrientes e material particulado em suspensão - MPS ao longo do açude Castanhão e formular balanços de massa com os quais podemos inferir sobre a capacidade e a intensidade do açude em reter ou exportar materiais fluviais da bacia de drenagem do rio Jaguaribe em direção à zona costeira.

2.1. Objetivos Específicos

- *Caracterização hídrica*: Determinar a vazão de água no açude pelo aporte do rio Jaguaribe e o de saída pela barragem do açude.
- *Caracterização química*: Avaliação espacial das concentrações de nutrientes (nitrogênio, fósforo e sílica) ao longo do açude.
- *Caracterização biológica*: Determinação das concentrações de clorofila *a* como indicador da produção primária no açude.
- *Fluxos e balanços de massa*: Determinar os fluxos relacionando a concentração das espécies químicas e do MPS analisado com a vazão de entrada e saída do açude. Com os fluxos de entrada e saída do açude poderemos determinar o balanço de massa destes materiais e inferir sobre a capacidade do açude de reter ou exportar estes materiais
- *Elaboração de cenários*: Os resultados encontrados fornecerão cenários para a investigação de possíveis efeitos nas condições físicas, químicas e biológicas de ecossistemas costeiros adjacentes à bacia do rio Jaguaribe relacionado a possíveis alterações no escoamento superficial devido à formação do açude Castanhão.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho é o açude Castanhão que está localizado na região limítrofe entre a bacia média e inferior do rio Jaguaribe, no município de Nova Jaguaribara, Estado do Ceará (Figura 4). O rio Jaguaribe é um dos principais corpos fluviais do Estado, pois sua bacia estimada em 72.645 km² abrangendo 48% da área do Estado do Ceará e disponibiliza água para várias regiões através de sistema de canais e de transposição de bacias.

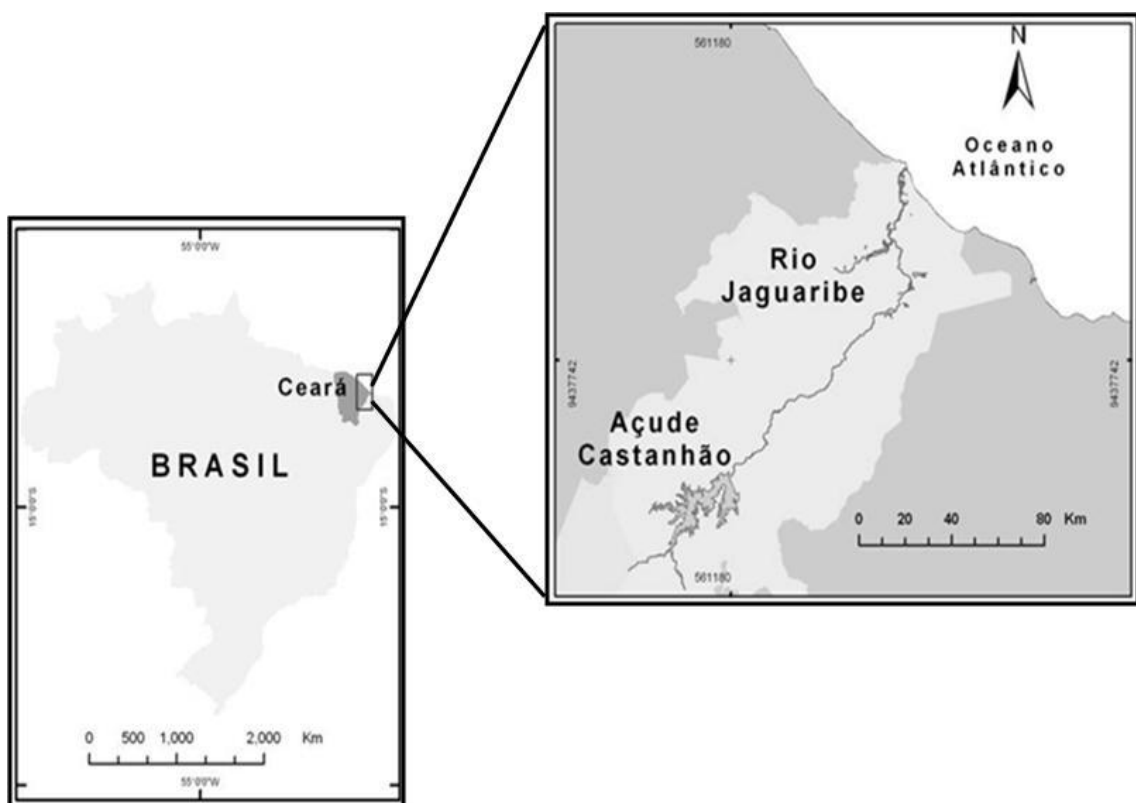


Figura 4. Mapa ilustrativo do percurso da bacia de drenagem do Rio Jaguaribe até a zona costeira evidenciando a posição do açude Castanhão limitando a porção média e inferior da bacia.

Segundo estimativas do Plano Estadual dos Recursos Hídricos (PERH, 1992), ao longo da bacia de drenagem do rio Jaguaribe estão distribuídos 4.712 reservatórios que variam desde aguadas (volume de armazenamento de até 0,1 hm³) até grandes reservatórios com volume de armazenamento de 6,7 bilhões de m³, totalizando uma capacidade de armazenamento de 6.959 hm³ sem contar com a contribuição do açude Castanhão que estava

sendo projetado no período. A área de estudo está localizada em um relevo de altitude variando entre 100 e 200 metros.

O clima na região é considerado quente/semi-árido (BSw'h', segundo classificação de Köpper) com temperaturas $> 26^{\circ}\text{C}$ e precipitações médias mensais variando entre 0 e 191 mm, estando as chuvas concentradas entre os meses Janeiro e Junho (97% do total estimado em 745 mm para os anos 1979-2005) (Figura 5) (SUDENE, 1990; FUNCEME, 2007). A evaporação medida na estação localizada na estação de Iguatú variou entre 87 e 279 mm, sendo maiores entre os meses de agosto e dezembro, totalizando anualmente 2.232 mm (Figura 6).

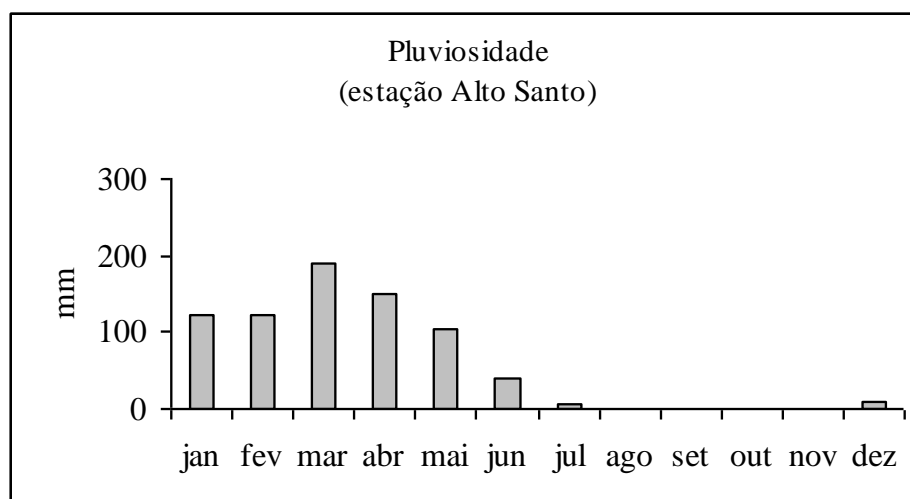


Figura 5. Distribuição mensal média das chuvas na área de estudo.

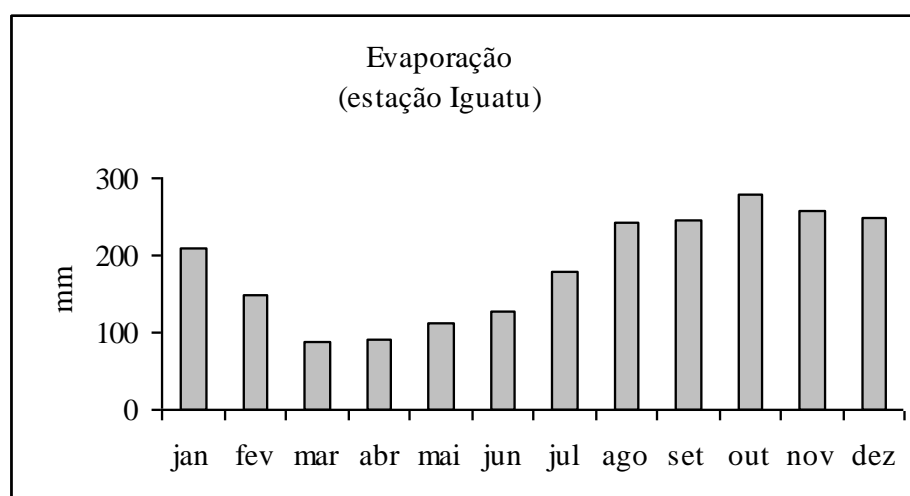


Figura 6. Evaporação média mensal para a região.

O uso do solo é caracterizado pela presença de cobertura vegetal composta de espécies arbustivas típicas da caatinga e pelas atividades humanas como agricultura, pecuária e urbanização. A área possui uma densidade demográfica inferior à média observada para o estado, porém pode-se observar a presença de cidades com população entre 50-100 mil habitantes como Tauá, Iguatu, Russas. De uma forma geral, a população se distribui de forma relativamente similar entre núcleos urbanos e rurais embora haja a tendência de decréscimo da população rural.

As atividades industriais se distribuem entre as indústrias de produtos alimentícios, metalurgia, química, mineração, têxtil, entre outros. Por fim, a agricultura e pecuária são atividades presentes no vale do Jaguaribe principalmente devido à disponibilidade hídrica aumentada pela construção de açudes na região.

O açude Castanhão é atualmente o maior açude do Estado e foi completamente inundado em 2004. O açude é de responsabilidade do DNOCS. A capacidade total de armazenamento é de 6,7 bilhões de m³, enquanto que a capacidade normal de operação é de 4,45 bilhões de m³. O volume hídrico é armazenado por uma barragem tipo terra homogênea/concreto compactado a rolo, com coroamento de comprimento de 3,4 km, largura de 7 metros e altura máxima de 60 metros.

O Açude Castanhão possui 325 quilômetros quadrados de área inundada, sendo que a linha d'água é de 58 quilômetros em direção NE-SW do leito do Rio Jaguaribe. A profundidade do açude pode chegar a mais de 50 metros. A principal barreira tem 1.500 metros de extensão, 11 de largura, 12 comportas e quatro válvulas dispersoras.

A vazão é regularizada diariamente para efeito de perenização do Rio Jaguaribe, mantida, em média, em 10 m³/s (10 mil litros) durante o período de estiagem e 5 m³/s no período de chuvas.

Os principais usos consultivos das águas do açude são abastecimento humano e irrigação de agricultura, que são fornecidos através da captação direta do açude e pela perenização da porção do rio Jaguaribe a jusante da barragem. Outros usos como a pesca, turismo e atualmente a piscicultura de tilápia em tanques-rede vêm se tornando uma importante atividade econômica realizada nas águas do açude. Com a conclusão do Canal do Trabalhador o Castanhão irá disponibilizar água para todo o Estado do Ceará.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Amostragem

Ao longo do açude Castanhão foram escolhidos três pontos para a realização das amostragens (Figura 7).

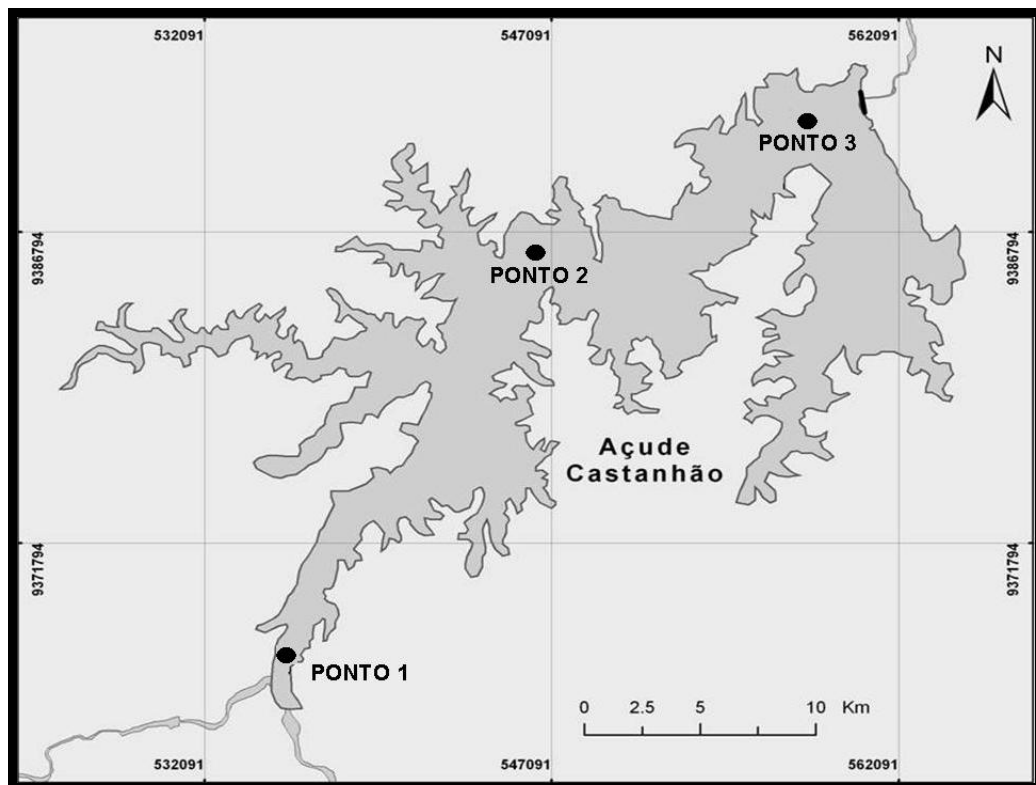


Figura 7. Mapa ilustrativo que evidencia a localização dos pontos de amostragem realizados na saída de campo no Açude Castanhão.

O primeiro ponto de amostragem está localizado na área de transição entre o açude e o canal fluvial do Rio Jaguaribe mais sob influência do volume de água do reservatório. Nesta porção do açude as condições fisiográficas são tipicamente fluviais, não se encontra nenhum adensamento populacional e como característica visual predominante é a grande densidade de macrófitas aquáticas (figura 8). O segundo ponto de amostragem está localizado no centro do reservatório representado por condições tipicamente lacustres (figura 9-A). O terceiro ponto está localizado a aproximadamente 1 km da barragem do açude com características tipicamente lacustres onde pisciculturas em tanques-rede de tilápias estão sendo implementadas (figura 9-B).



Figura 8. Fotos da área de coleta na porção inicial do açude (ponto 1), limítrofe entre o canal do rio Jaguaribe e a condição lacustre do açude fluvial.

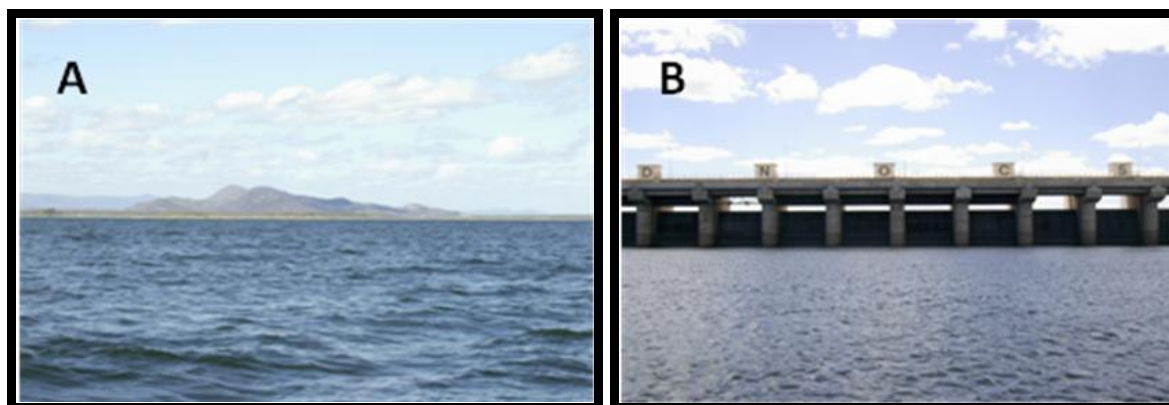


Figura 9. Fotos da área de coleta no meio do açude (ponto 2) (A) e na estação próxima a barragem (ponto 3) (B).

Para testar a hipótese do presente estudo, fluxos de água, nutrientes e MPS (sedimentos e partículas orgânicas e inorgânicas) foram determinados na entrada, meio e saída do açude, com os quais o balanço de massa de cada material analisado foi determinado, visando avaliar a capacidade de exportação ou retenção do açude. Os fluxos conjugam informações sobre concentrações de nutrientes e MPS obtidas em coletas periódicas com a vazão de água que entra e sai do açude. Devido às características intermitentes da bacia do rio Jaguaribe as modificações do aporte fluvial somente podem ser analisadas no período de chuvas quando há transporte de água pelo rio, ficando impossibilitado qualquer análise no período de estiagem quando o rio fica completamente seco.

Deste modo, foram realizadas seis coletas durante o período chuvoso que ocorreram em Novembro de 2006, Janeiro, Fevereiro, Março, Maio a Junho de 2007. As coletas foram realizadas na entrada (ponto 1), na porção mediana (ponto 2) e na porção final do açude próximo à barragem (ponto 3) (Figura 7) sempre no mesmo período entre 8h e 12h.

O transporte até os pontos foi realizado através de uma lancha rápida cedida pelo DNOCS.

Em cada ponto de coleta foram coletadas amostras de água para as análises de nutrientes na superfície (1 metro abaixo da superfície) e no fundo (1 metro acima do fundo) da coluna d'água com auxílio da Garrafa de Van Dorn que possui a capacidade para 5 litros. As amostras foram transferidas para garrafas previamente lavadas em solução de ácido clorídrico HCl 1%, enxaguados com água deionizada (Mili Q) e etiquetadas de conformidade com os estratos verticais já mencionados. No momento da coleta estas garrafas foram rinsadas vigorosamente com água do açude.

As garrafas com as amostras foram mantidas em saco plástico lacrado e refrigeradas até o momento da filtração. Em um período de até 4 horas após as coletas, as amostras foram filtradas através de filtro de composição de acetato de celulose com diâmetro de poro de 0,45 µm para a obtenção das alíquotas filtradas das amostras para análises das concentrações das espécies de nutrientes dissolvidos.

Todas as amostras foram mantidas congeladas até as análises serem efetuadas dentro de 24-48 horas após as coletas. As amostras de água para análise de clorofila *a* foram armazenadas em frascos opacos e mantidas em gelo durante a coleta e filtradas num período de 4 horas após as coletas, em filtros de fibra de vidro, sendo os filtros mantidos em tubos Falcon enrolados em papel alumínio e resfriados até as análises serem efetuadas, visando a fotooxidação da clorofila *a* retida no filtro.

Após coleta, todos os frascos contendo as amostras para análise foram refrigerados, em caixa térmica, permanecendo assim até a chegada ao Laboratório de Química Ambiental (LAQA), do Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, onde foram congeladas em freezer até o momento da análise para obtenção dos dados abióticos (Clorofila *a*, nitrito, nitrato, amônia, ortofosfato, sílica dissolvida, nitrogênio total e fósforo total).

No momento de cada coleta foram medidos os parâmetros físico-químicos como temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH, Eh, através de uma sonda multi-parâmetros Modelo YSI 556 na superfície e fundo da coluna d'água, além da transparência de Secchi medida com Disco de Secchi.

4.2. Análises Químicas

As análises químicas de nutrientes incluem a forma dissolvida e total de nitrogênio e fósforo, e a forma dissolvida de sílica. As amostras destinadas às análises de nitrogênio amoniacal total dissolvido ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) usam como princípio a reação de Berthelot, o método para determinação de nitrito e nitrato dissolvidos, usa a reação de Griess, sendo que o nitrato foi previamente reduzido em uma coluna contendo grãos de cádmio; o método para fosfato inorgânico dissolvido e a sílica reativa tem como base a reação do azul de molibdênio, todos descritos em APHA (2005).

O fósforo total (P-total) foi analisado segundo APHA (1998) através da digestão das amostras com ácido nítrico e sulfúrico concentrados sendo o pH ajustado e as concentrações determinadas espectrofotometricamente de maneira similar ao ortofosfato.

Os pigmentos de clorofila *a* foram determinados segundo o método descrito em APHA (2005), usando acetona 90% como solvente para solubilizar o material retido nos filtros, e medindo a quantidade total de clorofila *a*, com medidas da absorbância nos comprimentos de onda de 664, 665 e 750 nm, antes e após acidificação da amostra com HCl. Todas as medidas das absorbâncias foram feitas em um espectrofotômetro de duplo feixe, da marca VARIAN modelo CARY 1E, em cubetas de um (1) cm de percurso ótico.

As amostras foram analisadas, no mínimo, em duplicata, e uma curva de calibração sempre acompanhava o lote de amostra a ser analisado. As médias das concentrações e seus respectivos desvios padrões foram calculados e quando o coeficiente de variação ($\text{CV} = \text{desvio padrão} \times 100 / \text{média}$) era maior que 10%, a amostra era novamente analisada. Os limites de detecção obtidos para estes parâmetros foram calculados segundo Hubaux & Vox (1970) (tabela 2).

Tabela 2. Limites de detecção das técnicas analíticas para análises de nutrientes (mg/L) e clorofila *a* ($\mu\text{g/L}$).

Si	PO_4^{3-}	NO_2^-	NO_3^-	NH_4^+	N-Total	P-Total	Clorofila <i>a</i>
0,026	0,007	0,012	0,115	0,08	0,53	0,007	0,200

4.3. Vazão e balanço hídrico

O fluxo hídrico de entrada e saída irão controlar o balanço dos materiais analisados ao longo do açude, e seu entendimento é de vital importância para determinar a influência do açude no transporte fluvial do rio Jaguaribe. O balanço é determinado pelo fluxo de água que entram no açude através do transporte fluvial do rio Jaguaribe e o fluxo de saída do açude via liberação pela barragem que é determinada segundo a rotina de operação do reservatório.

O fluxo de água que entra no açude pelo rio Jaguaribe (afluências, m³/s) foi calculado considerando a alteração no volume armazenado do açude obtido a partir das leituras diárias das cotas e das relações com evaporação, precipitação e vazão liberada pela barragem (COGERH, dados não publicados).

A vazão liberada pela barragem (m³/s) é determinada segundo a rotina de operação do açude, que considera o volume armazenado no período chuvoso e as demandas ao longo da bacia incluindo a perenização do rio Jaguaribe (demandas difusas), abastecimento humano e perímetros irrigados (COGERH & DNOCS, 2006).

4.4. Concentração, fluxo e balanço de material particulado em suspensão (MPS)

O balanço de MPS é determinado pelos fluxos de entrada e saída de sedimentos e outras partículas orgânicas e inorgânicas particuladas. Em cada ponto de coleta foram coletadas duplicatas de amostras de água na superfície e no fundo do açude utilizando garrafas de Van Dorn para análises da concentração de MPS. Estas amostras foram filtradas em filtro de diâmetro de poro de 0,45 µm após filtração de um volume de água definido. Estes filtros foram secados a 60°C e pesados em balança analítica.

O cálculo da concentração de MPS foi determinado de acordo com seguinte protocolo:

$$[\text{MPS}] = (\text{PFA} - \text{PFI}) \times \text{VAF}$$

onde: [MPS] é concentração de MPS (mg/L); PFA é peso filtro com amostra (mg), PFI é peso do filtro inicial sem amostra (mg), VAF é volume de amostra filtrado (mL).

O fluxo de entrada e saída de MPS no Castanhão foi calculado considerando:

$$\text{Fluxo}_E = [\text{MPS}] \times \text{Vazão}_E \quad \text{Fluxo}_S = [\text{MPS}] \times \text{Vazão}_S$$

A partir dos fluxos, o balanço de massa foi calculado subtraindo o fluxo de saída do fluxo de entrada.

4.5. Concentração, fluxos e balanço de nutrientes.

O balanço de nutrientes é da mesma forma determinado através da obtenção dos fluxos de entrada e saída de nutrientes no açude. Os fluxos são calculados a partir da relação entre as concentrações de nutrientes e do fluxo de água que entra no açude pela descarga do rio Jaguaribe e que é liberado pela barragem. As concentrações de nutrientes foram determinadas em amostras de águas coletadas em Novembro de 2006, Janeiro, Fevereiro, Março, Maio e julho de 2007 nos pontos de coleta ao longo do açude em diferentes profundidades (superfície e fundo). As concentrações dos nutrientes (mg/L) e o fluxo hídrico que entra e sai (m^3/s) do açude determinam os fluxos de nutrientes ao longo do açude (mg/s), bem como o balanço de massa que indica a capacidade do açude em reter ou exportar os nutrientes no período chuvoso (toneladas/período chuvoso).

Para o cálculo de todos os fluxos foram utilizadas médias das concentrações de nutrientes e MSP entre a superfície e fundo da coluna d'água amostrada. A análise das diferenças espaciais das concentrações de nutrientes e MPS ao longo do açude e entre a superfície e fundo da coluna d'água foram avaliadas pelo teste estatístico não-paramétrico t-Student visando avaliar diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$). As correlações entre os parâmetros analisados que poderão indicar processos determinantes na emissão ou retenção de materiais analisados pelo açude serão determinadas através da utilização da correlação não-paramétrica de Spearman.

5. RESULTADOS

5.1. Vazão de entrada e saída no açude Castanhão

Através dos dados hidrológicos foram avaliados os fluxos de entrada e saída de água para o açude Castanhão para o período de estudo através da obtenção da vazão de água no açude pelo aporte do rio Jaguaribe e o de saída pela barragem do açude (COGERH, dados não publicados). Para os cálculos dos fluxos e balanços de MPS e nutrientes foram utilizados as vazões de entrada, através do escoamento superficial do rio Jaguaribe, e a vazão liberada pela barragem relativa a cada período da coleta.

Tabela 3. Vazão de entrada e saída no açude Castanhão durante o período de amostragem (m^3/s).

	Entrada	Saída
Novembro/06	0	15
Janeiro/07	13	11
Fevereiro/07	131	5,0
Março/07	56	5,0
Maió/07	71	8,0
Junho/07	35	5,0

Segundo os fluxos avaliados, a vazão de entrada do rio Jaguaribe no primeiro evento de monitoramento é ausente devido ao caráter intermitente durante o período de estiagem, não havendo transferência de água para o açude neste período. A partir do mês de Janeiro com o início do período chuvoso, o rio Jaguaribe começa a alimentar o Castanhão com vazões de $13 \text{ m}^3/\text{s}$ (Janeiro), $131 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fevereiro), $56 \text{ m}^3/\text{s}$ (Março), $71 \text{ m}^3/\text{s}$ (Maio), $35 \text{ m}^3/\text{s}$ (Julho) (Tabela 3).

A descarga do açude para a jusante da barragem variou de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no período de seca, onde há a necessidade de perenizar o leito seco do rio Jaguaribe e ofertar água as demandas a jusante, a $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no período de chuvas onde a necessidade de perenização é reduzida devido ao início das chuvas e aumento do escoamento superficial.

5.2. *Parâmetros físico-químicos das áreas amostradas do açude Castanhão.*

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros limnológicos obtidos durante o período de coleta visando a caracterização das diferentes porções do açude.

Tabela 4. Média (desvio padrão) e faixa de variação dos parâmetros físico-químicos, Nutrientes e clorofila *a* analisados nos diferentes pontos do açude Castanhão.

	Entrada	Meio	Barragem
Profundidade Média (m)	7.0	19	32
Profundidade Disco Secchi (m)	1,1 (0,38) 0,65 – 1,50	1,9 (0,32) 1,6 – 2,3	2,0 (0,33) 1,7 – 2,4
Material em Suspensão (mg/L)	11 (10) 2,5 – 25	3,7 (2,1) 0,72 – 8,4	2,6 (2,5) 0,72 – 6,1
Temperatura	29,2 (0,69) 28,3 – 30,4	29,0 (1,0) 27,9 – 30,9	28,9 (1,2) 27,3 – 30,8
pH	7.1 (0.4) 6,6 – 7,8	7,4 (0,20) 7,2 – 7,7	7,7 (1,7) 7,2 – 8,1
Condutividade (mS/cm)	230 (100) 130 – 350	230 (90) 130 - 280	230 (80) 100 - 280
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	2,2 (1,7) 0 – 4,4	4,0 (2,2) 1,2 – 6,5	5,1 (1,7) 2,7 – 7,7
Si –D (mg/L)	5,7 (0,82) 4,1 – 6,9	5,08 (1,3) 3,41 – 7,76	5,18 (1,5) 3,99 – 8,63
NH ₄ ⁺ (µg/L)	180 (50) 125 – 255	130 (13) 110 - 150	290 (40) 110 - 1200
PO ₄ ³⁻ (µg/L)	70 (80) 9,0 – 236	46 (21) 23 – 84	48 (49) 21 - 120
NT (µg/L)	920 (300) 600 – 1543	850 (410) 320 – 1700	790 (450) 190 – 1800
PT (µg/L)	150 (110) 26 – 369	58 (29) 24 – 76	33 (32) 11 - 123
Clorofila <i>a</i> (µg/L)	3,3 (1,4) 1,6 – 5,5	7,5 (4,5) 0,71 - 15	6,7 (3,5) 1,7 - 13

5.2.1. Entrada (Ponto 1)

Esta estação de amostragem caracterizou a entrada do açude que ainda apresenta a fisiografia do canal fluvial do rio Jaguaribe. Nesta área a distância máxima entre as margens é de 300 metros e a profundidade máxima é de 8 metros. A fisiografia fluvial associado a outros fatores permite a extensa colonização de bancos de macrófitas aquáticas nesta área. A influência do ainda efetivo transporte fluvial pode ser observada pelos menores valores de transparência de Secchi encontrados no açude (tabela 4).

As águas podem ser caracterizadas como básicas considerando a faixa de temperatura, valores de condutividade variando entre 130 a 350 mS/cm e fortes déficits de oxigênio dissolvido, apresentando desoxigenação no fundo da coluna d'água na coleta de. Maio de 2007. A distribuição vertical da temperatura sugere ausência de estratificação térmica entre a superfície e o fundo do açude devido aos valores serem similares estatisticamente; do mesmo modo para os valores de condutividade, pH e oxigênio dissolvido ao longo da coluna d'água. As concentrações de MPS e nutrientes também não puderam ser diferenciadas estatisticamente entre a superfície e fundo da coluna d'água.

Considerando a análise estatística da variação espacial dos parâmetros analisados pode-se relatar que a estação #1 teve maiores concentrações de fósforo total em relação às estações #2 e #3, maiores valores de amônia em relação à estação #2, menores concentrações de clorofila *a* em relação às estações #2 e #3 e maior concentração de MPS em relação a estação #3. Para todos os outros parâmetros as concentrações observadas nesta área do açude são consideradas similares as outras porções do açude.

As concentrações de nitrato e nitrito ficaram abaixo do limite de detecção em todas as coletas (Tabela 2). A influência fluvial nesta área, representada pelos maiores valores MPS e menor transparência de Secchi indica uma limitação para a produção primária fitoplanctônica como demonstrado pela variação espacial da clorofila *a*.

5.2.2. Meio (Ponto 2)

Esta estação de coleta caracterizou o meio do açude que apresenta características tipicamente lacustres com distância máxima entre as margens superior a 5 km e profundidade máxima de 21 metros. Durante o período de amostragem, a influência do rio Jaguaribe nesta área é reduzida relativa às reduzidas concentrações de MPS e um aumento da transparência de Secchi (Tabela 4).

As águas podem ser caracterizadas como básicas; valores de condutividade similar à estação de coleta 1 (entrada), porém com um aumento das concentrações de oxigênio dissolvido. Na coluna d'água pode-se observar similaridade dos valores médios de todos os parâmetros analisados, a exceção das concentrações de fósforo total que foi estatisticamente superior no fundo em relação a superfície da coluna d'água.

Nesta área do açude as concentrações médias tiveram uma redução estatisticamente significativa em relação à entrada do açude para fósforo total e amônia, e um aumento nos teores de clorofila *a*. As concentrações de nitrato e nitrito permaneceram abaixo do limite de detecção em todas as coletas (Tabela 2).

A diminuição da influência fluvial nesta área pode ser representada pelo aumento da transparência da coluna d'água, como demonstrado pelo aumento dos valores de transparência de Secchi. O aumento da transparência favorece o aumento da produção primária como demonstrado pelo aumento estatístico da concentração de clorofila *a* nesta porção do açude (Tabela 4).

5.2.3 Barragem (Ponto 3)

Esta estação de coleta caracterizou o fim do açude na região próxima a barragem (500 metros). Esta área também possui características tipicamente lacustres apresentando as maiores profundidades do açude (profundidade máxima de 32 metros). Devido à distância da entrada do açude (em torno de 40 km) há a redução do material particulado transportado pelo rio nesta área que induz a um aumento na transparência de Secchi (Tabela 4).

As águas podem ser caracterizadas como alcalina; valores de condutividade e oxigênio dissolvido similares à estação de coleta #2. A variação vertical o longo da coluna d'água todos os parâmetros analisados foram estatisticamente considerados similares, a exceção da temperatura e dos níveis de oxigênio dissolvido que foram estatisticamente superiores na superfície em relação ao fundo.

Nesta área do açude as concentrações de fósforo total e MPS tiveram uma diminuição em relação à entrada do açude e maiores concentrações de clorofila *a*. Para todos os outros parâmetros esta área do açude pode ser estatisticamente similar a entrada do açude. Para todos os parâmetros esta estação pode ser considerada similar a porção media do açude. As concentrações de nitrato e nitrito permaneceram abaixo do limite de detecção (Tabela 2).

5.3. Fluxo e balanço de MPS

O balanço de MPS foi determinado através da medição das concentrações de MPS e das vazões ao longo do açude. A tabela 4 mostra os dados utilizados para determinar os fluxos e o balanço de MPS no açude. Em todos os eventos de coleta foi observada uma diminuição das concentrações de MPS ao longo do açude (Tabela 4), sugerindo que este corpo lacustre retém as partículas transportadas em suspensão oriunda principalmente do rio Jaguaribe. As concentrações de MPS variaram entre 2,5 e 25 mg/L na entrada do açude e 0,7 e 6,1 mg/L na saída do açude durante o período de amostragem. A diminuição das concentrações do MPS foi em média de 88% entre a entrada e barragem..

As concentrações de MPS foram relacionadas à vazão fluvial que entra no açude e a vazão liberada pela barragem para a determinação dos fluxos de MPS (Tabela 5). O fluxo de entrada variou de 90 a 3.210 g/s, enquanto que o fluxo de saída que é regularizado pela rotina de operação da barragem variou entre 4 a 92 g/s. Através dos fluxos foi formulado o balanço de massa de MPS indicando que para o período estudado o açude retém aproximadamente em torno de 17.430 toneladas de MPS, o que representa 97% do aporte fluvial de entrada.

É importante mencionar que na estação de seca o açude se transforma em uma fonte de MPS, pois mesmo com a ausência do aporte fluvial a barragem continua liberando água para a jusante. Neste período (Novembro) o açude liberou 92 g/s (Tabela 5).

Tabela 5. Concentração, fluxo e balanço de MPS no açude Castanhão.

	Entrada			Saída			Balanço (g/s)	Status *
	MPS (mg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)	MPS (mg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)		
Novembro/06	8,5	0	-	6,1	15	92	92	Exp
Janeiro/07	7,1	13	90	1,8	11	19	71	Ret
Fevereiro/07	25	131	3.210	2,5	5,0	13	3.197	Ret
Março/07	4,8	56	270	0,7	5,0	4,0	266	Ret
Mai/07	2,5	71	180	1,2	8,0	10	170	Ret
Junho/07	2,6	35	90	1,1	5,0	5,6	85	Ret
Fluxo**			17.83			409	17.430	Ret

* Indica a condição do açude em exportar (Exp) ou reter (Ret) o MPS.

** (ton/período chuvoso).

5.4. Fluxos e balanço de nutrientes

Os fluxos Si-D, PO_4^{3-} , NH_4^+ e P-total e N-total foram determinados através da medição das concentrações destes nutrientes na entrada e na barragem e da relação das concentrações com as vazões do rio Jaguaribe (entrada) e liberada pela barragem (saída). Os fluxos e balanços de NO_2^- e NO_3^- não foram estimados em virtude das concentrações destes nutrientes se apresentarem abaixo do limite de detecção em todas as coletas realizadas.

A Tabela 6 mostra as concentrações, fluxos e balanço de sílica dissolvida (Si-D) no período de coleta. Como não foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) para Si-D entre as amostras de superfície e fundo no ponto #1 e #3 acabou sendo utilizada para o cálculo dos fluxos uma concentração média para a coluna d'água.

A relação entre as concentrações e as vazões na entrada indicou fluxos variando entre 70 e 630 g/s, enquanto os fluxos de liberação pela barragem variaram entre 20 e 60 g/s. O balanço entre os fluxos de entrada e saída no açude indicou uma retenção de 4.950 toneladas de Si-D no período chuvoso amostrado, indicando que o açude retém 89% do aporte de entrada pelo rio Jaguaribe. É importante mencionar que na estação de seca o açude se transforma em uma fonte de Si-D, pois mesmo com a ausência do aporte fluvial a barragem continua liberando água para a jusante. Neste período (Novembro) o açude liberou 60 g/s do nutriente (Tabela 6).

Tabela 6. Concentração, fluxo e balanço de sílica dissolvida (Si-D) no açude Castanhão.

	Entrada			Saída			Balanço (g/s)	Status *
	Si-D (mg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)	Si-D (mg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)		
Novembro/06	5,3	0	-	4,1	15	60	60	Exp.
Janeiro/07	5,9	13	70	4,7	11	50	20	Ret.
Fevereiro/07	4,8	131	630	4,3	5,0	20	610	Ret.
Março/07	5,1	56	290	4,0	5,0	20	270	Ret.
Maió/07	6,6	71	470	7,4	8,0	60	410	Ret.
Junho/07	6,3	35	221	6,3	5,0	32	190	Ret.
Fluxo**			5.550			600	4.950	Ret.

* Indica a condição do açude em exportar (Exp) ou reter (Ret) o Si-D.

** (ton/período chuvoso).

A Tabela 7 mostra as concentrações, fluxos e balanço (g/s) de fosfato no período de coleta. Como não foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre as concentrações de superfície e fundo, nos utilizamos para o cálculo dos fluxos uma concentração média para a coluna d'água.

A relação entre as concentrações e as vazões na entrada indicou fluxos variando entre 0,3 e 30 g/s, enquanto que os fluxos liberados pela barragem variaram entre 0,035 e 0,36 g/s. O balanço entre os fluxos de entrada e saída no açude indicou uma retenção de 135 toneladas de PO_4^{3-} no período chuvoso amostrado. Este balanço sugere que durante o período chuvoso o açude retém 97% do aporte de PO_4^{3-} que entra no açude pelo rio Jaguaribe. É importante mencionar que na estação de seca o açude se transforma em uma fonte de PO_4^{3-} , pois mesmo com a ausência do aporte fluvial a barragem continua liberando água para a jusante. Neste período (Novembro) o açude liberou 1,07 g/s de PO_4^{3-} (Tabela 7).

A Tabela 8 mostra as concentrações, fluxos e balanço de nitrogênio amoniacal (NH_4^+) no período de coleta. Como não foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) para NH_4^+ entre as amostras de superfície e fundo nos utilizamos para o cálculo dos fluxos uma concentração média para a coluna d'água. A distribuição de NH_4^+ entre a entrada e saída do açude indicou que as concentrações não podem ser diferenciadas estatisticamente (Tabela 4).

Tabela 7. Concentração, fluxo e balanço de fosfato (PO_4^{3-}) no açude Castanhão.

	Entrada			Saída			Balanço (g/s)	Status *
	PO_4^{3-} ($\mu\text{g/L}$)	Vazão (m^3/s)	Fluxo (g/s)	PO_4^{3-} ($\mu\text{g/L}$)	Vazão (m^3/s)	Fluxo (g/s)		
Novembro/06	25	0	-	14	15	0,21	1,07	Exp.
Janeiro/07	41	13	0,53	7,0	11	0,077	0,45	Ret.
Fevereiro/07	228	131	30	19	5,0	0,094	29	Ret.
Março/07	84	56	4,7	71	5,0	0,36	4,3	Ret.
Mai/07	23	71	1,6	7,0	8,0	0,056	1,5	Ret.
Junho/07	10	35	0,33	7,0	5,0	0,035	0,30	Ret.
Fluxo**			138			2,4	135	Ret.

* Indica a condição do açude em exportar (Exp) ou reter (Ret) o PO_4^{3-} .

** (ton/período chuvoso).

A relação entre as concentrações e as vazões na entrada indicou fluxos variando entre 2,0 e 14 g/s, enquanto que a barragem libera fluxos variando entre 0,4 a 5,6 g/s. O balanço entre os fluxos de entrada e saída no açude indicou uma retenção de 64 toneladas de NH_4^+ no período chuvoso amostrado. Esta carga retida representa 68% do aporte de NH_4^+ que entra no

açude pelo rio Jaguaribe. É importante mencionar que na coleta realizada em Maio/2007, mesmo com maiores concentrações encontradas na saída do açude balanço permanece negativo indicando como a interferência hídrica pela rotina de operação da barragem é um importante fator indutor da capacidade de retenção do açude. Na estação de seca o açude se transforma em uma fonte de NH_4^+ , pois mesmo com a ausência do aporte fluvial a barragem continua liberando água para a jusante 2,0 g/s de NH_4^+ (Tabela 8).

Tabela 8. Concentração, fluxo e balanço de amônia (NH_4^+) no açude Castanhão.

	Entrada		Saída				Balanço (g/s)	Status *
	NH_4^+ ($\mu\text{g/L}$)	Vazão (m^3/s)	Fluxo (g/s)	NH_4^+ ($\mu\text{g/L}$)	Vazão (m^3/s)	Fluxo (g/s)		
Novembro/06	190	0	-	130	15	2,0	2,0	Exp.
Janeiro/07	160	13	2,1	120	11	1,4	0,7	Ret.
Fevereiro/07	110	131	14	80	5,0	0,40	13,6	Ret.
Março/07	80	56	4,5	100	5,0	0,50	4,0	Ret.
Mai/07	170	71	12	690	8,0	5,6	6,4	Ret.
Junho/07	80	35	2,8	80	5,0	0,40	2,4	Ret.
Fluxo**			94			30	64	Ret.

* Indica a condição do açude em exportar (Exp) ou reter (Ret) o NH_4^+ .

** (ton/período chuvoso).

A Tabela 9 indica as concentrações, fluxos e balanço de fósforo total (P-total) no período de coleta. Como não foram observadas diferenças estatisticamente significativas para P-total entre as amostras de superfície e fundo na entrada e barragem do açude nos utilizamos para o cálculo dos fluxos uma concentração média para a coluna d'água. A distribuição de P-total ao longo do açude indicou uma diminuição das concentrações ao longo do açude.

A relação entre as concentrações e as vazões na entrada indicou fluxos variando entre 1,2 e 45 g/s, enquanto que a barragem libera fluxos variando entre 0,06 a 0,37 g/s. O balanço entre os fluxos de entrada e saída no açude indicou uma retenção de 186 toneladas de P-total no período chuvoso amostrado. Esta carga retida representa 97% do aporte de P-total que entra no açude pelo rio Jaguaribe. É importante mencionar que na estação de seca o açude se transforma em uma fonte de P-total, pois mesmo com a ausência do aporte fluvial a barragem continua liberando água para a jusante. Neste período (Novembro) o açude liberou 0,29 g/s de P-total (Tabela 9).

Tabela 9. Concentração, fluxo e balanço de fósforo total (P-total) no açude Castanhão.

	Entrada			Saída			Balanço (g/s)	Status *
	P-total (µg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)	P-total (µg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)		
Novembro/06	120	0	-	19	15	0,29	0,29	Exp.
Janeiro/07	92	13	1,2	21	11	0,24	0,97	Ret.
Fevereiro/07	34	131	45	22	5,0	0,11	45	Ret.
Março/07	160	56	9,0	74	5,0	0,37	8,6	Ret.
Mai/07	61	71	4,3	7,1	8,0	0,06	4,2	Ret.
Junho/07	97	35	3,4	22	5,0	0,11	3,3	Ret.
Fluxo**			189			2,85	186	Ret.

* Indica a condição do açude em exportar (Exp) ou reter (Ret) o P-total.

** (ton/período chuvoso).

A Tabela 10 indica as concentrações, fluxos e balanço de Nitrogênio total (N-total) no período de coleta. Como não foram observadas diferenças estatisticamente significativas para N-total entre as amostras de superfície e fundo, utilizou-se para o cálculo dos fluxos uma concentração média para a coluna d'água. A distribuição de N-total ao longo do açude indicou que as concentrações não podem ser diferenciadas estatisticamente a um nível de significância de 95% (Tabela 4).

A relação entre as concentrações e as vazões na entrada indicou fluxos variando entre 16 e 116 g/s, enquanto que a barragem libera fluxos variando entre 1,1 a 15 g/s. O balanço entre os fluxos de entrada e saída no açude indicou uma retenção 730 toneladas de N-total no período chuvoso amostrado. Esta carga retida representa 86% do aporte de N-total que entra no açude pelo rio Jaguaribe. É importante mencionar que na estação de seca o açude se transforma em uma fonte de N-total, pois mesmo com a ausência do aporte fluvial a barragem continua liberando água para a jusante junto com 12 g/s de N-total (Tabela 10).

Tabela 10. Concentração, fluxo e balanço de nitrogênio total (N-total) no açude Castanhão.

	Entrada			Saída			Balanço (g/s)	Status *
	N-total (µg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)	N-total (µg/L)	Vazão (m ³ /s)	Fluxo (g/s)		
Novembro/06	780	0	-	800	15	12	12	Exp.
Janeiro/07	1200	13	16	1400	11	15	1,0	Ret.
Fevereiro/07	890	131	116	220	5,0	1,1	115	Ret.
Março/07	660	56	37	720	5,0	3,6	33	Ret.
Mai/07	530	71	38	530	8,0	4,2	34	Ret.
Junho/07	1100	35	38	800	5,0	4,0	34	Ret.
Fluxo**			840			110	730	Ret.

* Indica a condição do açude em exportar (Exp) ou reter (Ret) o N-total.

** (ton/período chuvoso).

6. DISCUSSÃO

As mudanças hidrológicas na vazão e no transporte fluvial do rio Jaguaribe são importantes fatores induzidos pela barragem do açude Castanhão. Uma das mais interessantes peculiaridades do rio Jaguaribe é que suas vazões podem variar de 0 a 7.000 m³/s em poucos meses devido à sua condição intermitente (PERH, 1992). De acordo com os dados descritos na Tabela 2, as vazões que chegam ao Castanhão pelo rio Jaguaribe variaram entre 13 e 131 m³/s, embora estas vazões sejam influenciadas pela rede de açudes, localizados a montante. As descargas liberadas pela barragem do Castanhão são regularizadas entre 5 e 15 m³/s, sendo as maiores vazões liberadas no período de estiagem, enquanto que os menores fluxos ocorrem no período de chuvas.

As vazões liberadas pela rotina de operação da barragem estão relacionadas com a necessidade das demandas (perímetros de irrigação, abastecimento humano, etc), sendo determinadas de acordo com a água acumulada no açude na estação de chuva. Segundo esta análise, teoricamente a água liberada pela barragem do Castanhão não irá chegar ao mar, sendo consumida ao longo do trecho. Porém devemos considerar que uma importante parte da água do Castanhão consumida pelas demandas nas áreas a jusante da barragem irá retornar ao rio Jaguaribe na forma de águas servidas atingindo a zona costeira.

Como o Castanhão regulariza em torno de 60% da bacia de drenagem do rio Jaguaribe e possui um grande volume de armazenamento (6,7 bilhões de m³), somente grandes enxurradas (como no ano de 2004 e atual em 2009) poderão ocasionar a abertura das comportas. Para a maior parte das vazões fluviais que chegam ao Castanhão à barragem libera entre 5 e 15 m³/s, sendo atualmente esta vazão representativa de 60% da bacia de drenagem. Portanto podemos supor que a água do rio que chega ao mar esta restrita a contribuição de somente 40% da bacia do Jaguaribe, embora estas vazões ainda sofram modificações devido à influência do açude Banabuiú e da pequena açudagem, como as diversas “passagens molhadas”, sugerindo um cenário de profundas reduções na transferência de água da bacia de drenagem para a zona costeira.

De acordo com os resultados, a barragem do Castanhão também modifica o transporte fluvial de MPS (sedimentos em suspensão e partículas orgânicas e inorgânicas) como demonstrado na Tabela 5. As concentrações de MPS variaram entre 2,5 e 25 mg/L, tendo uma relação direta com a vazão do rio Jaguaribe, onde a maior concentração (25 mg/L) ocorreu em Fevereiro de 2007 quando foi observada a maior vazão do rio para o açude (131 m³/s).

A variação espacial das concentrações de MPS mostrou uma redução ao longo do açude, com as maiores concentrações relatadas na entrada do Castanhão refletindo o ainda efetivo transporte fluvial do rio Jaguaribe. A redução da capacidade de transporte do rio e a transformação de um ambiente “dinâmico” fluvial para um ambiente “deposicional” lacustre reduzem a velocidade do fluxo de água. Quando a velocidade de deposição de uma partícula for maior que o transporte advectivo, induzido pela velocidade do fluxo hídrico, a partícula irá se depositar. A diminuição da velocidade dos fluxos de água do rio Jaguaribe ao longo do açude induz a deposição das partículas ao entre a entrada e barragem.

Conforme demonstrado na Tabela 5, o balanço de MPS no açude indica uma retenção média de 17.430 toneladas durante o período chuvoso que representa 97% do aporte de entrada, em parte influenciado pela vazão de saída da barragem que é regulada segundo a rotina de operação. Durante o período de estiagem o açude se transforma em uma fonte de MPS, pois embora não haja aporte do rio Jaguaribe a barragem continua liberando água. Porém a carga exportada durante a estação de estiagem representa somente 6% da carga retida durante a estação de chuvas.

A diminuição da capacidade de transporte que ocasiona a redução do MPS e a retenção deste material no açude é em parte relacionada ao aumento do tempo de residência da água no açude. A Tabela 11 indica um tempo de residência teórico para o açude de 4145 dias, calculado a partir da relação entre o volume do açude e a vazão resultante. O tempo de residência aumenta durante o período de estiagem e diminui no período de chuvas. Considerando que, em média, o tempo de residência da água em rios é de 16 dias (Covich, 1993), pode-se assumir que o Castanhão assim como qualquer outro açude aumente o tempo de residência, que associado à diminuição da capacidade de transporte do rio favorece a deposição do MPS no açude. A deposição de MPS é uma importante questão para o manejo de reservatórios, pois esta carga depositada irá gradativamente assoreando o açude através da diminuição da profundidade e conseqüentemente este processo reduz a sua vida útil. O uso desordenado do solo e a intensificação dos processos de erosão aumenta o aporte de MPS para um açude aumentando as taxas de acumulação e diminuindo à vida útil.

Do mesmo modo, o transporte fluvial de nutrientes também foi alterado pelo barramento do rio Jaguaribe pelo Castanhão principalmente devido ao manejo da vazão realizada pelo açude e a redução das concentrações ao longo do açude observadas para P-total e NH_4^+ . Porém as concentrações médias de Si-D na entrada do açude (188 μM) estão dentro da faixa das concentrações para rios equatoriais e tropicais (163-179 μM) (Turner *et al.*, 2003; Jennerjahn *et al.*, 2006), enquanto que as concentrações na saída do açude (153 μM) se

apresentaram abaixo desta faixa, sugerindo uma influência da açudagem na redução nos teores de Si-D. Quando esta comparação é realizada com rios da costa leste do Brasil (Souza *et al.*, 2003, 2007), podemos observar que as concentrações de Si-D que entram no açude estão similares a ambientes fluviais com moderada regularização (~ 30%) das bacias de drenagem pela açudagem. Este cenário sugere que as concentrações de Si-D que entram no Castanhão pelo rio Jaguaribe já são modificadas pela açudagem a montante da bacia, sendo também reduzidas na saída do açude devido a influência do manejo de vazões do Castanhão (Tabela 4).

Do mesmo modo, as concentrações médias de PO_4^{3-} na entrada do Castanhão (0,99 μM) são similares às concentrações observadas em bacias regularizadas (30-90%) da costa leste do Brasil (0,84-0,88 μM) (Souza *et al.*, 2003, 2007) sugerindo, do mesmo modo, que o aporte fluvial do rio Jaguaribe para o Castanhão esteja deficiente de nutrientes devido à influência das barragens a montante, sendo reduzido no Castanhão devido a mudanças no regime de vazão visto que as concentrações não foram alteradas entre a entrada e saída do açude.

Por outro lado, mesmo com a regularização do fluxo fluvial a montante do açude Castanhão, as concentrações de algumas formas de nitrogênio inorgânico dissolvido como NH_4^+ na entrada do açude foram similar aos teores observados em rios não regularizados por barragens na costa leste do Brasil (Souza *et al.*, 2003, 2007). Este cenário pode estar associado à influência de fontes antrópicas (fertilizantes, esgoto doméstico, entre outros) que estão repondo o NID perdido nas barragens. Até 1998, na bacia de contribuição do Castanhão, de cerca de 50 cidades (665.652 habitantes) nenhuma delas era dotada de disposição adequada de esgotos, os quais eram lançados "in natura" no rio Jaguaribe, ou em seus tributários (Borges, 1998).

Outra forma de analisar a influência do Castanhão no transporte de nutrientes é através das razões atômicas entre sílica (Si-D), nitrogênio (NID) e fósforo (PID) dissolvidos (Tabela 12). Todos os nutrientes analisados apresentaram uma redução das concentrações entre a entrada e saída do açude, embora somente estas diferenças fossem estatisticamente significativas ($P < 0,05$) somente para PT e NH_4^+ . A razão atômica entre os nutrientes indica um enriquecimento do N e Si em relação ao P; e entre N em relação a Si, embora inferior à observada entre N:P. A análise das razões atômicas sugere que o açude esteja modificando principalmente a distribuição do P através da retenção deste nutriente pelos processos biogeoquímicos no açude (Tabela 11).

Tabela 11. Média (desvio padrão) da concentração (μM) e razões atômicas entre o N, P e Si dissolvidos na entrada e saída do açude Castanhão.

	Entrada (#1)	Meio (#2)	Saída (#3)
N	$10,2 \pm 1,2$	$8,7 \pm 1,2$	$8,5 \pm 0,7$
P	$0,99 \pm 3,1$	$0,35 \pm 0,9$	$0,35 \pm 1,3$
Si	188 ± 22	158 ± 23	153 ± 18
N:P	$10 \pm 3,1$	$25 \pm 1,3$	$24 \pm 3,7$
N:Si	$0,05 \pm 0,14$	$0,06 \pm 0,1$	$0,06 \pm 0,1$
Si:P	$189 \pm 3,1$	448 ± 26	$432 \pm 3,7$

O cenário descrito para o Castanhão é também relatado para outros reservatórios indicando que estes ambientes lacustres artificiais podem agir como um sumidouro nitrogênio e fósforo (Garnier *et al.*, 1999; Uhlman *et al.*, 1995; Uhlman & Horn, 1992). A capacidade de retenção pode variar sazonalmente dependendo das condições hidrológicas e das cargas de nutrientes. Especialmente para fósforo, os reservatórios podem reduzir a carga transportada pelos rios. Este efeito pode ser favorável em uma ambiente eutrófico e poluído, porém em ambientes oligotróficos a depleção do nutriente pode ocasionar mudanças na estrutura trófica dos ambientes a jusante.

A incorporação dos nutrientes pelo fitoplâncton e a deposição das células após a senescência nos sedimentos de fundo do açude é um processo frequentemente descrito para explicar a capacidade de retenção de nutrientes pelos reservatórios (Friedl & Wuest, 2002), embora este cenário dependa das condições intrínsecas de cada reservatório (McGinnis *et al.* 2006). A correlação inversa e significativa (Spearman) entre a concentração de clorofila *a* e Si-D ($r=-0,55$, $p<0,05$) e PO_4^{3-} ($r=-0,34$, $p<0,05$) sugere que a incorporação destes nutrientes pela comunidade fitoplanctônica pode ser um importante processo na retenção destes nutrientes no açude. Para NH_4^+ houve uma correlação positiva com este indicador de produção primária ($r=0,30$, $p<0,05$) sugerindo que a diminuição da concentração deste nutriente ao longo do açude pode estar associado a outros processos que não incorporação pelo fitoplâncton. Estas correlações devem ser analisadas com cautela, pois os parâmetros podem estar meramente correlacionados, não havendo nexos causais. Porém, estes resultados sugerem que a incorporação dos nutrientes pela comunidade fitoplanctônica seja um importante processo controlador do transporte e retenção de nutrientes ao longo do açude e devem ser analisados especificamente em estudos futuros.

7. CONCLUSÕES

Os balanços de massa mostram que o açude Castanhão e a rotina de operação da barragem invertem o funcionamento natural desta parte da bacia de drenagem. Devido à condição intermitente do rio Jaguaribe, no período de estiagem os fluxos fluviais são ausentes retornando com a chegada das chuvas. Atualmente, no período de estiagem a barragem pereniza a porção a jusante do rio induzindo a ocorrência do fluxo fluvial naturalmente ausente nesta época. Por outro lado, a barragem modula as vazões no período de chuvas entre 5 e 15 m³/s justamente no período de maior transporte fluvial onde a bacia de drenagem do rio Jaguaribe transferia em direção ao mar vazões que chegavam até 7.000 m³/s.

Segundo os dados apresentados, o açude Castanhão modifica o fluxo fluvial de água, MPS, fósforo total e amônia no rio Jaguaribe para a zona costeira incluindo a concentração e a carga. Para outros nutrientes como nitrogênio total, fosfato, sílica dissolvida, o fluxo foi modificado principalmente devido a redução do aporte de água, pois as concentrações ao longo do açude são estatisticamente similares. O fluxo hídrico é modificado pela rotina de operação da barragem, sendo o volume liberado relativo à necessidade das demandas das atividades a jusante da barragem. Teoricamente a água liberada pelo açude não chega à zona costeira fazendo com que a influência de 60% da bacia de drenagem do rio Jaguaribe no transporte de água para zona costeira se resuma à descarga liberada pela barragem e controlada segundo a rotina de operação da barragem.

A diminuição da capacidade de transporte do rio Jaguaribe favorece a deposição do MPS reduzindo a carga transportada à jusante que pode explicar os eventos de erosão costeira que ocorre no estuário do rio Jaguaribe. Esta diminuição na concentração e carga do MPS também ocasiona o aumento da transparência da coluna d'água que favorece condições para o aumento da produção primária fitoplanctônica que é o principal processo de redução e retenção do transporte de nutrientes no açude e na transferência para a zona costeira.

Como exemplificados na introdução deste trabalho à formação de reservatórios vem modificando intensamente vários aspectos ambientais das bacias de drenagem e de ecossistemas costeiros em todo o mundo. Apesar do cenário descrito, um dos poucos efeitos (senão o único) observados nos estuários e atribuídos a açudagem é o aumento nas áreas de manguezal “rio acima” em muitos estuários não só do Ceará, mas de toda região Nordeste (Maia et al., 2006). Como exemplo, pode-se analisar o estuário do Rio Pacoti que apresentou um aumento de 0,15 km² nas áreas de manguezal entre 1958 e 2004 devido à formação de bancos de areia ao longo do estuário que proporcionam áreas para a colonização pelas árvores

de mangue (Lacerda *et al.*, 2007). A formação de banco de areia ou o assoreamento dos estuários é inversamente proporcional à intensidade e frequência do fluxo fluvial, pois a descarga hídrica de um rio “expulsa” a areia acumulada nos estuários para os oceanos, principalmente em eventos de grande vazão fluvial. Hipoteticamente, este cenário de assoreamento está sendo induzido provavelmente pela diminuição da capacidade de transporte dos rios devido aos açudes. Embora não existam informações disponíveis, a redução do aporte de água pode aumentar a salinidade, assim como a extensão da influência da cunha salina ao longo de um estuário, sendo esta modificação um importante condicionante para a dispersão dos mangues.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ACCORNERO, A., MANNO, C., ARRIGO, K.R., MARTINI, A. & TUCCI, S. 2003. The vertical flux of particulate matter in the polynya of Terra Nova Bay. Part I. Chemical constituents. *Antarctic Science*, **15**, 119–132.

APHA. 1998. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20^aed., APHA/AWWA/WEF. Washington, CD room.

BORGES, C. 1998. A Face Oculta da Barragem do Castanhão. IMOPEC

BRZEZINSKI, M. A. 1985. The Si:C:N ratio of marine diatoms: Interspecific variability and the effect of some environmental variables. *J. Phycol.* **21**: 347–357.

COLLIER, R. AND J. EDMOND. 1984. The trace element geochemistry of marine biogenic particulate matter. *Progr. Oceanogr.* 13: 113-119.

COVICH, A.P. 1993. Water and ecosystems. In: *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Gleick, P.H. (ed.) Oxford University Press, Oxford, pp. 40-55.

COGERH & DNOCS, 2006. XII Seminário de alocação das águas dos vales do Jaguaribe e Banabuiú, Junho de 2006.

EKAU, W.; KNOPPERS, B.A. 1999. An Introduction to the pelagic system of the Northeast and East Brazilian Shelf. *Archive Of Fishery And Marine Research, Hamburg*, v. 47, n. 2, p. 113-132.

FLEMER, D.A.; CHAMP, M.A., 2006. What is the future fate of estuaries given nutrient over-enrichment, freshwater diversion and low flows? *Marine Pollution Bulletin* 52, 247-258.

FOSTER, S; CLOERN, J.E. 2007. Are estuaries as productive as we think? A comparative analysis of estuarine phytoplankton productivity. *Estuarine Research Federation Abstracts*, 65p.

FRIEDL G, TEODORU C, WEHRLI B. 2004. Is the Iron Gate I reservoir on the Danube River a sink for dissolved silica? *Biogeochemistry* 68: 21–32.

FRIEDL, G.; WÜEST, A., 2002. Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming. *Aquatic Sciences* 64, 55-65.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Gráficos de chuvas dos postos pluviométricos. Disponível em <http://www.funceme.br/DEPAM/index.html>, acessado em outubro de 2007.

GARNIER J., B. LEPORCQ, N. SANCHEZ AND X. PHILIPPON, 1999. Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France). *Biogeochemistry* 47: 119–146.

GONG G.C., CHANG J., CHIANG K.P., HSIUNG T.M., HUNG C.C., DUAN, S.W. & CODISPOTI L.A., 2006. Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Three George Dam. *Geophysical Research Letters* 33, 1-4.

GORNITZ, V., 2000. In *Sealevel Rise: History and consequences*, BC Douglas et al., Eds., Academic Press, San Diego, CA, pp. 97-119.

HARASHIMA A., KIMOTO T., WAKABAYASHI T. & TOSHIYASU T., 2006. Verification of the silica deficiency hypothesis base don biogeochemical trends in the aquatic continuum of lake Biwa-Yodo River-Seto Inland Sea, Japan. *Ambio* 35, 36-42.

P. HOLLIGAN AND H. DE BOOIS, Eds., *Land Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) Science Plan*, IGBP Report No. 25 (IGBP, Stockholm, 1993).

HOLLOWAY J. M. , DAHLGREN R. A., HANSEN†, B., CASEY, W.H. 1998. Contribution of bedrock nitrogen to high nitrate concentrations in streamwater. *Nature* 395: 785-788.

HUBAUX, A., VOX, G. 1970. Decision and detection limits for linear calibration curves. *Analytical Chemistry* 42, 849-855.

HUMBORG C, ITTEKKOT V, COCIASU A, BODUNGEN B. V., 1997. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature* 386: 385–388.

HUNGSPREUGS, M., UTOOMPRURKPORN, W. SOMPONGCHAIYAKUL, P., HEUNGRAKSA, W., 2002. Possible impact of dam reservoirs and river diversions on material fluxes to the Gulf of Thailand. *Marine Chemistry* 79, 185– 191.

ICOLD, 1984, 1988. World register of dams. 1984 full edition and 1988 updating. International Commission on large dam, Paris.

KNOPPERS, B.A.; EKAU, W.; FIGUEIREDO, A.G.; GOMES, A. S. 2002. Zona Costeira e Plataforma Continental do Brasil. In: Renato Crespo Pereira; Abílio Soares Gomes. (Org.). *Biologia Marinha*. 01 ed. Rio de Janeiro : Interciência, p. 353-361.

JENNERJAHN, T.; KNOPPERS, B.; SOUZA, W.F.L.; BRUNSKIL, G.J.; SILVA, E.I.L.; SENO, A., 2006. Factors controlling dissolved silica in tropical rivers. In: Ittekkot, V.; et al.(eds) *The silica cycle*. Island Press, Washington.

JIAO, N. et al., 2007. Ecological anomalies in the East China Sea: Impacts of the Three Gorges Dam? *Water Research* 41, 1287 – 1293.

LACERDA, L.D.; TELES, M.O.; MOLISANI, M.M. (2007) Changes in mangrove extension in the Pacoti River, Ceará State Northeastern Brazil due to regional environmental changes between 1958 and 2004. *Biota Neotropica*.7(3): 67-72.

LACERDA, L.D.; MOLISANI, M.M.; MAIA, L.P. (2008) Estimating the importance of natural and anthropogenic sources on N and P emission to estuaries along the Ceará State Coast Ne Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 141: 149-164.

LACERDA, L.D.; KREMER, H.H.; KJERFVE, B.; SALOMONS, W.; MARSHALL-CROSSLAND, J.I. & CROSSLAND, J.C. 2002. South American Basins: LOICZ Global Change Assessment and Synthesis of River Catchment – Coastal Sea Interaction and Human Dimensions. *LOICZ Reports & Studies*, 21: 1-6.

L'VOVICH, M.I. & WHITE, G.F.,1990. Use and transformation of terrestrial water systems. In: *The Earth as Transformed by Human Action*. Turner, BL; Clark, WC; Kates RW; Richard, JF; Mathews, JT; Meyer, WB (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 235-252.

LYTLE, D.A. & POFF, N.L. (2004) Adaptation to natural flow regime. *Trends in Ecology and Evolution* 19:94-100.

MAIA, L. P. ; LACERDA, L. D. ; MONTEIRO, L. H. U. ; SOUZA, G. M. E. . Atlas dos Manguezais do Nordeste; Avaliação das Áreas de Manguezal dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Fortaleza: Superintendência Estadual do Meio Ambiente, 2006. v. 1. 125 p.

MARTIN, J. H., G. A. KNAUER. 1973. The elemental composition of plankton. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37: 1939-1653.

MARQUES, M.; COSTA, M.; MAYORGA, M I; PINHEIRO, P.R.C. (2004) Water Environments: Anthropogenic Pressures and Ecosystem Changes in the Atlantic Drainage Basins of Brazil. *Ambio* 33 (1-2): 68-77.

MARTINS, E.S. Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil, 2007. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 969-976.

MCGINNIS, DF; BOCANIOV, S.; TEODORU, C.; FRIEDL, G.; LORKE, A.; WUEST, A., 2006. Sílica retention in the iron Gate reservoir on the Danube River: The role of side bays as nutrient sinks. *River Research and Applications* 22, 441-456.

MILLMAM, LD, 1997. Blessed dams or damned dams? *Nature* 386, 325-327.

MOLISANI, MM; KJERFVE, D; LACERDA, LD., 2006a. Water discharge and sediment load from na anthropogenicaly-altered drainage basin. *Journal of Hydrology* 331,425-433.

MOLISANI, MM; CRUZ, ALV; MAIA, LP., 2006b. Estimativa da descarga fluvial para estuários do Estado do Ceará, Brasil. *Arquivos de Ciências do Mar* 39, 53-60.

MOLISANI, MM; KJERFVE, B; LACERDA, L.D., 2007a. Land-sea mercury transport through a modified watershed. *Water Research* 41, 1929-1938.

MOLISANI, M.M., MONTE, T.M., VASCONCELOS, G.H., FARIAS, E.G.G. (2007b) Impacto da açudagem no transporte fluvial para estuários do Estado do Ceará, Brasil. *Anais do XII Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar - Colacmar, Florianópolis, SC*, 395p.

NIXON S. W., 1992. Quantifying the Relationship Between Nitrogen Input and the Productivity of Marine Ecosystems. *Proceedings of the advanced Marine Technical Conference*, 5: 57-83.

ODUM, E.P. 1983. *Ecologia*. Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.

PERH (1992) Plano estadual de recursos hídricos. Secretaria de Recursos Hídricos SRH, Governo do Estado do Ceará, Fortaleza, Ceará.

PONTEE, NI, WHITEHEAD, PA, HAYES, CM., 2004. The effect of freshwater flow on siltation in the Humber Estuary, north east UK. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 60, 241-249.

REDFIELD A.C., (1958) The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist* 46:205.

SCHONE, B.R., FLESSA, K.W., DETTMAN, D.L., GOODWIN, D.H., 2006. Upstream dams and downstream clams: growth rates of bivalve mollusks unveil impact of river management on estuarine ecosystems (Colorado River Delta, Mexico) *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58, 715–726.

S. P. SEITZINGER; J. A. HARRISON; E DUMONT; A H. W. BEUSEN; A. F. BOUWMAN
2005 Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: An overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application. GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES, 19:1-11.

SEMACE/ LABOMAR, 2006. Zoneamento Ecológico e Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará, 147p.

SOUZA, W.F.L., KNOPPERS, B.A., BALZER, W., LEIPE, T. (2003) Geoquímica e fluxos de nutrientes, ferro e manganês para a costa leste do Brasil. *Geochimica Brasiliensis* 17: 130-144.

SOUZA, W.F.L.; MEDEIROS, P.R.P.; KNOPPERS, B., 2007. O comportamento da sílica dissolvida em rios e estuários da costa leste do Brasil. *Anais do XII Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar - XII COLACMAR*.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Atlas eletrônico dos recursos hídricos e meteorológicos do Estado do Ceará. Disponível em <http://www25.ceara.gov.br/redirecionador.asp?pagina=http://atlas.srh.ce.gov.br/acudesestado.asp> acessado em outubro de 2007.

SUDENE (1990) Dados pluviométricos mensais do Nordeste, Ceará.

SUNDA W. G. and S. A. HUNTSMAN. 1995a. Regulation of copper concentrations in the ocean's nutricline by phytoplankton uptake and regeneration cycles. *Limnology and Oceanography* 40: 132-137.

TEODORU, C. & WEHRLI, B. (2005) Retention of sediment and nutrients in the Iron gate reservoir on the Danube river. *Biogeochemistry* 76, 539-565.

TURNER, R.E.; RABALAIS, N.N.; JUSTIC, D.; DORTCH, Q. 2003 Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers. *Biogeochemistry* 64: 297-317.

UHLMANN D. AND H. HORN, 1992. The significance of sedimentation and sediments to phytoplankton growth in drinking-water reservoirs. In: D. W. Sutcliffe and J. G. Jones (eds.), *Eutrophication: research and application to water supply*, Freshwater Biological Association, 94–106.

UHLMANN D., M. HUPFER AND L. PAUL, 1995. Longitudinal gradients in the chemical and microbial composition of the bottom sediment in a channel reservoir (Saidenbach, Saxony). *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 80: 15–25.

VER, L. M. B.; MACKENZIE, F. T. & LERMAN, A. 1999. Carbon cycle in the coastal zone: effects of global perturbations and change in the past three centuries. *Chemical Geology*, 159: 283-304.

VÖRÖSMARTY, C. J., K. P. SHARMA, B. M. FEKETE, A. H. COPELAND, J. HOLDEN, J. MARBLE and J. A. LOUGH, 1997. The storage and naging of continental runoff in large reservoirs systems of the world. *Ambio* 26, 210-219.

WCD, 2000. *Dams and Development, a new framework for decision-making*. The report of the World Comission on Dams. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling, VA.