

A Simple Mathematical Model to Study the Mixture Processes in a northeast River Basin

E.H. Alcântara
Divisão de Sensoriamento Remoto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
enner@dsr.inpe.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os processos de mistura no sistema estuarino do Rio Peraiá (Maranhão State, Brazil) e zonar o sistema através da classificação de Kjerfve (1987). Foi utilizado o modelo matemático de Dyer e Taylor (1973), para analisar os processos de mistura. Para obtenção dos objetivos, a batimetria do sistema estuarino foi levantada, e com a mesma foram delimitados os limites atingidos pelas marés alta e baixa. Foram analisados, num padrão unidimensional: as salinidades e as concentrações e/ou frações de água doce nas marés alta e baixa; as taxas e os tempos de descarga; e os volumes de água doce retidos no estuário nas estofas de enchente e vazante. Foram obtidos os seguintes resultados: o volume de água no sistema possui um máximo de $64,96 * 10^6 \text{ m}^3$ e um mínimo $0,12 * 10^6 \text{ m}^3$; o prisma de maré possui máximo $7,1 * 10^6 \text{ m}^3$ e mínimo de $0,045 * 10^6 \text{ m}^3$; a concentração de água doce foi maior na maré baixa ($0,99 * 10^6 \text{ m}^3$) do que na alta ($0,91 * 10^6 \text{ m}^3$); a concentração de sal foi sempre maior na maré alta do que na baixa, sendo o valor máximo de 34 ups e o mínimo de 0,34 ups; quanto ao volume de água retido nas estofas de maré baixa e alta, foi maior na estofa de vazante ($5,36 * 10^6 \text{ m}^3$) do que na de enchente ($1,12 * 10^6 \text{ m}^3$); finalmente, os tempos de descarga apresentaram maior valor na maré alta (2 períodos de maré) e menor na maré baixa (1,24 períodos de maré). O estudo permite concluir que a salinidade e a descarga de água doce no sistema estuarino do Rio Peraiá são os fatores dominantes nos processos de mistura do mesmo.

Palavras-chave: salinidade, tempo de descarga, processos de mistura, análise unidimensional, estuários, Rio Peraiá (MA).

ABSTRACT

The objective of present work is to analyze the processes of mixture in the estuarine system of the Peraiá River (Estado do Maranhão, Brazil) and to classify the system into zones following Kjerfve (1987). The mathematical model of Dyer and Taylor (1973) was used in order to analyze the mixture processes. To attain the objectives, the bathymetry of the estuarine system was obtained, allowing to define the limits of high and low tides. The one-dimension analysis considered: salinity and the water concentration and/or fresh water fraction, in high and low tides; the rates and times of discharges; and the volumes of fresh water restrained in the estuary in high and low water slacks. The following results were obtained: the water volume in the system has maximum of $64,96 * 10^6 \text{ m}^3$ and minimum of $0,12 * 10^6 \text{ m}^3$; the tidal prism has maximum of $7,1 * 10^6 \text{ m}^3$ and minimum of $0,045 * 10^6 \text{ m}^3$; the fresh water concentration was higher in low tide ($0,99 * 10^6 \text{ m}^3$) than in high tide ($0,91 * 10^6 \text{ m}^3$); the salt concentration was always larger in high than in low tides, having maximum of 34 ups and minimum of 0,34 ups; regarding the water volume restrained in the low and high water slacks, it was larger in the ebbing ($5,36 * 10^6 \text{ m}^3$) than flooding ($1,12 * 10^6 \text{ m}^3$); and finally, the discharge times presented larger values in high tides (2 tidal periods) and smaller in low tides (1.2 tidal periods). The study allows to conclude that the salinity and fresh water discharge in the estuarine system of Peraiá River are the dominant factors in the processes of mixture.

Key words: salinity, time of discharge, mixture processes, one-dimensional analysis, estuaries, Peraiá River (MA).

INTRODUÇÃO

Um estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado com interligação livre com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce originada da drenagem continental (Cameron & Pritchard, 1963; Pritchard, 1967; Bonetti Filho & Miranda, 1997). Dessa definição, parte a grande importância da água doce nesse ambiente costeiro que, ao diluir a água do mar, fica armazenada no seu interior, gerando a componente baroclínica da força de gradiente de pressão. A presença de água mais densa na foz do estuário faz do mesmo um sistema que bombeia constantemente água salgada para o seu interior.

Nos sistemas estuarinos, os processos de mistura, circulação e estratificação são governados basicamente por três forçantes: a descarga de água doce, as correntes de maré e a transferência de *momentum* através do cisalhamento do vento na superfície livre; a estas forçantes somam-se as influências exercidas pela geometria do corpo estuarino, bem como a salinidade e os padrões de circulação da região costeira adjacente (Kjerfve, 1990; Miranda, 1996). Estes forçantes condicionam a circulação gravitacional (baroclínica e barotrópica), a circulação residual e as correntes geradas pelo vento. Geralmente um destes padrões de circulação predomina num determinado sistema estuarino, entretanto dois ou os três tipos podem ser observados simultaneamente ou sazonalmente em um mesmo estuário (Kjerfve, 1990).

Alguns estudos sobre a influência da entrada de água doce em estuários e na correspondente distribuição da salinidade utilizaram teorias empíricas (Ketchum, 1951; Dyer e Taylo, 1973), ou modelos simples de caixa (Robinson, 1983; Miller e McPherson, 1991). Desde duas décadas atrás, modelos computacionais sofisticados são utilizados para estudar a hidrodinâmica e a distribuição da salinidade em vários estuários (Perrels e Karelse, 1981; Uncles e Stephens, 1990). Os modelos hidrodinâmicos tem sido utilizados para prever correntes e a dispersão de substâncias, para a análise de qualidade de água (Blumberg e Pritchard, 1997). Simulações bem realizadas da hidrodinâmica e dos processos de transporte da salinidade tem ajudado a entender, por exemplo, a dinâmica de nutrientes (Vorosmarty e Loder, 1994), processos de transporte de organismos larvais (Shen et al., 1999), e o crescimento de algas marinhas em estuários (Sheng *et al.*, 2001).

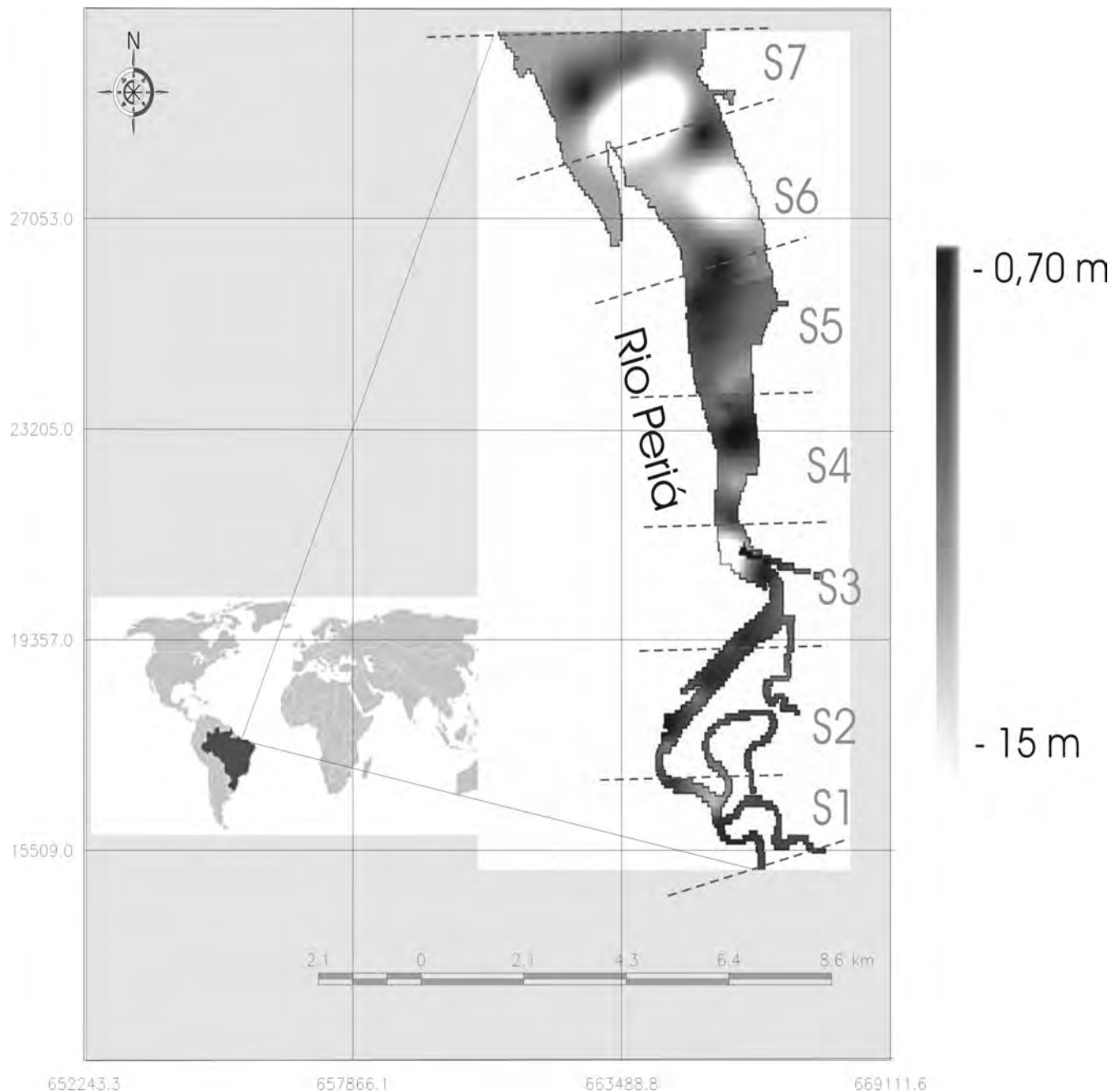


Figura 1: Localização do sistema estuarino do Rio Peria, com dados de batimetria (metros) e mostrando a segmentação (S) do sistema estuarino do Rio Peria (MA).

O presente trabalho tem por objetivo introduzir as discussões sobre os processos de mistura no sistema estuário do rio Peria, aplicando o modelo matemático unidimensional de Dyer e Taylor (1973), além de estabelecer um zoneamento que limite as zonas existentes no sistema. A pesar de ser um método simplificado, pode gerar resultados preliminares sobre o funcionamento do sistema

(com a determinação da distribuição longitudinal de salinidade, distribuição de fração água doce nas marés baixa e alta, e o volume de água doce nas marés baixa e alta), além de permitir a estimativa da concentração de poluentes conservativos. A influência da entrada de água doce no sistema estuarino precisa ser quantificada, pois muitas espécies ambientes sobrevivem somente um certo intervalo de valores de salinidade. Por exemplo, animais bentônicos de água doce sobrevivem em ambientes oligohalinos (baixa salinidade) por um curto período de tempo, mas morrem se expostos a água do mar (Day *et. al.*, 1989; Chen, 2001).

O Rio Peria, que constitui objeto de estudo, se localiza na porção oriental do Estado do Maranhão, possui uma extensão da ordem de 70 Km e uma bacia com 5.000 Km² (figura 1). Como característica principal da hidrodinâmica na foz do sistema estuarino, o Rio Peria possui uma amplitude de maré na sua foz em torno de 180 cm, com uma fase de 259° (Harari *et al*, 1995; Pereira e Harari, 1995). O rio principal (Peria), possui uma profundidade média de 3,56 m, mínima de 0,30 m e máxima de 15 m (na foz). O sistema possui uma salinidade média da ordem de 18 ups, máxima de 31 ups e mínima de 7 ups) (figura 2).

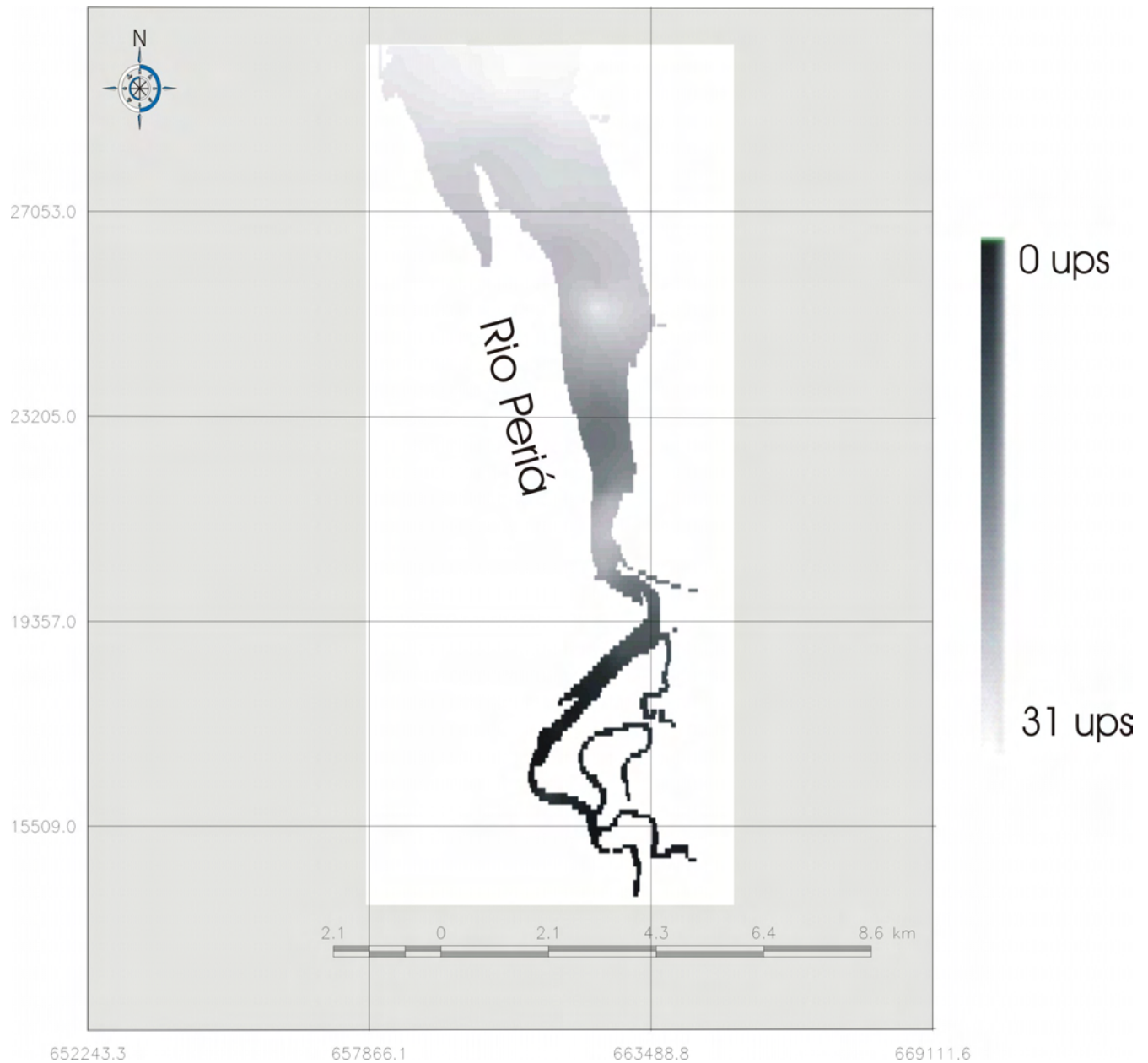


Figura 2: Salinidade do Estuário durante a maré cheia.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada é essencialmente semi-empírica. Dessa forma, o estuário será considerado unidimensional e a salinidade (ou a água doce) será utilizada como traçador em condições estacionárias. A geometria, a descarga fluvial, a altura da maré e a salinidade da região oceânica adjacente (So) consideradas como condições de contorno, serão dados (conhecidos) do problema.

A distribuição longitudinal da salinidade e o tempo de descarga (*flushing time*) - indicadores da capacidade de variação da concentração de substâncias do estuário - serão calculados com base nos princípios da conservação de sal e do volume. A quantidade S_0 é o valor não diluído da salinidade da região costeira adjacente que, devido aos processos difusivo e advectivo que ocorrem na plataforma continental, apresenta lenta variação sazonal (Dyer e Taylor, 1973). Essa componente (S_0) foi medida em campo, possuindo o valor de 34 unidades padrão de salinidade (ups).

Para alcançar os objetivos do trabalho, a seguinte estrutura metodológica será seguida:

- descrição da batimetria e divisão do sistema estuarino em segmentos;
- cálculo da vazão fluvial;
- modelagem dos processos de: mistura;
 - balanço de água doce no sistema;
 - balanço de sal no sistema;
 - volume de água doce;
 - tempo de descarga;
 - zoneamento do sistema.

Batimetria e Divisão do sistema estuarino em segmentos

O levantamento batimétrico do sistema estuarino do Rio Peraiá (MA) foi realizado no dia 8 de agosto de 2003, utilizando um barco a motor e uma corda (com 40 m de comprimento) graduada (de 10 em 10 cm), tendo em sua extremidade um peso fixo. Todos os pontos amostrados foram geo-referenciados em sistema UTM (*Universal Transversal de Mercator*) WGS84, utilizando um GPS (*Global Positioning System*) (figura 1). Foram amostrados 100 pontos, sendo que as medidas de profundidade foram realizadas somente ao longo do canal principal do rio, sendo amostradas de uma extremidade a outra do rio, com o objetivo de capturar diferenças de profundidades que fossem capazes de caracterizar a batimetria ao longo do canal.

Para se adequar ao modelo de Dyer e Taylor (1973), o canal principal do rio foi dividido em 7 segmentos de 10 km cada (sentido montante jusante), sendo que o rio possui uma extensão total de 70 km. A segmentação do rio em 7 partes teve como princípio a salinidade. Cada segmento tem cerca de 4,3 (ups) de diferença do segmento adjacente (figura 2). Essa segmentação também

possui o objetivo de avaliar até que distância da foz do rio a maré é capaz de se propagar, no sentido montante.

Vazão fluvial (Q_f)

A descarga fluvial representa o transporte de um volume de água doce em um sistema estuarino. Essa propriedade possui um valor que deve ser mensurado a partir de monitoramento (*in situ*) em pontos específicos do rio localizados estuário acima, de preferência longe da influência da maré, por meio de medidas linimétricas da altura do nível d'água. Bonetti Filho e Miranda (1997), apresentam uma metodologia que permite estimar essa quantidade física através de equações semi-empíricas. Esse tipo de abordagem permite que em rios onde não haja estações fluviométricas seja possível realizar os estudos desejados. Como o Rio Peria, objeto de estudo nesse artigo, não possui estações linimétricas, será seguida a metodologia descrita em Bonetti Filho e Miranda (1997). A vazão fluvial será calculada pela equação 1.

$$Q_f = \frac{\Delta f}{\Delta t} * A_r \quad (1)$$

Onde Q_f é a vazão fluvial; A_r é a área da bacia de drenagem; Δt é o intervalo de tempo e Δf é o escoamento superficial. No sistema Internacional de Unidades (SI), Δf e A_r devem ser calculados respectivamente em m e m^2 , e Δt em s, para que a descarga fluvial Q_f seja dada em m^3s^{-1} .

Modelos de Mistura Simplificados

O modelo a ser utilizado é um modelo simplificado, adaptado por Dyer & Taylor (1973). Esse modelo segue uma teoria semi-empírica da mistura entre massas de água (das descargas fluvial e do mar) em segmentos ao longo do canal estuarino (figura 3). Essa teoria permite a estimativa da distribuição unidimensional da fração de água doce, da salinidade média ao longo do estuário e do tempo de descarga. A água doce é utilizada como indicador e o modelo adotado pode ser facilmente adaptado para incluir estimativas da variação unidimensional da concentração de qualquer substância conservativa dissolvida na zona de maré. Ao longo do texto as letras *H* e *L* serão constantemente citadas, para indicar as marés alta e baixa, respectivamente.

O modelo assume as seguintes hipóteses:

- condição estacionária de salinidade ($\frac{\partial s}{\partial t} = 0$);
- mistura completa entre a água doce e a água do mar na enchente e na vazante;
- a salinidade da região costeira tem uma lenta variação com o tempo ($S_o = Cte$).

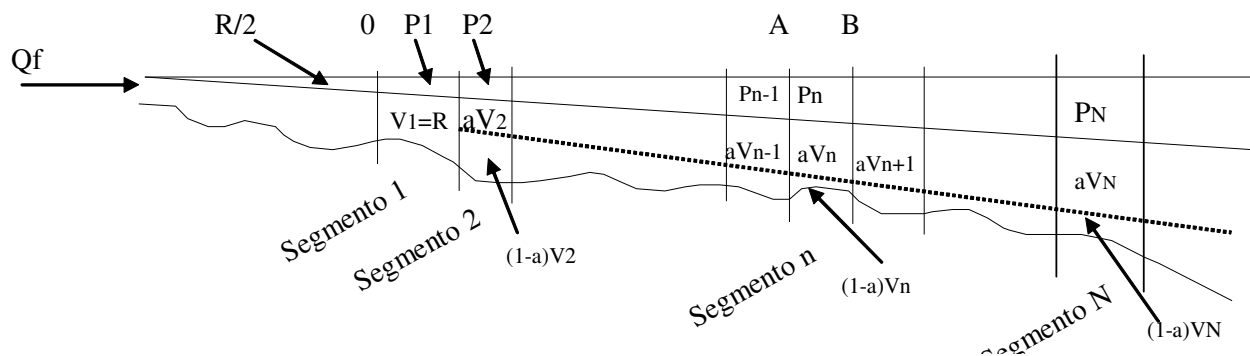


Figura 3: Modelo hipotético da metodologia de Dyer e Taylor (1973). P_n e V_n denotam os volumes do prisma de maré e de maré baixa de um segmento genérico n (a é o parâmetro de mistura), $(1-a)V_n$ é o volume na maré baixa disponível para mistura na maré alta, R é o volume de água fluvial descarregado no estuário durante um período de maré ($T = 43082$ segundos para maré semi-diurna), A e B são segmentos hipotéticos.

A figura 3 é apenas um modelo teórico de como a metodologia de Dyer e Taylor (1973), e está organizada para modelar a circulação de forma unidimensional em um estuário hipotético. O segmento 0 da figura 3 é a região do estuário cujo prisma de maré (P) é igual ao volume de água doce descarregado durante um ciclo completo de maré. Nesse segmento, de acordo com a teoria de

Dyer e Taylor (1973), não há troca de água durante a maré enchente no limite do segmento, e a oscilação da superfície livre é totalmente gerada pela descarga fluvial. Em consequência, a salinidade desse segmento é igual a zero e a fração correspondente de água doce é igual a um. No presente trabalho se adota a nomenclatura de “segmento um”, em vez de considerar o “segmento zero”. Então, onde houver menção de segmento zero (do modelo de Dyer e Taylor), equivalerá ao segmento um do presente modelo.

Os volumes dos segmentos do canal estuarino se compõem de volumes de maré baixa (V_n^L), aos quais na maré alta são adicionados os volumes correspondentes do prisma de maré (P_n). Os volumes na maré alta (V_n^H), nesses segmentos, são iguais a ($V_n + P_n$). Os índices $n= 0,1,2...N$ indicam os segmentos localizados ao longo do estuário, desde o segmento 0 (com salinidade 0), até o segmento N localizado na boca do estuário, este último com salinidade igual à da região costeira adjacente. Para o valor de a (parâmetro de mistura), apesar de variar entre 0 e 1, será utilizado o valor 0,8, como foi adotado por Dyer e Taylor (1973).

Balço de água doce na maré alta

Considerando-se um segmento n , assume-se, de acordo com o processo de segmentação, que na maré enchente o volume de água $aV_{n+1} = aV_{n+1}P_n$ mistura-se completamente com o volume $(1-a)V_n$ disponível na maré baixa para mistura. Logo, pelo princípio da conservação de volume, através da seção B desse segmento de controle (figura 3), tem-se o seguinte balanço de água doce (equação 2):

$$(V_n + P_n)C_n^H = aV_{n+1}C_{n+1}^L + (1-a)V_nC_n^L, n \geq 2$$

(2)

Onde: (V_n) é o volume em maré baixa no segmento genérico n ; P_n é o prisma de maré no segmento genérico; (C_n^H) e (C_n^L) são as concentrações de água doce nas marés alta e baixa, respectivamente, no segmento genérico; e a é o parâmetro de mistura.

Balanço de água doce na maré baixa

Fixando a atenção sobre o segmento (n), na maré vazante o movimento é do segmento adjacente (n-1) para o segmento n através da seção A (figura 3). Portanto, o volume de água $(aV_n + R)$, com a concentração C_{n-1}^H , mistura-se com o volume $(1-a)V_n - R$, com a concentração C_n^H , que permaneceu no segmento n na maré baixa. Com esse procedimento se assume que o volume adicional de água igual a R é proveniente do volume de água $(1-a)V_{n-1}$. Logo, para estabelecer a conservação de volume, segue-se a equação 3:

$$V_n C_n^L = (aV_n + R)C_{n-1}^H + [(1-a)V_n - R]C_n^H, n \geq 2$$

(3)

Onde V_n é o volume em maré baixa em segmento genérico n; P_n é o prisma de maré no segmento; C_n^H e C_n^L são as concentrações de água doce nas marés alta e baixa, respectivamente, no segmento n; a é o parâmetro de mistura e R é o volume de água fluvial descarregado no estuário durante um período de maré ($T = 43082$ s para a maré semi-diurna).

Balanço de Sal nas marés alta e baixa

Com os resultados das concentrações de água doce nas condições de marés alta e baixa do segmento genérico n, e a definição dessas quantidades em função da salinidade, se consideram as seguintes expressões para calcular mais duas incógnitas do problema, que são as salinidades nas marés alta (equação 4) e baixa (equação 5):

$$S_n^H = S_o(1 - C_n^H), \text{ para maré alta,}$$

(4)

e

$$S_n^L = S_o(1 - C_n^L), \text{ para maré baixa,}$$

(5)

Onde: S_n^H e S_n^L são as salinidades nas marés alta e baixa no segmento n; S_0 é a salinidade da região costeira adjacente; e C_n^H e C_n^L são as concentrações de água doce nas marés alta e baixa, respectivamente, no segmento n.

Volumes de água doce retidos no estuário nas estofas de enchente (V_{fn}^H) e vazante (V_{fn}^L)

De forma semelhante à salinidade, os volumes de água doce retidos no estuário, nas estofas de enchente e vazante, podem ser calculados com o conhecimento dos volumes geométricos nas marés alta (equação 6) e baixa (equação 7):

$$V_{fn}^H = C_n^H (V_n + P_n), \quad (6)$$

e

$$V_{fn}^L = C_n^L (V_n + P_n) \quad (7)$$

Onde: V_{fn}^H e V_{fn}^L são os volumes de água doce retidos no estuário nas estofas de enchente e vazante, respectivamente; C_n^H e C_n^L são as concentrações de água doce nas marés alta e baixa, respectivamente, em segmento genérico; e V_n é o volume em maré baixa no segmento n.

Tempos de Descarga

Os tempos de descarga, que são funções dos volumes de água doce nas marés alta (equação 8) e baixa (equação 9), podem ser calculados por:

$$t_{qn}^H = \frac{V_{fn}^H}{Qf} \quad (8)$$

e

$$t_{qn}^L = \frac{V_{fn}^L}{Qf} \quad (9)$$

Onde: t_{qn}^H e t_{qn}^L são os tempos de descarga na maré alta e baixa respectivamente; e V_{fn}^H e V_{fn}^L são os volumes de água doce retidos no estuário, nas estofas de enchente e vazante, respectivamente.

Zoneamento do Estuário

O zoneamento do estuário tem por objetivo classificar o mesmo em relação as suas características de circulação e mistura, as quais possuem características importantes para o funcionamento do sistema. Para tanto será utilizada a classificação de Kjerfve (1987):

- Zona de maré do rio (ZR) → parte fluvial com salinidade praticamente igual a zero, mas ainda sujeita à influência da maré;
- Zona de mistura (ZM) → região onde ocorre a mistura da água doce da drenagem continental com a água do mar;
- Zona costeira (ZC) → região costeira adjacente, que se estende até a frente da pluma estuarina que delimita a Camada Limite Costeira (CLC).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na análise unidimensional dos processos de mistura no estuário do Rio Peria estão sumarizados na Tabela 1. Como a metodologia estuda o sistema em segmentos, os resultados também serão apresentados como tal.

O volume de água no sistema (V_n), obtido pela equação 2, possui um máximo de $64,96 * 10^6 \text{ m}^3$ (segmento 7) e um mínimo $0,12 * 10^6 \text{ m}^3$ (segmento 1), um resultado coerente, uma vez que o segmento 7 está localizado na foz do sistema e o segmento 1 está localizado a montante. O prisma de maré P_n , fornecido pela equação 3, possui máximo de $7,1 * 10^6 \text{ m}^3$ (segmento 6) e mínimo no segmento 1 de, $0,045 * 10^6 \text{ m}^3$. As concentrações de água doce, calculadas através das equações 6 e 7 foram maiores na maré baixa ($0,99 * 10^6 \text{ m}^3$) do que na alta ($0,91 * 10^6 \text{ m}^3$). As concentrações de sal (S_n^L e S_n^H), obtidas através das equações 4 e 5, foram maiores na maré alta (32,3 ups) do que na baixa (22,1 ups), embora os dois valores calculados (para as marés alta e baixa) apresentem no segmento 7 a mesma salinidade (34 ups). Os volumes de água retidos nas estofas de maré baixa e alta (V_{fn}^L e V_{fn}^H), obtidos pelas equações 6 e 7, foram maiores na estofa de vazante ($5,36 * 10^6 \text{ m}^3$) do que na de enchente ($1,12 * 10^6 \text{ m}^3$). Os tempos de descarga t_{qn}^L e t_{qn}^H , calculados pelas equações 8 e 9, foram maiores na maré alta (2,0 em períodos de maré) e menores na maré baixa (1,24 em períodos de maré).

Tabela 1: Resultados obtidos com a aplicação do método de Dayer & Taylor (1973) para o sistema estuarino do Rio Peraiá (MA). Salinidades S_n^L e S_n^H em ups e t_{qn}^H em períodos de maré (para $T = 43082$ s). Com $R = 17,6 \times 10^6 \text{ m}^3$, $a = 0,8$ e $S_o = 34,0$ (ups) e volumes em unidades de 10^6 m^3 .

Segmentos	Vn	Pn	aVn	C_n^L	C_n^H	S_n^L	S_n^H	V_{fn}^H	V_{fn}^L	t_{qn}^H/T	t_{qn}^L/T
S1	0,120	0,045	0,096	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
S2	0,266	0,095	0,212	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
S3	0,420	0,20	0,336	1,0	1,0	0,00	0,00	0,62	0,42	3,5	9,74
S4	0,80	0,375	0,64	0,99	0,91	0,34	3,06	1,06	0,79	2,48	1,83
S5	1,16	0,540	0,928	0,68	0,40	10,88	20,4	0,68	0,78	1,57	1,81
S6	15,33	7,1	12,28	0,35	0,05	22,1	32,3	1,12	5,36	2,00	1,24
S7	64,96	-----	51,96	0,00	0,00	34	34	-----	-----	-----	-----

Vazão fluvial (Qf)

Utilizando a metodologia apresentada por Bonetti Filho e Miranda (1997), considerando uma pluviometria média da ordem de 1800 mm ano^{-1} e uma temperatura média de $28,5 \text{ }^\circ\text{C}$, e utilizando a equação 1, foi possível calcular a vazão fluvial média do rio Peraiá, que é da ordem de $409 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Balço de água doce nas marés alta e baixa

Em relação ao balanço de água doce de todo o sistema, para a maré baixa o volume total de água doce no sistema do Rio Peraiá é da ordem de $3,02 \times 10^6 \text{ m}^3$ e para a maré alta $2,36 \times 10^6 \text{ m}^3$. Observando a figura 5, há um recuo da fração de água doce do segmento 7 ao 5 para a maré alta.

Isto ocorre porque a maré exerce uma pressão contra a fração de água doce do sistema, fazendo com que essa fração seja uma parte misturada com a água do mar adjacente e outra parte seja “empurrada” para montante.

A influência da pressão da maré contra a fração de água doce no sistema percorre algo em torno de 10 km, na maré cheia. No entanto, também é possível notar que, em termos de volume, não ocorre perda, e sim uma redistribuição do volume de água doce no sistema, seguindo o princípio da conservação do volume.

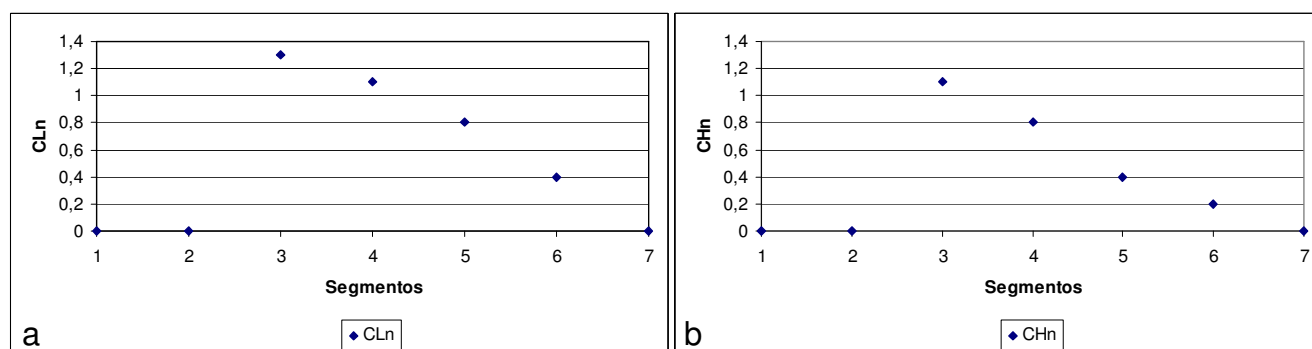


Figura 5: Frações de água doce nas marés baixa (a) e alta (b) (10^6m^3) por segmentos, respectivamente.

Balço de Sal nas marés alta e baixa

Para o balanço de sal na maré baixa, a salinidade diminui da foz até cerca de 30 km a montante; já na maré enchente, ocorre um aumento considerável da salinidade da foz até cerca de 40 km a montante (figura 6). A concentração de sal na maré baixa apresenta comportamento linear, a partir do segmento 4 (onde a influência da maré começa a ser mais pronunciada). Para a maré alta, o comportamento da concentração de sal se assemelha a uma senoide, acompanhando a intrusão salina.

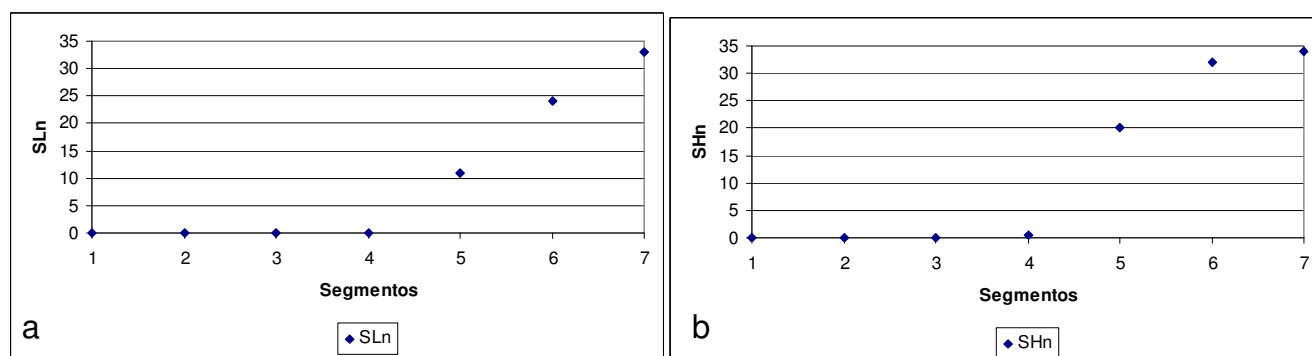


Figura 6: Concentrações da salinidade (ups) nas marés baixa (a) e alta (b) por segmentos, respectivamente.

Devido ao aumento da salinidade estuário abaixo, o gradiente horizontal de densidade gera o componente baroclínico do gradiente horizontal de pressão. O componente barotrópico forçado pela maré, associado ao componente baroclínico e à descarga fluvial, intensifica os movimentos no estuário, movendo ciclicamente a massa d'água estuarina e intensificando os processos de mistura (advecção e difusão turbulenta).

Volumes de água doce retidos no estuário nas estofas de enchente (V_{fn}^H) e vazante (V_{fn}^L)

No tocante ao volume de água doce retido no sistema do Rio Peria, na maré baixa há um maior volume retido de água doce do que na maré alta (figura 7). Ocorre uma grande retenção de volume de água doce na maré baixa para os seguimentos 5 a 7, com um pico no segmento 6. Isso ocorre possivelmente pela baixa de pressão, quando da retirada do volume da maré, fazendo com que o volume de água doce que estava a montante siga para jusante.

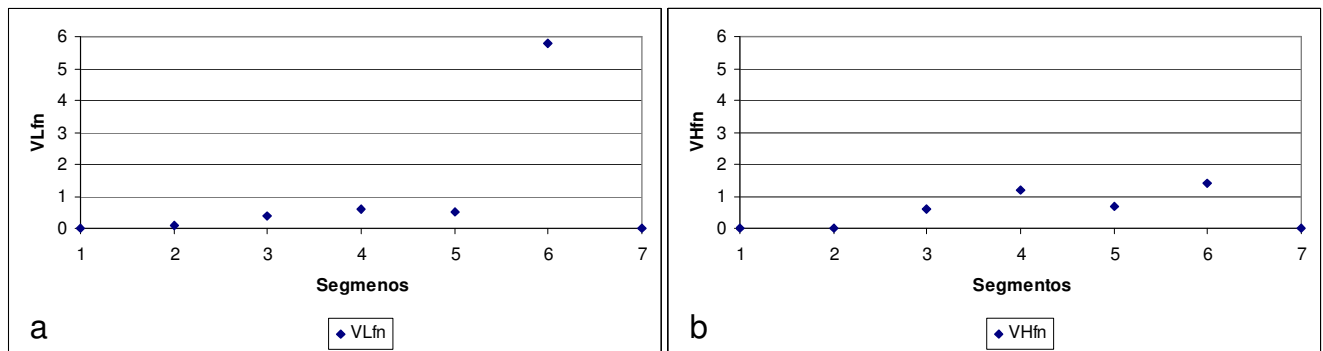


Figura 7: Volumes de água doce disponíveis nas estofas de maré baixa (a) e maré alta (b) (10^6m^3) por segmentos, respectivamente.

Tempos de Descarga

Quanto aos tempos de descarga (figura 8), para a maré enchente os volumes demoram mais para serem renovados do que na maré vazante. Isso vem reforçar a conclusão que na maré vazante ocorre renovação de grande quantidade de volume de água doce. E que, na maré baixa, os segmentos entre 2 e 4 apresentam tempos de descarga altos, o que quer dizer que, na zona fluvial, a renovação não é tão alta quanto a renovação do segmento 4 em diante. Isso se deve provavelmente à pouca energia da zona fluvial do rio.

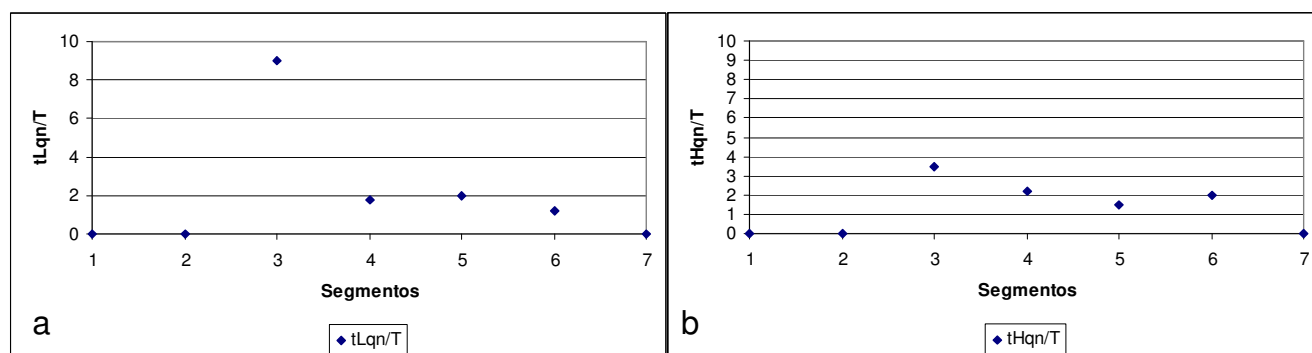


Figura 8: Tempos de descarga em períodos de maré, nas marés baixa (a) e alta (b), respectivamente (em períodos da principal maré semidiurna lunar).

Zoneamento do estuário

Os processos de mistura no sistema em estudo são dominados pela descarga de água doce proveniente da bacia de drenagem e pela salinidade, os quais são responsáveis pelas diferenças de densidade entre as massas de água do estuário. Assim, o sistema estuarino do Rio Peria apresenta 3 zonas, conforme Kjerfve (1987): zona de maré do rio (ZR), correspondente aos segmentos **1 a 04** (parte fluvial com salinidade praticamente igual a zero, mas ainda sujeita à influência da maré); zona de mistura (ZM), representada pelos segmentos **05 e 06** (região onde ocorre a mistura da água doce da drenagem continental com a água do mar); e a zona costeira (ZC), que corresponde ao segmento **7** do modelo (região costeira adjacente que se entende até a frente da pluma estuarina que delimita a Camada Limite Costeira).

CONCLUSÃO

Dada a simplicidade do modelo utilizado frente ao dinamismo e complexidade de sistemas estuarinos, os resultados obtidos neste trabalho devem ser vistos como uma introdução ao estudo

dos processos de mistura e circulação no estuário do Rio Peraiá. Os componentes salinidade e descarga fluvial foram os que mais influenciaram os processos de mistura do sistema; a descarga fluvial influencia também na distribuição longitudinal da salinidade no sistema Peraiá.

Um aumento do número de segmentos no sistema pode oferecer um maior entendimento dos processos de mistura, da distribuição de salinidade, e principalmente da influência da descarga fluvial nesses processos. Um trabalho de campo minucioso deve ser planejado para ser possível validar o modelo, além de possibilitar uma avaliação da precisão de todo o processo de modelagem utilizado. O mérito do trabalho reside na facilidade de obter informações sobre os processos de mistura do sistema estuarino, a partir de um conjunto limitado de dados, e que levaram a resultados que são condizentes com teorias clássicas sobre este tipo de ambiente.

Referências Bibliográficas

BLUMBERG, A.F., PRITCHARD, D.W., 1997. Estimates of the transport through the East River, New York. *Journal of Geophysical Research* 102, 5685–5703.

BONETTI, J. F. & MIRANDA, L. B. 1997. Estimativa da Descarga Fluvial no Sistema Estuarino-Lagunar de Cananéia-Iguape. *Rev. Bras. Oceanogr.* São Paulo, 45(1/2):89-94.

CAMERON, W.N. & PRITCHARD, D.W. 1963. Estuaries. *In*: GOLDBERG, E.D.; McCAYE, I.N.; O'BRIEN, J. J. & STEELE, J.H. eds. *The Sea*. New York, John Wiley & Sons. P. 306 – 324.

CHEN, X. Modeling hydrodynamics and salt transport in the Alafia River estuary, Florida during May 1999–December 2001. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2004. n. 61, p. 447-490.

Day Jr., J.W., Hall, C.A.S., Kemp, W.M., Yañez-Arancibia, A., 1989. *Estuarine Ecology*. John Wiley & Sons, New York, NY.

DYER, K.R. & TAYLOR, P.A. 1973. A simple, segmented prism model of tidal mixing in well-mixed estuaries. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 1:411-418.

HARARI, J.; PEREIRA, J.E.R.; ALFREDINI, P. & SOUZA, O.J. 1995. Estudo da circulação de maré na sub-área oceânica do canal de acesso de ponta da madeira (MA), através de modelagem numérica. *Boletim técnico da escola politécnica da USP. Depto. Hidráulica e Sanitária. BT/PHD/19.*

KETCHUM, B.H. 1951. The exchanges of fresh and salt waters in Tidal Estuaries. *J. Mar. Res.*, v. 10, n. 1, p. 18-38.

KJERFVE, B. 1990. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. New Delhi, UNESCO/ UNDP. 79 p.

KJERFVE, B. 1987. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: DAY Jr.; HALL, C.H.A.S.; KEMP, W.M.; YÁNEZ-ARANCIBA, A. (eds.). Estuarine Ecology. New York, Wiley, pp. 47-78.

MILLER, R., MCPHERSON, B., 1991. Estimating estuarine flushing and residence times in Charlotte Harbor, Florida, via salt balance and a box model. *Limnology and Oceanography* 36, 602–612.

MIRANDA, L.B. 1996. Cinemática e dinâmica de estuários. Apostila do curso de Pós Graduação em Oceanografia Física do Instituto Oceanográfico de São Paulo. 300p.

MIRANDA, L.B; CASTRO F°, B. M. & KJERFVE, B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. EDUSP.

PERRELS, P.A.J., KARELSE, M., 1981. A Two-dimensional, Laterally Averaged Model for Salt Intrusion in Estuaries, *Transport Models for Inland and Coastal Waters*. Academic Press, Inc. pp. 483–535.

PEREIRA, J.E.R. & HARARI, J. 1995. Modelo numérico tri-dimensional linear da plataforma continental do Estado do Maranhão. *Bolm. Inst. Oceanogr da USP*, v.43, n.1, p. 19-34.

PRITCHARD, D.W. 1967. What is an estuary: physical point of view. In: LAUFF, G. H. Ed. *Am. Ass. Advnt. Sci.*, (83):3-5.

ROBINSON, I.S., 1983. A tidal flushing model of the fleetdan English tidal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 16, 669–688.

SHEN, J., BOON, J.D., KUO, A.Y., 1999. A modeling study of tidal intrusion front and its impact on larval dispersion in the James River estuary, Virginia. *Estuaries* 22 (3A), 681–692.

SHENG, Y.P., DAVIS, J.R., SUN, D., QIU, C., CHRISTIAN, D., PARK, K., KIM, T., ZHANG, Y., 2001. Application of an integrated modeling system for estuarine and coastal ecosystems to Indian River Lagoon, Florida. In: Spaulding, M.L. (Ed.), *Estuarine and Coastal Modeling. Proceedings of Seventh International Conference, ASCE*, pp. 329–343.

UNCLES, R.J., STEPHENS, J.A., 1990. Computed and observed currents, elevations, and salinity in a branching estuary. *Estuaries* 13 (2), 133–144.