

ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO TEMPO DE RESIDÊNCIA PARA O SISTEMA LAGUNAR DE SAQUAREMA-RJ

Albano R. Alves (1); Julio C. Wasserman (2)

(1) *Universidade Federal Fluminense/ DHN*; (2) *Universidade Federal Fluminense*
albano@ar.microlink.com.br

INTRODUÇÃO

O tempo de residência é, conceitualmente, um indicador do comportamento ecológico e da capacidade de renovação dos estuários. Contudo, o problema de sua quantificação para corpos de água de geometria complexa e grande dimensão requer uma descrição da variabilidade espaço-temporal (Oliveira, 1996). A utilização de métodos numéricos consiste, sem dúvida, na melhor aproximação para esta difícil questão, embora ainda não existam estudos definitivos.

Oliveira (1996) apresenta resultados que indicam que os modelos de trajetória de partículas, método lagrangeano, são os mais adequados e desencoraja a utilização de métodos eulerianos. Porém, Buffoni (1997) estudou os processos de dispersão, também por modelagem numérica, utilizando dois modelos independentes, um euleriano e outro lagrangeano, os quais indicaram resultados quantitativos similares. Vincent (2002) aplicou os dois métodos para a Baía de Tampa (EUA), utilizando um modelo tridimensional, e concluiu que os tempos de residência determinados pelo método euleriano eram metade daqueles calculados pelo método lagrangeano. Desta forma, mesmo sendo a modelagem numérica a técnica mais moderna para a determinação do tempo de residência, este é um campo de estudo em desenvolvimento e a utilização de apenas um método, não é consenso.

O tempo de renovação das águas é fator fundamental para a ecologia dos sistemas lagunares, determinando diretamente a capacidade de suporte para efluentes e resíduos de atividades antrópicas. Em lagunas altamente impactadas, como as do estado do Rio de Janeiro, o estado trófico pode estar intimamente relacionado com o tempo de residência (Knoppers *et al.*, 1991).

A determinação do tempo de residência ou tempo de renovação da água em corpos de água costeiros, com ligação para o mar, tem sido apresentada em vários graus de complexidade. A abordagem mais simples, resultado direto do princípio da conservação da

massa, assume que o tempo necessário para que toda a água seja renovada é igual à razão entre o volume total do corpo de água e a vazão total dos rios contribuintes. Quando a ligação com o mar é suficiente para que a variação do volume seja significativa em um ciclo de maré, utiliza-se o método do prisma de maré (Dyer, 1997). Neste caso, o tempo de renovação é determinado pela Equação 15, que se escreve

$$T = \frac{V + P}{P} T_M \quad (15), \text{ onde:}$$

T = tempo de residência.

V = volume na baixa-mar.

P = prisma de maré.(diferença entre os volumes na preamar e na baixa-mar)

T_M = período da maré.

Knoppers *et al.* (1991) utilizaram o conceito de meia vida de renovação (*flushing half-life* - $T_{50\%}$) ou o tempo necessário para renovar metade do volume da lagoa, para uma medida ótima do tempo de residência. Assume-se um decaimento exponencial, mistura completa e, considera-se ainda, o balanço evaporação-precipitação e o *runoff*. A expressão utilizada para o cálculo do $T_{50\%}$ (Equação 16) se escreve :

$$T_{50\%} = \frac{0.69V}{(Q_T + Q_R + Q_E)} \quad (16) \text{ , onde :}$$

V = Volume da lagoa,

Q_T = volume de água do mar que entra na lagoa, por dia.

Q_R = volume de água que entra na lagoa devido ao *runoff*, por dia.

Q_E = volume de água que evapora, por dia.

Como veremos mais adiante, estes métodos subestimam o valor do tempo de renovação já que consideram a mistura completa, em cada ciclo de maré. Para sistemas lagunares de geometria complexa e com dimensões e profundidades que não permitam que a água do mar penetre em todo o sistema, esta assunção leva a resultados pouco representativos.

4.5.1 Modelo 1D.

Foram realizados experimentos computacionais utilizando-se um modelo numérico unidimensional (EcoS3). O modelo representa o sistema lagunar de Saquarema-RJ, para o qual existem estimativas na literatura que permitem uma análise comparativa.

O tempo de residência foi determinado considerando-se a variação da concentração de um contaminante conservativo até 50% do valor inicial. Representa-se, assim, a meia vida do elemento, ou o *flushing half-life* (Knoppers *et al.*, 1991).

A aplicação de modelagem numérica, para a determinação do tempo de residência, foi analisada por Bellucci *et al.* (2000) sugerindo a possibilidade da estimativa *a priori* do $T_{50\%}$, já que os resultados mostraram que as propriedades de dispersão macroscópicas dependem fracamente do coeficiente de difusão turbilhonar. Isto significa que, se conhecermos com segurança a hidrodinâmica e na falta de experimentos de campo para a determinação do coeficiente de difusão turbilhonar, podemos obter uma boa aproximação do valor do $T_{50\%}$.

Para a obtenção de resultados comparáveis com os da literatura, dois experimentos foram realizados, considerando-se o contaminante presente apenas nos Sacos de Saquarema e Mombaça, respectivamente. Nos dois casos, foram construídos modelos representando o Saco de Mombaça e o Saco de Saquarema, individualmente ligados ao mar por um canal que reproduz as mesmas variações de maré dos trabalhos de referência. Os resultados estão representados nas Figuras 31 e 32 e a comparação na Tabela 5. Os valores encontrados são significativamente maiores do que aqueles calculados pelos métodos que assumem mistura completa (Knoppers *et al.*, 1991 ; Kjerfve, 1999).

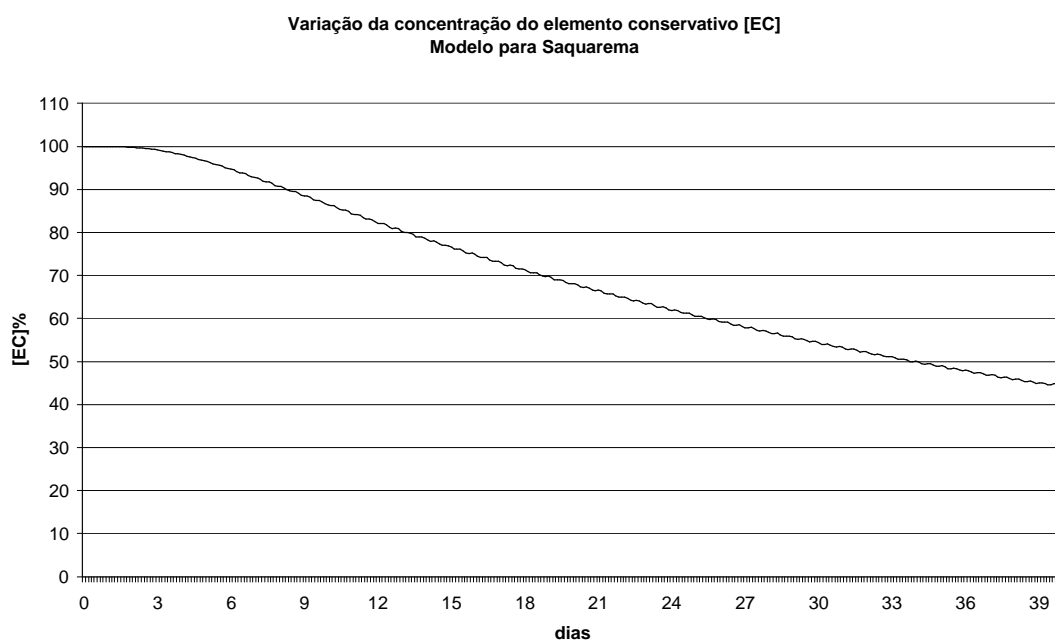


Figura 31 : Concentração do elemento conservativo com modelo específico para o Saco de Saquarema.

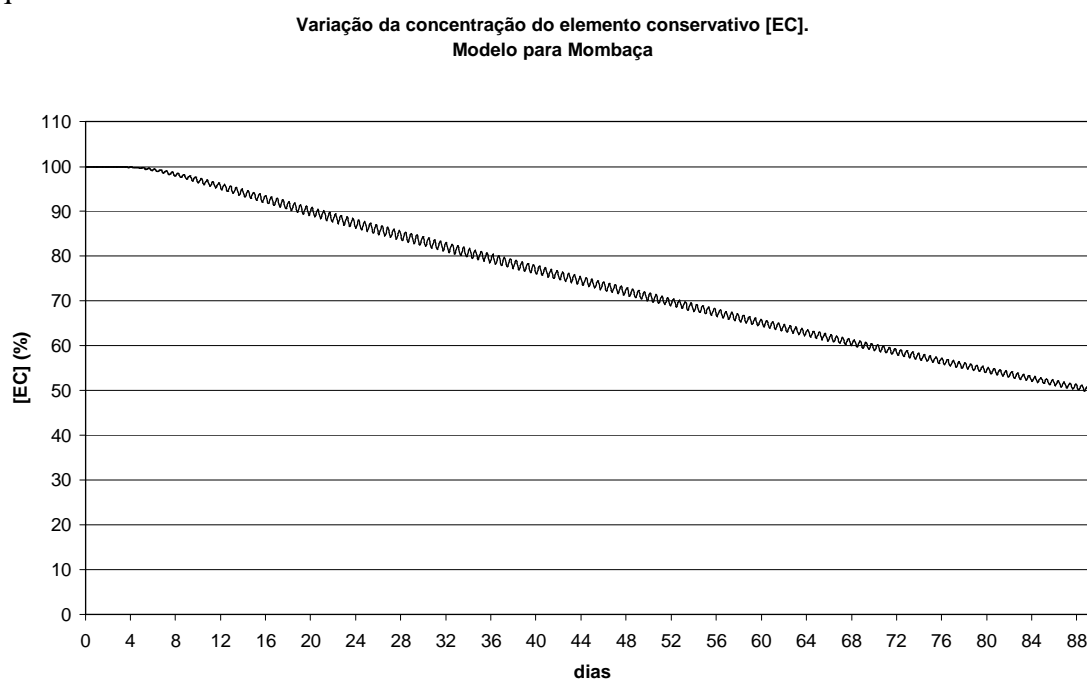


Figura 32: Concentração do elemento conservativo com modelo específico para o Saco de Mombaça.

Tabela 5: Comparação dos tempos de residência $T_{50\%}$ (*flushing half-life*), em dias. Simulações para lagunas individuais.

	Knoppers(1991)/ Kjerfve(1999)	Este estudo
Saco de Saquarema	9/8	34
Saco de Mombaça	38/14	90

No experimento para o sistema lagunar completo, a condição inicial admitida é a distribuição uniforme do elemento conservativo em todo o sistema. A amplitude de maré e a hidrologia representam as mesmas condições médias apresentadas por Knoppers *et al.*(1991).

Fica evidente, analisando-se a Figura 33, que o tempo de residência varia muito ao longo do sistema lagunar, aumentando progressivamente do Saco de Saquarema (mais próximo do mar – $T_{50\%} = 24$ dias) até o Saco de Mombaça (mais interno - $T_{50\%} > 180$ dias).

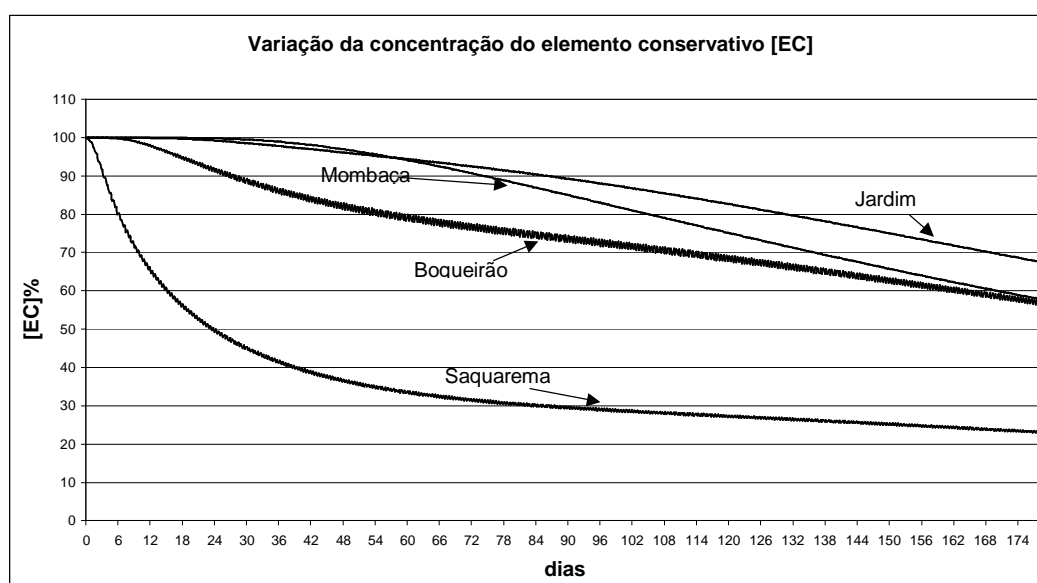


Figura 33 : Variação temporal da concentração do elemento conservativo para condições médias apresentadas por Knoppers *et al.*(1991).

Através da Tabela 6, observa-se um fenômeno interessante quando comparamos os resultados dos experimentos numéricos para o sistema lagunar como um todo (Figura 33) com aqueles obtidos para os Sacos de Saquarema e Mombaça individualmente, Figuras 31 e 32. O $T_{50\%}$ diminui para o Saco de Mombaça e aumenta para o Saco de Saquarema.

Tabela 6: Comparação dos tempos de residência (*flushing half-life*) em dias para as simulações com o Sistema Lagunar Completo e para as Lagunas individuais .

	Sistema Lagunar Completo	Lagunas individuais
Saco de Saquarema	24	34
Saco de Mombaça	>180	90

Uma possível explicação para estes resultados reside no fato de que a hidrodinâmica do Saco de Saquarema apresenta, agora, maior intensidade nos processos de mistura com a água do mar e com os sacos internos, diminuindo o $T_{50\%}$. No caso do Saco de Mombaça, quando consideramos todo o sistema lagunar, grande parcela da água que saiu na vazante anterior retorna na enchente seguinte, pois está muito mais distante do mar aumentando desta forma o $T_{50\%}$.

Nos experimentos anteriores, a maré apresenta uma amplitude constante. Contudo, durante as marés de sizígia ou quadratura, haverá um aumento ou redução do volume de água trocada com o mar. Assim, ainda com o modelo 1D, foi investigada a variação do tempo de residência, devido à oscilação da amplitude de maré. Neste experimento foi considerada uma abertura correspondente à do projeto da barra franca (80 m de largura e 2 m de profundidade), para as amplitudes de maré previstas após a implantação do projeto da barra franca. Nestes experimentos computacionais foi adotada como condição de contorno, na fronteira aberta (mar), um sinal composto de duas ondas senoidais para simular as oscilações da amplitude de maré (sizígia e quadratura). Também foram considerados os aportes de água doce para o sistema. Como nos experimentos anteriores, a condição inicial representa uma distribuição equitativa da concentração de um traçador conservativo em solução por todo o sistema. Para a fronteira aberta (ligação com o mar) assumiu-se que a água que entra no sistema a cada enchente, não saiu na vazante anterior (intensa e rápida diluição da água que sai para o mar). Entretanto, o modelo permite que parte da água que deixa o sistema na vazante, possa ter entrado na enchente anterior e não ter participado dos processos de mistura (mistura parcial no interior da laguna). A equação de Knoppers (Knoppers, 1991) foi também aplicada para as situações de sizígia e quadratura.

Os resultados (Tabela 7) indicam que os tempos de renovação para o Saco de Mombaça (mais afastado do mar) são cerca de cinco vezes maiores (45 dias) do que os obtidos pela expressão de Knoppers (9,6 dias), para as mesmas condições ambientais. Não foram observadas variações significativas mudando-se a fase inicial do experimento

(sizígia ou quadratura). Isto se deve ao fato de que, nesta região, o tempo de residência é muito maior do que o intervalo de tempo entre estas duas fases da Lua (15 dias). Para o Saco de Saquarema (mais próximo do mar), os valores determinados pelo modelo são aproximadamente iguais àqueles obtidos pela expressão de Knoppers (1,6 e 1,9 dia), nos experimentos com fase inicial de quadratura.

Tabela 7: Comparação dos tempos de renovação $T_{50\%}$ (*flushing half-life*, em dias) entre as simulações computacionais e os resultados obtidos com a expressão de Knoppers.

	Expressão analítica para meia vida. (Kjerfve)			Modelo 1D	Modelo 1D
	Sizígia		Quadratura	Fase inicial	Fase inicial
	Sizígia	-	Quadratura	Sizígia	Quadratura
Saco de Saquarema	1,4	-	1,9	0,5	1,6
Saco de Mombaça			9,6	45	45

Quando se inicia o experimento em sizígia, o tempo de renovação apresenta valor menor (0,5 dia) do que o obtido pela expressão de Knoppers (1,4 dia). Isto ocorre devido ao fato de que na utilização das expressões analíticas para mistura completa supõe-se que o Saco de Saquarema é uma laguna individual. Esta característica é observada para o Saco de Saquarema e não para o Saco de Mombaça, pois o tempo de renovação, no primeiro, é da mesma ordem de grandeza do ciclo de maré.

Observa-se uma aparente contradição qualitativa entre estes resultados (Tabela 7 - Saco de Saquarema) e os anteriores (Tabela 5 - Saco de Saquarema), já que os tempos de residência apresentam, agora, valores próximos àqueles obtidos pela expressão de Knoppers. Este fato pode ser explicado devido à consideração, neste experimento, do sistema lagunar completo. Assim, grande parte do traçador, que inicialmente ocupava o Saco de Saquarema, se desloca rapidamente para o interior do sistema lagunar reduzindo, portanto, o tempo de residência calculado por este método, principalmente quando se inicia o experimento em sizígia. Isto indica a necessidade de uma análise bidimensional, para uma interpretação mais realística, que será mostrada no item 5.5.3. e cujos resultados são sempre maiores do que os encontrados pela expressão de Knoppers.

Para representar a influência da largura da ligação com o mar nos fenômenos de mistura, foram realizados experimentos computacionais para descrição da dispersão de um contaminante conservativo, comparando a abertura de projeto, com área hidráulica igual a 160 m^2 (largura de 80 m), com outra mais restrita, apresentando área hidráulica igual a 30 m^2 (largura de 20 m). A relevância destes experimentos consiste na demonstração do aumento da capacidade de diluição do sistema lagunar e conseqüente aumento da capacidade de suporte do mesmo, após a implantação do projeto.

Nos dois casos, a fonte do elemento conservativo é pontual e constante e o resultado está representado na Figura 34.

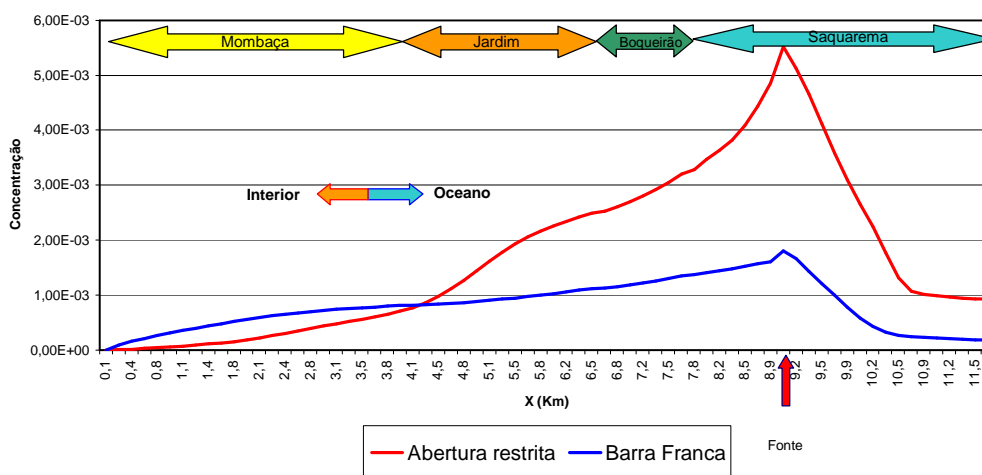


Figura 34: Distribuição espacial do contaminante no Sistema Lagunar de Saquarema. Comparação entre a abertura de projeto (160 m^2) e uma restrita (30 m^2). Estado de Equilíbrio (6 meses).

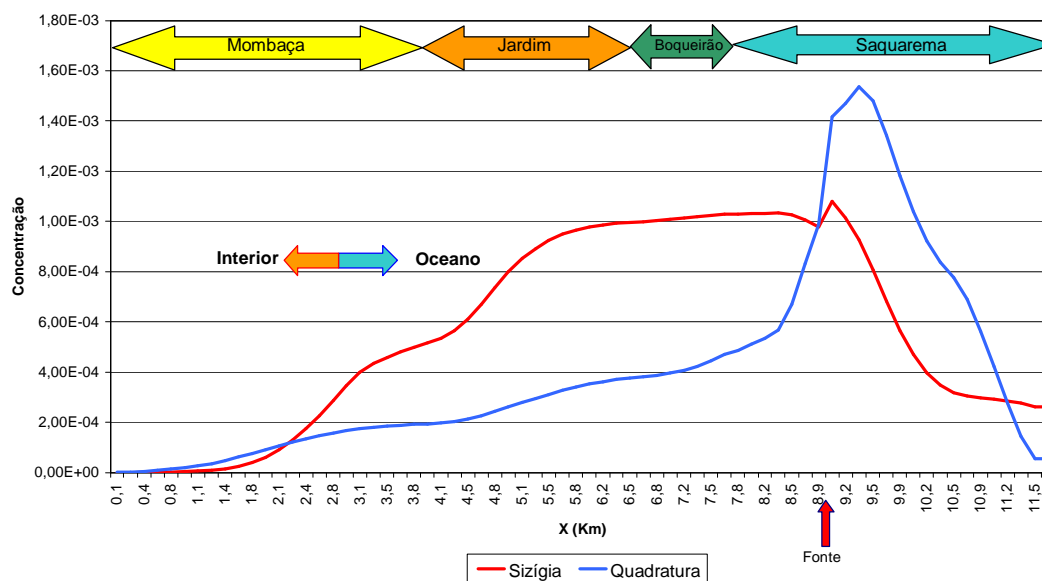


Figura 35: Distribuição espacial do contaminante no Sistema Lagunar de Saquarema. Simulações para sizígia e quadratura.

A análise da Figura 34 revela um significativo aumento da diluição em quase todo o sistema lagunar (70% - Saco de Saquarema). No Saco de Mombaça, porém, a concentração para a abertura restrita é quatro vezes menor do que no caso da abertura de projeto. Isto ocorre devido à maior penetração da onda de maré, para a abertura de projeto, e conseqüente intensificação das trocas de água entre os compartimentos. Esta característica é acentuada durante as marés de sizígia, como se observa na Figura 35.

4.5.2 Modelo 2D.

Experimentos computacionais, com o modelo 2D (Aquasea), para determinação do tempo de residência do sistema Lagunar de Saquarema, foram conduzidos para fins de comparação com o modelo 1D, já descrito. A condição inicial, da mesma forma que nos experimentos anteriores, representa uma distribuição equitativa da concentração de um traçador conservativo dissolvido.

A ligação com o mar foi considerada permanente, segundo o projeto da barra franca. A análise dos resultados para o comportamento da onda de maré não apresentou

diferenças importantes. Porém, quando estudados os fenômenos de dispersão, a capacidade representativa do modelo unidimensional apresentou limitações.

Os valores para os tempos de renovação encontrados nas simulações com o modelo bidimensional foram maiores do que aqueles obtidos utilizando-se o modelo unidimensional, já que neste, o traçador é distribuído de forma homogênea em duas direções (lateral - y e vertical - z), superestimando os processos de mistura.

Para representar o modelo 2D, foi adotado o ponto central de cada saco do sistema lagunar, para melhor correspondência com os pontos de referência no modelo 1D. A distribuição espacial do tempo de residência será apresentada em item posterior.

Os resultados (Tabela 8) para o Saco de Saquarema (mais próximo do mar) apresentaram diferenças mais significativas (250 %) do que aqueles para o Saco de Mombaça (33 %), situado na parte mais interna do sistema lagunar, embora apresentem a mesma ordem de grandeza.

Tabela 8: Comparação dos tempos de renovação $T_{50\%}$ (*flushing half-life*, em dias) entre as simulações computacionais com os modelos 1D e 2D.

	Modelo Unidimensional	Modelo Bidimensional
Saco de Saquarema	0,5 a 1,6	3,5
Saco de Mombaça	45	60

De maneira geral, o modelo unidimensional pode ser considerado como uma boa aproximação, tendo em vista a complexidade da geometria do sistema lagunar.

4.5.3 Mapas de tempo de residência.

Nestes experimentos considera-se o tempo de residência, em cada ponto, igual ao intervalo de tempo necessário para que a concentração do traçador se reduza a 36,8% da concentração inicial. Este valor corresponde a uma fração igual a $1/e$, onde e é a base do logaritmo neperiano e sua escolha segue o trabalho de Vincent (2002). A partir deste ponto da curva de decaimento, a concentração do traçador tende assintoticamente a zero dividindo o fenômeno em duas fases distintas. A primeira com decaimento rápido e a segunda com decaimento assintótico. Assumindo-se o $T_{50\%}$, verificamos que este não representa a mudança de fase do processo estudado, como se observa na Figura 36 que

representa o decaimento da concentração do traçador no Saco de Saquarema (Experimento para laguna individual).

Para o instante inicial assume-se que a concentração do traçador é igual em todo o sistema lagunar. O aporte de água doce foi considerado igual a $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e foi incluído em todos os experimentos. As condições de contorno para a superfície da laguna e para a fronteira aberta (barra franca) compuseram três cenários diferentes. No primeiro, sem efeito do vento, a maré na fronteira aberta foi representada por um sinal sintético, com nível médio constante, que reproduz uma onda de maré com amplitudes de 0,5 m e 0,2 m, na sizígia e quadratura, respectivamente. O experimento seguinte considera um sinal real de maré, incluindo as oscilações do nível médio. O último cenário estudado corresponde ao segundo, no que diz respeito à onda de maré, mas introduz um vento típico ($\text{NE} - 5 \text{ m s}^{-1}$), como condição de contorno na superfície.

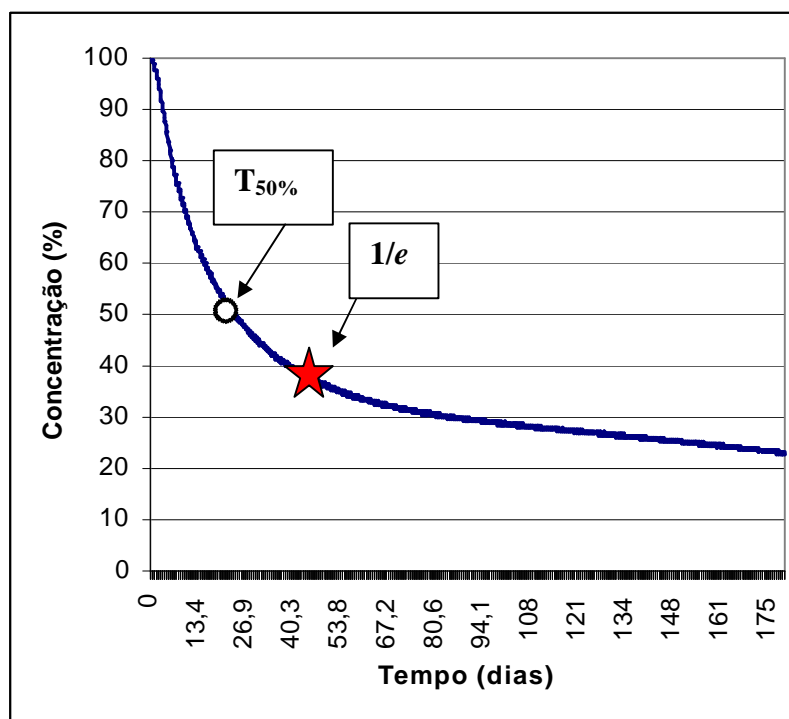


Figura 36: Variação da concentração do traçador no Saco de Saquarema. Experimento para laguna individual.

Foram escolhidos 61 pontos (Figura 37) para a análise das séries temporais de concentração, resultantes das simulações. A maior densidade no Saco de Saquarema foi necessária pois este é o que apresenta maior intensidade dos processos de mistura, decorrente de sua proximidade com o mar. Determina-se então o intervalo de tempo entre o início do experimento e o instante no qual a concentração atinge o valor limite escolhido ($1/e$). Em seguida, obtém-se a distribuição do tempo de residência, por interpolação.

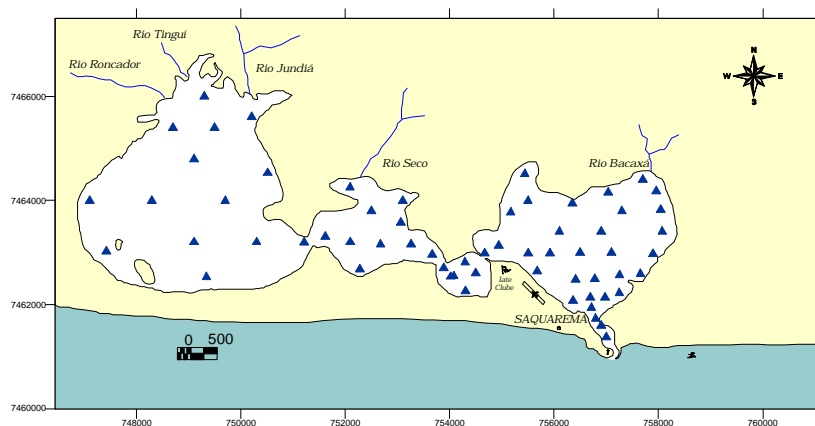


Figura 37: Distribuição dos pontos utilizados para a determinação do tempo de residência. Concentração limite igual a 36,8%.

Os resultados dos experimentos podem ser resumidos por intervalos de valores para cada compartimento do sistema lagunar e estão representados na Tabela 9.

Tabela 9: Intervalos de valores do tempo de residência, em dias, para os compartimentos do Sistema Lagunar de Saquarema. Resultados obtidos com o modelo 2D.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Saco de Saquarema	0 - 20	0 - 40	0 - 20
Saco do Boqueirão	20 - 50	40 - 52	20 - 48
Saco do Jardim	50 - 60	52 - 58	48 - 56
Saco de Mombaça	60 - 68	58 - 65	56 - 58

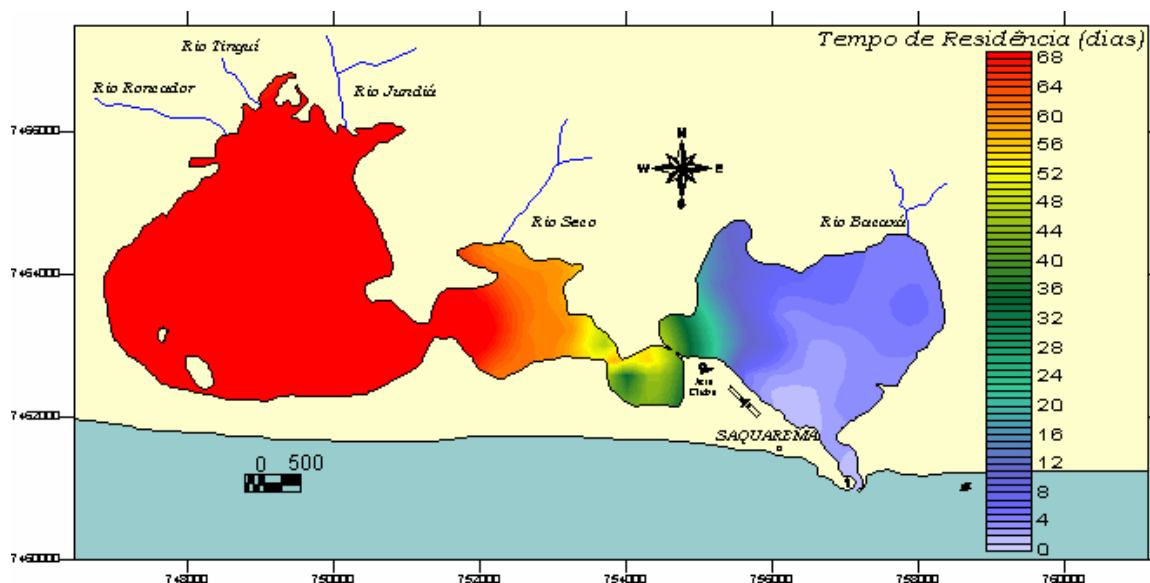


Figura 38: Mapa do tempo de residência para o Sistema Lagunar de Saquarema. Prognóstico após a Barra Franca. Cenário de maré sintética, sem vento.

A introdução da maré real (observada na estação da Ilha Fiscal-RJ) como condição de contorno inclui as variações do nível médio (maré meteorológica). Observa-se, comparando-se os mapas resultantes (Figuras 38 e 39), que o tempo de residência aumenta na porção ocidental do Saco de Saquarema e diminui no Saco de Mombaça. O aumento no Saco de Saquarema é o efeito compensatório da diminuição do tempo de residência no resto do sistema, já que sua porção oeste é o caminho de saída para as trocas de água com o oceano.

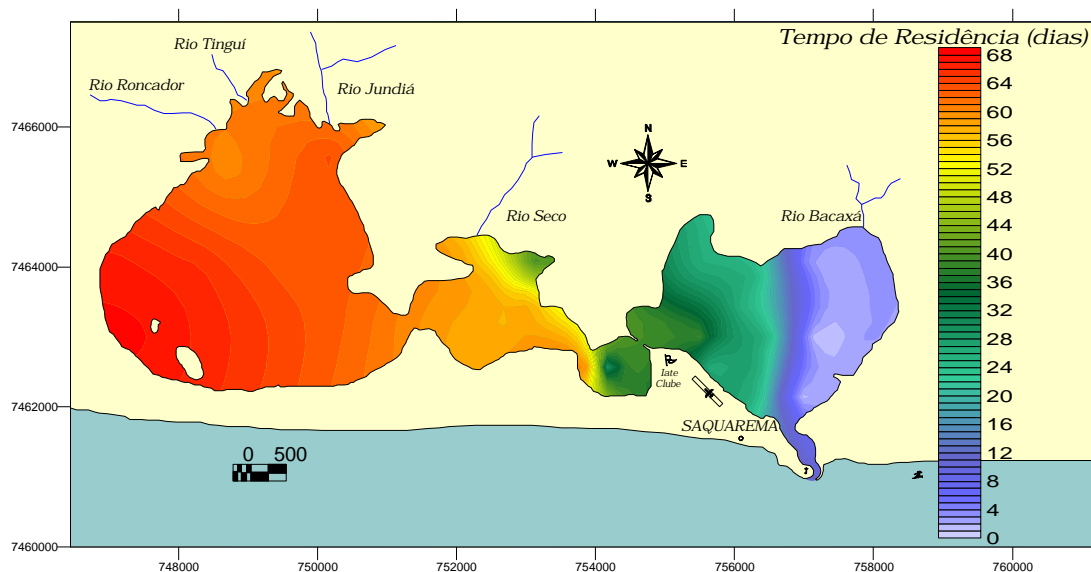


Figura 39: Mapa do tempo de residência para o Sistema Lagunar de Saquarema. Prognóstico após a Barra Franca. Cenário de maré real, sem vento.

O efeito do vento é claramente observado na análise da Figura 40 e exprime-se pela diminuição do tempo de residência, notadamente no Saco de Mombaça e na porção oeste do Saco de Saquarema. Na região mais interna do sistema lagunar, a circulação induzida pela penetração da onda de maré é bastante reduzida. Com o efeito do vento, a circulação caracterizada pela formação de dois vórtices intensifica os processos de mistura horizontal, favorecendo as trocas de água entre os compartimentos da laguna.

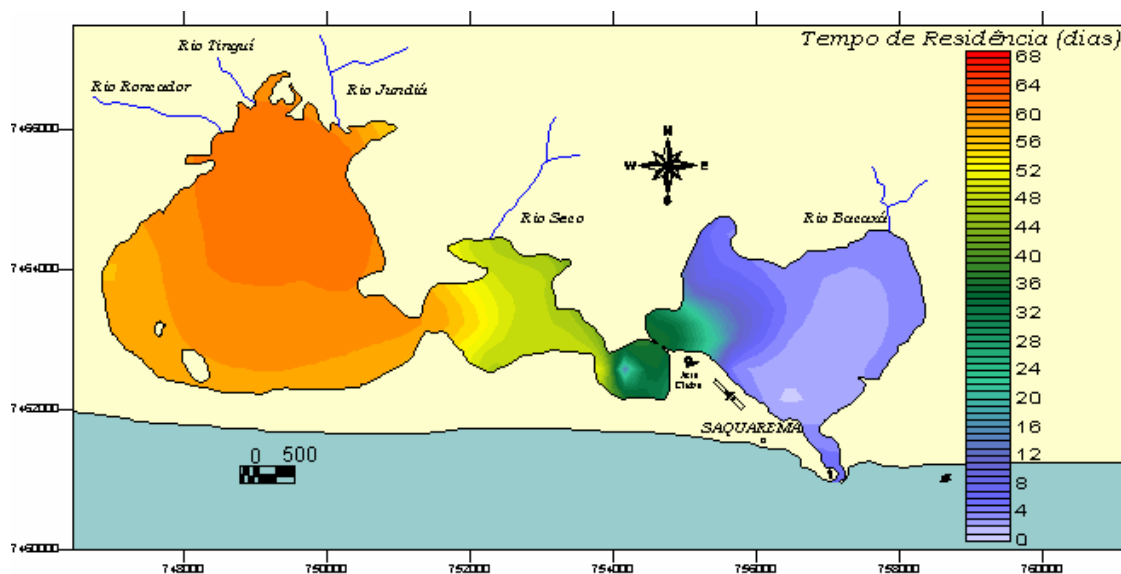


Figura 40: Mapa do tempo de residência para o Sistema Lagunar de Saquarema. Prognóstico após a Barra Franca. Cenário de maré real, com vento típico (NE - 5 m s^{-1}).

Se considerarmos a hipótese de instalação de um cinturão de captação de esgoto e águas pluviais para posterior lançamento no interior da laguna, a região que promoveria maior diluição do efluente seria a porção leste do Saco de Saquarema, o mais próximo possível do canal de ligação com o mar. Um lançamento intermitente, apenas durante a maré vazante, seria o ideal. Quando analisamos estes experimentos, os principais aspectos referem-se à capacidade de suporte do sistema lagunar e à avaliação da área de influência dos lançamentos atuais.

Por motivos de viabilidade técnica e/ou orçamentária, nem sempre é possível escolher o local ideal para o lançamento de efluentes. Desta forma, os mapas de tempo de residência podem ser aplicados para a determinação do local mais apropriado (de menor impacto) dentre as opções viáveis.