

## **O rio no seu regime natural e impactado, e soluções de engenharia ambiental**

**Prof Eduardo Mario Mendiondo - [emm@sc.usp.br](mailto:emm@sc.usp.br)**

---

### **1- Teorias ecológicas sobre a hidrodinâmica de sistemas fluviais**

#### **1. Metodologia**

##### **1.1.1 Distinção de sistemas**

##### **1.1.2 Variação espacial de produção de cargas difusas**

##### **1.1.3 Variação temporal de produção de cargas**

#### **1.2 Resultados e discussões**

#### **1.3 Síntese**

### **2- Cenários ambientais**

#### **2.1 Metodologia**

##### **2.1.1 Regime fluvial e cargas regionais**

##### **2.1.2 Tipos de cenários**

#### **2.2 Resultados e discussões**

#### **2.3 Síntese**

### **3- Indicadores de sustentabilidade**

#### **3.1 Metodologia**

##### **3.1.1 Relação de indicadores, variáveis e cenários**

##### **3.1.2 Etapas experimentais**

#### **3.2 Resultados e discussão**

##### **3.2.1 Interpretação espacial**

##### **3.2.2 Interpretação temporal**

##### **3.2.3 Síntese ecohidrológica**

##### **3.2.4 Cenários adaptados à ecohidrologia local**

#### **3.3 Conclusões e recomendações**

## **1- Teorias ecológicas sobre a hidrodinâmica de sistemas fluviais**

Esta seção introduz conceitos e progressos, derivados de REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA DE QUALIDADE E QUANTIDADE, ao contrastar as teorias ecológicas e os dados experimentais, iniciados no Projeto Temático FAPESP nº 02/13449-1 "*Estudo dos sistemas naturais e artificiais redutores de cargas poluidoras para sustentabilidade dos recursos hídricos do Baixo Ribeira de Iguape*" (CALIJURI, 2003), e complementados com estudos recentes (ver Anexo I) com ênfase na hidrodinâmica de sistemas fluviais e sua relação com as cargas originadas em áreas de montante e de jusante da bacia.

## **2. Metodologia**

A metodologia consistiu em ligar os trabalhos experimentais em várias escalas de micro-bacias estudadas e comparadas com teorias ecológicas. Os estudos experimentais tomaram como base os resultados indicados por MOCCELLIN (2005), BENASSI (2006), ALMEIDA-NETO (2007), e BOTTINO (2008). Estes trabalhos foram analisados a partir do Banco Pluviométrico, Fluviométrico e Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo (DAEE-USP, FCTH, 2001) e com base no estudo plani-altimétrico gerado no próprio Projeto Temático dos mapas de cada micro-bacia.

De modo geral, as cargas podem ser classificadas como difusas e pontuais. As primeiras são oriundas do ciclo de transporte através das componentes do ciclo hidrológico, especialmente dos tipos de escoamento em superfície, subsuperficial e subterrâneo que ocorrem nos ecossistemas terrestres. Nesse sentido, as cuestas, vertentes e planos de escoamento (Mendiondo e Tucci, 1997,b) apresentam uma diversidade de processos em escalas diferentes e que respondem pela poluição difusa que chega até a rede de drenagem. Por outro lado, as cargas pontuais são originadas por atividades intensivas, geralmente restritas a pequenas porções da paisagem, e fundamentalmente são produto de despejos de cargas antrópicas de origem doméstico, industrial, pecuária e agricultura. Embora a poluição difusa seja mais difícil de perceber na paisagem seus efeitos são comuns ao longo de um ciclo anual; no entanto, as cargas pontuais podem apresentar variação temporal significativa, em função de regras de operação de comportas, eventos episódicos como tormentas, ou até atividades de despejo irregular. Finalmente, as cargas podem ser também classificadas de forma determinística ou aleatória. No caso, a abordagem de monitora-

mento e estimativa de cargas pode responder a um equacionamento com parâmetros de calibragem que são assumidos constantes (abordagem determinística) ou a partir de uma teoria sobre os erros ou desvios (aleatória).

Como a mistura de comportamentos é comumente alta devido a um grau de combinação de efeitos superpostos e de uma degradação própria da matéria ao se deslocar ao longo de um ecossistema natural da bacia hidrográfica, é de utilidade aproximar abordagens que discriminem, no possível, este tipo de cargas. A metodologia consistiu em: (1) distinguir dois ecossistemas, um com predominância de cargas mistas (pontuais e não-pontuais) e outro com predominância de cargas difusas (não-pontuais), b) através de uma caracterização espaço-temporal, caracterizar e classificar as cargas difusas por uso e ocupação e seus efeitos combinados, cumulativos em escalas de bacia incremental, c) uma vez identificadas as cargas difusas, estimar as componentes de cargas pontuais. Dessa forma, a expressão abordada de carga poluidora é da forma:

$$\underbrace{C_{i,j} \cdot Q_{i,j}}_{Lr_{i,j}} = \underbrace{C_{i-1,j} \cdot Q_{i-1,j}}_{Lr_{i-1,j}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{Mnp} Ybacia_{i,j,k} \cdot A_{i,k}}_{Lbacia_{i,j,k} \text{ (carga difusa)}} + \underbrace{\sum_{s=1}^{Mp} Yp_{i,j,s}}_{\text{(cargas pontuais)}} + \underbrace{erro_{i,j,k,s}}_{\text{Cargas de origem aleatória}} \quad (1)$$

em que  $Ybacia_{i,j,k}$  é a produção ou carga específica potencial, na forma de poluição difusa (não-pontual), do  $k$ -éssimo uso do solo, na bacia incremental entre os pontos de controle “ $i-1$ ” e “ $i$ ”, ambos do rio que limitam esta área incremental, e cujo comportamento pode variar sazonalmente, em “ $j$ ” períodos, e  $A_{i,k}$  é o tamanho da área com  $k$ -éssimo uso e ocupação do solo, nessa mesma bacia incremental, os quais variam de 1 até  $Mnp$ . Desta expressão geral, as variáveis  $Lr_{i-1,j}$ ,  $Lr_{i,j}$  e  $Lbacia_{i,j,k}$  são as respectivas cargas (Kg ano<sup>-1</sup>) a montante e jusante do trecho do rio, e da área de bacia incremental entre ambos pontos. Por outro lado,  $Ybacia_{i,j,k}$  representa a produção ou carga específica potencial (Kg ton<sup>-1</sup>ha<sup>-1</sup>) de origem pontual para “ $s$ ” atividades diferentes, as quais podem variar de 1 até  $Mp$ . A componente  $erro_{i,j,k,s}$  representa os desvios aleatórios que dependem da posição relativa e/ou local na bacia (“ $i$ ”), da sazonalidade (“ $j$ ”), do tipo de uso do solo que produz poluição difusa (“ $k$ ”) e das atividades pontuais de poluição de cargas com regras de operação, volume e períodos determinados por condições próprias (“ $s$ ”). Por exemplo, no caso industrial, uma planta industrial de celulose tem suas próprias regras de operação de dilui-

ção de esgotos industriais tratados. Esta regra pode estar ou não associada ao ciclo natural que ocorre na bacia. Também dessa expressão geral, estima-se que o somatório de áreas parciais com usos e ocupações distintos deve ser igual ao valor dessa área parcial de drenagem e que a componente aleatória incorpora as possíveis reações químicas, biológicas ou físicas das cargas sendo transportadas das partes de cabeceira, áreas menores, até os exutórios das sub-bacias em consideração.

### 1.1.1 Distinção de sistemas

As escalas de análise das micro-bacias tiveram uma amplitude, tomando como base uma abordagem de escalas incrementais ou de forma aninhada, usando dois eixos de bacias. O primeiro eixo de escalas incrementais, com maior influência de cargas pontuais e difusas, utilizou o Sistema Jacupiranguinha (S1: Jacupiranguinha), com observações nas micro-bacias cujas áreas foram planimetradas em 188, 340 e 375 Km<sup>2</sup>. Este primeiro sistema corresponde a um conjunto pedológico de grande complexidade na paisagem, composto por *Latosolos Amarelos*, *Cambissolos Háplicos*, *Argisolos Vermelho-Amarelos*, *Latosolos Amarelos* e *Organossolos Méssicos* e, com menor expressão, *Neossolos Líticos* e *Chernossolos Argilúvicos*.

O segundo eixo de escalas incrementais, a partir do Sistema Canha (S1: Canha), teve predominância de produção de cargas difusas distribuídas na bacia, e âmbito geológico mais simples, composto de *Cambissolos Háplicos* nas cuestas e os *Organossolos Méssicos* nos vales. Este segundo sistema teve incrementos de áreas de micro-bacias, com valores de monitoramento com áreas de drenagem de: 0,9; 5,7; 8,2; 65,0; 69,6; 100,3; 125,9 Km<sup>2</sup>, respectivamente. Neste segundo eixo analisaram-se amostragens sazonais, observando parâmetros de qualidade de água, vazões e estado das bacias de drenagem, correspondendo a uma geologia do *Complexo Turvo-Cajati (PltX)*, com fraturamento mediano (Mapa Geológico do Estado de São Paulo, 1981, escala 1:500.000). Os resultados corresponderam a um grupo de parâmetros selecionados em virtude de capacidade de cálculo e estimativa a partir de concentrações, no espaço e no tempo, na forma de  $C_{i,j}$ , correspondendo à concentração do parâmetro na  $i$ -ésima escala espacial (condição de borda) e durante a  $j$ -ésima sazonalidade (condição inicial). Os parâmetros analisados para estimativas de carga foram nitrogênio total ( $NT$ ), fósforo inorgânico ( $POI$ ) e sólidos suspensos totais ( $SST$ ) e uma estimativa sobre clorofila "a" ( $Cl-a$ ).

## 1. Variação espacial de produção de cargas difusas

A variação espacial de produção de cargas difusas foram correlacionadas a partir do mapeamento, planimetragem/contagem de usos e ocupações, e topologia de ligação dos canais ribeirinhos, desde montante para jusante. Nestes casos, a expressão para a carga monitorada em no  $i$ -éssimo trecho ribeirinho responde à equação de balanço do tipo:

$$\overbrace{C_{i,j} \cdot Q_{i,j}}^{Lrio_{i,j}} = \overbrace{C_{i-1,j} \cdot Q_{i-1,j}}^{Lrio_{i-1,j}} + \sum_{k=1}^M \overbrace{Y_{bacia_{i,j,k}} \cdot A_{i,k}}^{Lbacia_{i,j,k}} \quad (2),$$

em que  $Y_{bacia_{i,j,k}}$  é a produção ou carga específica potencial ( $\text{Kg ton}^{-1}\text{ha}^{-1}$ ), na forma de poluição difusa não-pontual, do  $k$ -éssimo uso do solo, na bacia incremental, entre os pontos de controle  $i-1$  e  $i$ , ambos do rio que limitam esta área incremental, e cujo comportamento pode variar sazonalmente, com " $j$ ", e  $A_{i,k}$  é o tamanho da área com  $k$ -éssimo uso e ocupação do solo, nessa mesma bacia incremental. Desta expressão geral, as variáveis  $Lrio_{i-1,j}$ ,  $Lrio_{i,j}$  e  $Lbacia_{i,j,k}$  são as respectivas cargas ( $\text{Kg ano}^{-1}$ ) a montante e jusante do trecho do rio, e da área de bacia incremental entre ambos pontos. Também dessa expressão geral, estima-se que o somatório de áreas parciais com usos e ocupações distintos deve ser igual ao valor dessa área.

A expressão (1) é utilizada desde montante para jusante, no sentido de estimar as cargas específicas ou produção difusa não-pontual,  $Y_{i,j,k}$ , das áreas das cabeceiras primeiro e, a continuação, das áreas de jusante mais próximas das cabeceiras, e assim sucessivamente para as áreas localizadas mais a jusante das bacias. A vantagem desta metodologia é que permite estimar as cargas específicas  $Y_{i,j,k}$  para trechos de rios com áreas de drenagem com usos mais homogêneos primeiro e depois re-utilizar estas estimativas nas áreas de jusante, com usos mistos.

As hipóteses desta metodologia simples são: a) independente da forma de transporte de cargas difusas, seja por meios superficiais, sub-superficiais ou subterrâneos, assume-se um regime permanente ou quase-permanente de escoamento nas áreas fontes da bacia e nos trechos de rio internos; b) a produção de cargas naturais e/ou artificiais, e assim seu impacto em um curso de água, somente é dependente de um balanço de massa a partir de fontes difusas não-pontuais, isto

é das áreas ocupadas por usos diferentes e, portanto, sem análise particular de uma modelagem topológica dentro da bacia hidrográfica que drena para o rio; c) a produção de cargas para cada tipo de uso e ocupação podem variar sazonalmente para um mesmo tipo de uso, porém é assumido que essas taxas se mantêm relativamente constantes para esse uso ao longo da bacia durante uma dada estação do ano ou para uma certa condição inicial; d) nos casos de existir diferenças significativas no relevo, principalmente entre áreas de cabeceira com altas declividades e as de jusante com declividades menores, estima-se uma redução da produção potencial em virtude dessa mudança no relevo, com coeficientes de ajuste ao balanço de massas; e) as taxas de produção de cargas são similares para áreas incrementais localizadas sobre a bacia de margem esquerda, de margem direita e/ou de uma fonte poluidora qualquer localizada para em distâncias relativas até o canal principal; f) na hipótese de se ter balanços de massa com aportes negativos, isto é sumidouros de cargas, a metodologia é limitada, e não aplicada para discriminar a produção potencial de cargas nem para os tipos de degradação de cargas durante o transporte. Neste caso, somente estima-se o balanço longitudinal do rio, sem estimar as contribuições parciais de cada área geradora de poluição natural e artificial.

### **1.1.3 Variação temporal de produção de cargas**

Para uma análise preliminar, a metodologia prevê poucos usos, entre eles: florestas mistas, agricultura mista (terras cultivadas, solos expostos e pastagens), e áreas urbanas. A variação temporal de produção de cargas segue da aplicação espacial, prevista pela expressão (1), para um mesmo uso do solo e para um mesmo local. A suposição básica de variação temporal indica que qualquer sazonalidade é produto de mudanças na forma de uso e ocupação do terreno natural e dessas interações com as condições iniciais.

A sazonalidade é mais bem expressada a partir de condições iniciais e de contorno específicas. Entre as variáveis que identificam estas condições aparecem, entre outras a temperatura ambiente  $T$ , a radiação solar incidente  $Rad$  e o índice de precipitação acumulada antecedente de 7 dias prévios à amostragem  $IPA_7$ . As coletas são realizadas de forma seqüencial, de maneira que existam pequenos desvios destes valores, assumidos médios e constantes durante uma coleta completa em escalas de bacias incrementais.

## 1.2 Resultados e discussões

Na Figura 1.1 aparecem os resultados obtidos de produção de NT, POI e SST para os dois sistemas analisados: Jacupiranguinha e Canha (em círculos preenchidos). Estes gráficos apresentam a relação de três variáveis: a componente de escala regional, representada pelo tamanho da bacia a montante do ponto monitorado (abscissas), a vazão específica observada durante a amostragem (em ordenadas) e a produção, expressa em  $\text{Kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , e apresentada proporcionalmente à área dos círculos de cada gráfico, em separado. Nas figuras foram inseridos os valores de produção de NT, SST e POI ao lado de cada observação. Em primeiro lugar, estes gráficos contribuem para a discriminação inicial das cargas difusas, em si, das cargas mistas (difusas + pontuais). Em segundo lugar, a sazonalidade marcada das observações, embora fundamental, não foi advertida nos gráficos por causa do agrupamento amostral dos sistemas que está ligado ao transporte (vazão) do ciclo hidrológico e ao controle regional (tamanho da bacia de drenagem). Para NT, é possível propor um comportamento regional com menores e maiores cargas difusas, com um decréscimo progressivo conforme a escala regional aumenta. Por exemplo, um limite de produção de  $20 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  tende a diminuir com o aumento da área de drenagem. No entanto, para áreas de bacia superiores a aprox.  $100 \text{ Km}^2$  este comportamento regional é quebrado, fundamentalmente por um aumento quantitativo ( $\Delta Q_p^*$ ) de vazões específicas, e qualitativo, de cargas ( $\Delta Y_p$ ), típico de um padrão de cargas pontuais. A natureza deste estresse de cargas pontuais é mais evidente se analisando o gráfico de POI, onde há coexistência cargas muito altas e baixas no mesmo intervalo de escalas de análise, corroborando dois aspectos: a natureza dos despejos pontuais, altamente fosforados, e prováveis regras de operação de lançamento de cargas aos corpos d'água. O gráfico de SST confirma a quebra de comportamento de cargas difusas e destaca que existe também altas contribuições de sólidos suspensos nos corpos receptores. Como a metodologia de estimativas de cargas difusas da expressão (2), espacial e sazonalmente, implica em estimar e reutilizar as taxas de produção unitária, e em virtude de ser uma abordagem simples, ocorrem erros no fechamento do balanço de massa, ou seja um erro nas estimativas. No caso, o erro relativo do fechamento de balanço de massas indica a diferença do balanço de massa em relação às cargas totais observadas nos setores de jusante da bacia. Por ser uma metodologia simples e determinística, erros da ordem de até  $\pm 25\%$  são aceitáveis, em função de que existem erros comuns na amostragem das concentrações  $C_{ij}$  e das vazões  $Q_{ij}$  em ambientes fluviais. Erros relativos no

fechamento de balanço da ordem de até  $\pm 10\%$  são considerados de boa qualidade para uma análise preliminar de diagnóstico e posterior uso de prospecção.

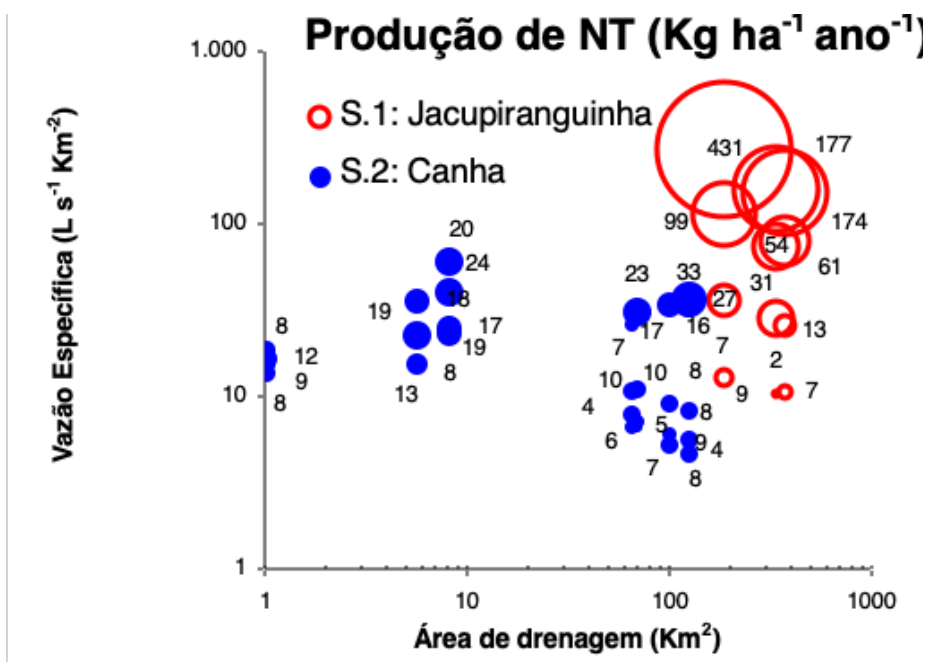


Figura 1.1 Regionalização empírica de produção de cargas; (a) nitrogênio total

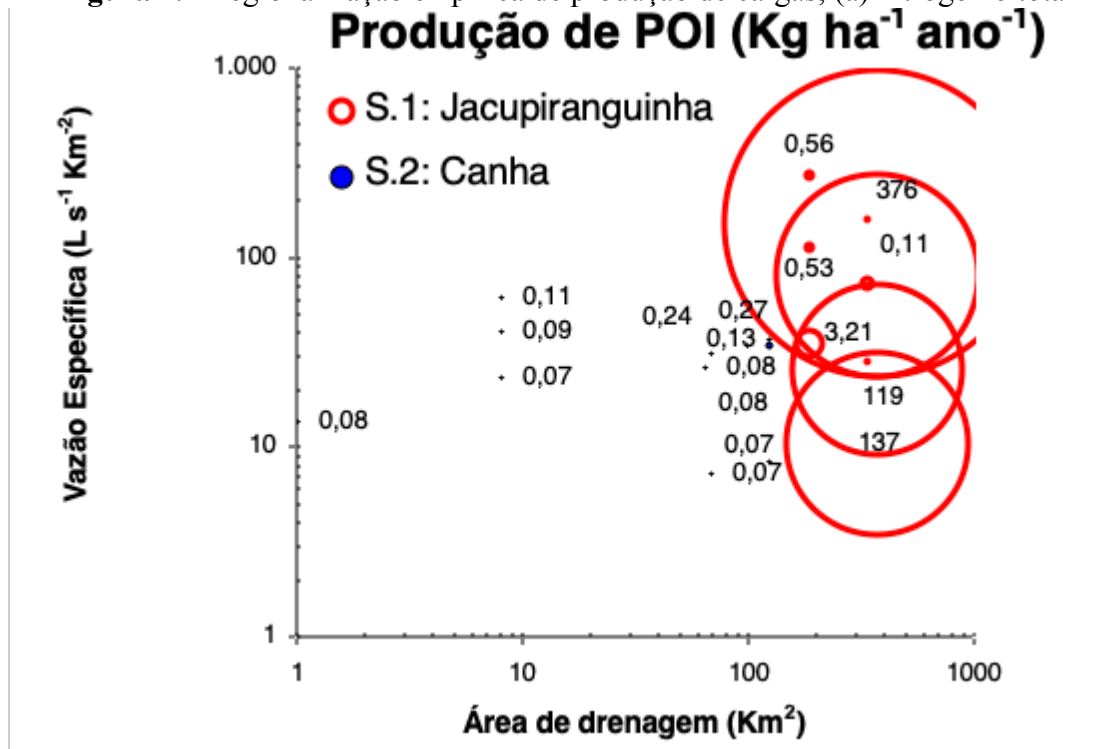
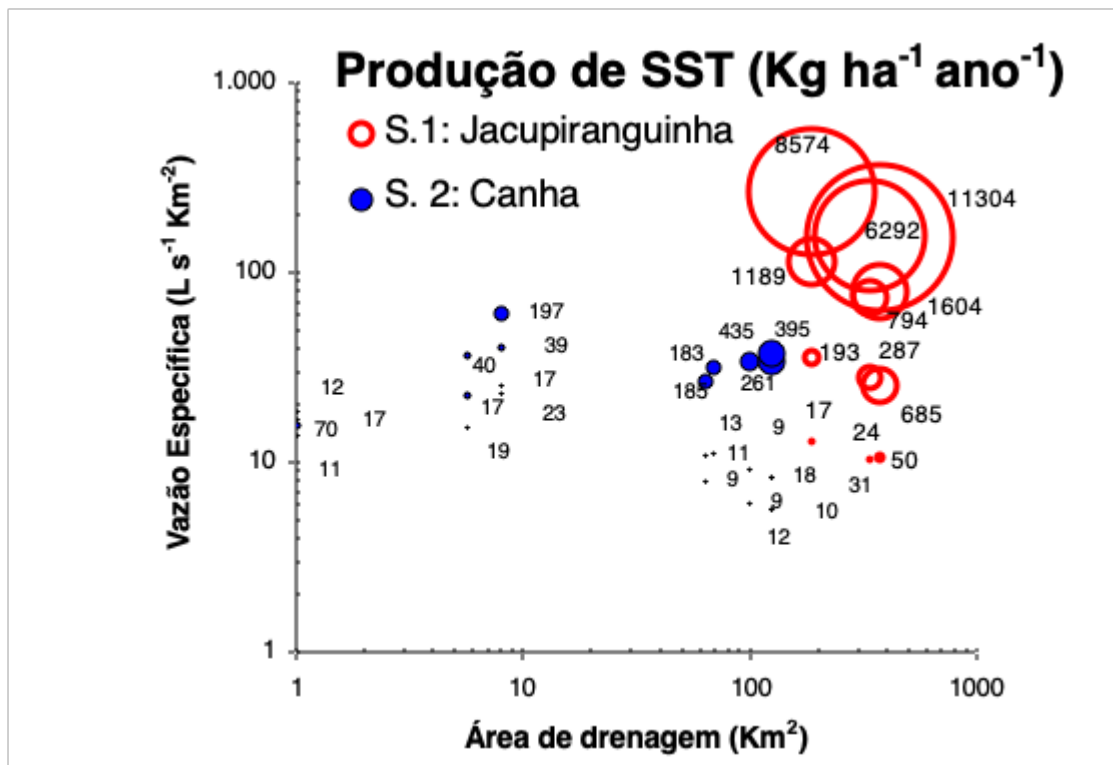


Figura 1.1 Regionalização empírica de produção de cargas; (b) fósforo inorgânico





**Figura 1.1** Regionalização empírica de produção de cargas; ( c ) sólidos suspensos totais

Embora as condições de regime e escoamento, determinados pelos números de Reynolds ( $Re = \rho \cdot V \cdot D \cdot \mu^{-1}$ ) e Froude ( $Fr = V \cdot D^{-0,5} \cdot g^{-0,5}$ ) variem espacial e temporalmente, eles tendem a se agrupar a uma determinada condição durante as amostragens.

A **Figura 1.2** apresenta a variação espacial da produção potencial de nitrogênio total, desde uma zona de montante (esquerda) para uma de jusante (direita do gráfico), e para uma condição de  $T = 18,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $IPA_7$  de 9,7 mm e radiação solar incidente de  $101 \text{ Wm}^{-2}$ . Nas abscissas desse gráfico aparece a expressão do quociente entre o tamanho da bacia incremental entre os pontos amostrados e o tamanho da bacia de drenagem acumulada até o mesmo ponto. Nesta figura, percebe-se que a produção de carga de nitrogênio total da floresta varia de  $9 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  nas áreas de cabeceiras para  $2,7 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  para as outras áreas. Este decréscimo evidencia os domínios de nascentes, com altas declividades nas encostas, que produzem cargas maiores que nas áreas com menores declividades. Nesta figura, a primeira área de cabeceira somente está ocupada principalmente por florestas. As outras áreas, a jusante da cabeceira, apresentam usos de florestas e agricultura mista (cultivos, solos expostos e pastagens).

Para taxas de produção de florestas medianamente constantes ( $\approx 2,7 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ), as três novas áreas de jusante apresentam taxas de produção de nitrogênio total muito variável, com três ordens de magnitude diferentes e decrescentes ( $\approx 470, 120$  e  $4,5 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , respectivamente). Estes valores são correlacionados positivamente com as declividades médias do relevo e portanto apresentam estes comportamentos.

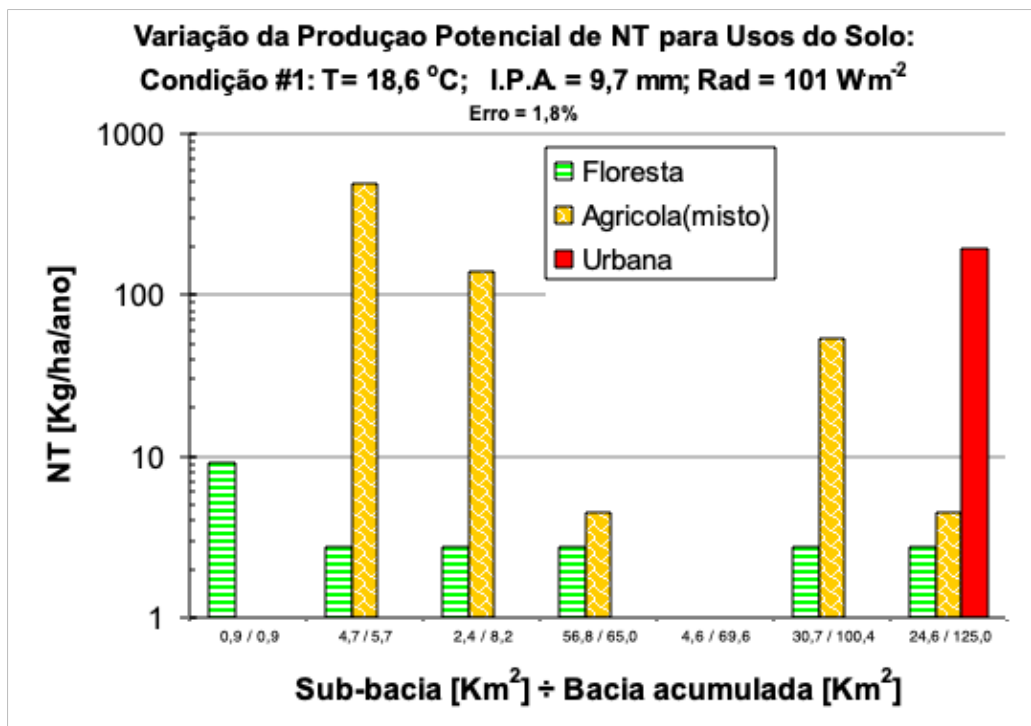


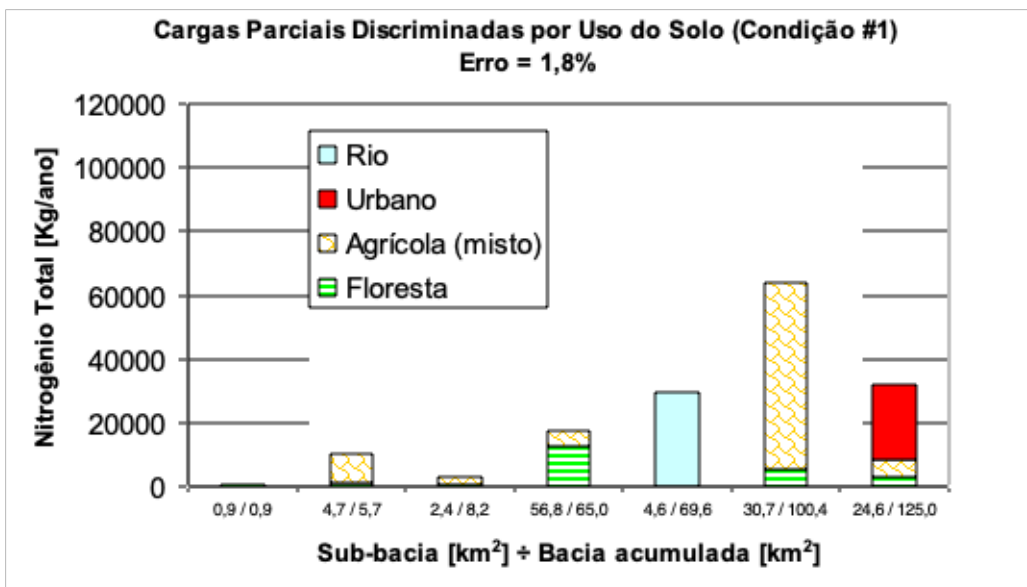
Figura 1.2 Variação espacial das produções de nitrogênio para condição específica.

Na mesma figura, observando a quinta área incremental (4,6 Km<sup>2</sup> de área parcial em correspondência com 69,6 Km<sup>2</sup> de área de bacia de drenagem total) não foram estimadas as taxas discriminadas de produções devido a que o balanço de massas apresenta-se negativo entre a seção de jusante (29613 Kg ano<sup>-1</sup>) com relação à seção de montante (31844 Kg ano<sup>-1</sup>). Na sexta área parcial, a produção de nitrogênio total foi estimada em  $\approx 58 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . Na última área de análise, a produção de nitrogênio total de áreas urbanas foi de  $\approx 180 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , para uma produção a partir da agricultura local de  $4,5 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . A partir da figura 1.1, a produção média ponderada da agricultura foi de  $23,3 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  de nitrogênio total.

Na **Figura 1.3** aparecem as variações espaciais das cargas parciais de nitrogênio total (Kg ano<sup>-1</sup>), oriundas de cada área incremental, conforme as estimativas da Figura 1.1 e do respectivo balanço de massas observados nas amostragens experimentais ao longo do eixo principal do rio. As

alturas das colunas da Figura 1.1 representam as cargas totais produzidas em cada setor da bacia e a soma delas representa a carga total acumulada no rio. Na área cinco, para qual o balanço de massa estimou uma diminuição das cargas de nitrogênio total no rio ( $-2231 = 29613 - 31844 \text{ Kg ano}^{-1}$ ), foi representado o valor de carga observado no rio.

Da **figura 1.3** observa-se que existe uma tendência de aumento das cargas de nitrogênio total na medida que a bacia se desenvolve de montante para jusante; em especial, as áreas agrícolas peri-urbanas de montante, respondem mais  $58 \text{ ton ano}^{-1}$  de NT, possivelmente devido à intensidade de trabalhos agrícolas, remoção do solo e uso de produtos agrícolas, como fertilizantes. Somando as áreas urbanas e peri-urbana mais próxima (de montante), isto é as áreas parciais 6 e 7, e que representam  $55 \text{ Km}^2$  de bacia, houve uma taxa de cargas de NT de  $95,5 \text{ ton ano}^{-1}$ . Destes, menos do 25% foram originados na área urbana. Nesta situação, sem considerar as possíveis áreas de captura e degradação, as cargas totais de nitrogênio total na bacia correspondenderam a  $127 \text{ ton/ano}$ . A produção na escala de bacia maior foi de  $10,6 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , resultante de cargas que representaram 63%, 18% e 19% das contribuições desse valor oriundas de fontes difusas não pontuais de atividades agrícolas, urbanas e florestais, respectivamente, e as quais cobriram um percentual, equivalente de áreas, de 71%, 1% e 28% da área da bacia maior.



**Figura 1.3** Cargas parciais discriminadas por uso de solo para condição 1.

A **Figura 1.4** e a **Figura 1.5** apresentam a comparação da sazonalidade de, respectivamente, produção de poluição difusa para os tipos de uso e o balanço de cargas poluidoras no balanço de massa geral, distribuído por sub-bacias, para o nitrogênio total. A Tabela 1.1 apresenta a variação temporal das taxas médias espaciais de nitrogênio total para as diferentes condições iniciais e as correspondentes estimativas contribuições de fontes geradoras. Os resultados indicam (ver **Tabela 1.1**) alta dinâmica espaço-temporal de cargas poluidoras difusas associadas a usos predominantes, com valores médios de produção variando de  $7,1 \pm 0,6 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  até  $15,8 \pm 0,2 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Esse comportamento representa uma carga regional média que varia entre  $89 \pm 8 \text{ ton ha}^{-1}$  e  $197 \pm 3 \text{ ton ha}^{-1}$  de nitrogênio total. Essa variação sazonal de quase 100% das cargas poluidoras de nitrogênio total, e corresponderam a valores médios anuais de produção regional de  $10,5 \pm 0,3 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e cargas de  $130 \pm 3 \text{ ton ano}^{-1}$ . É interessante observar que

Nestas figuras, observam-se que a produção de cargas naturais de florestas apresentam um comportamento bastante uniforme no decorrer de um ciclo anual, com variações de  $2,6$  a  $3,8 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , ou seja com uma variação relativa de quase 46% entre o máximo e o mínimo sazonal (máx/mín), e de uma média espacial ou regional na escala de bacia. As áreas agrícolas apresentaram uma sazonalidade de produção entre  $17,0$  e  $45,4 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , com uma relação máx/mín 267% entre o máximo e mínimo sazonal, das médias regionais observadas. As áreas urbanas mostraram-se com variações maiores, entre  $52,5$  e  $194,3 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , correspondendo a uma variação sazonal máx/mín de 370% na escala regional (ver **Tabela 1.1**).

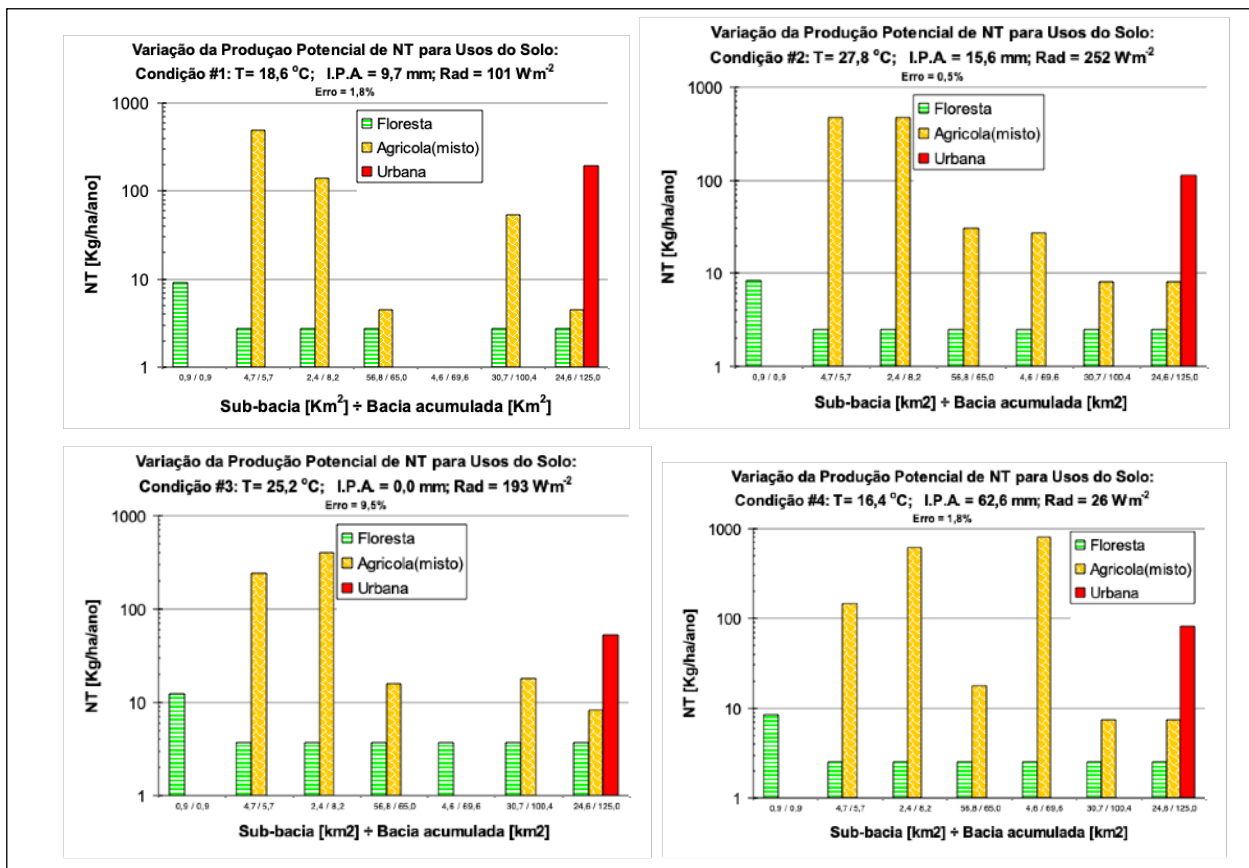
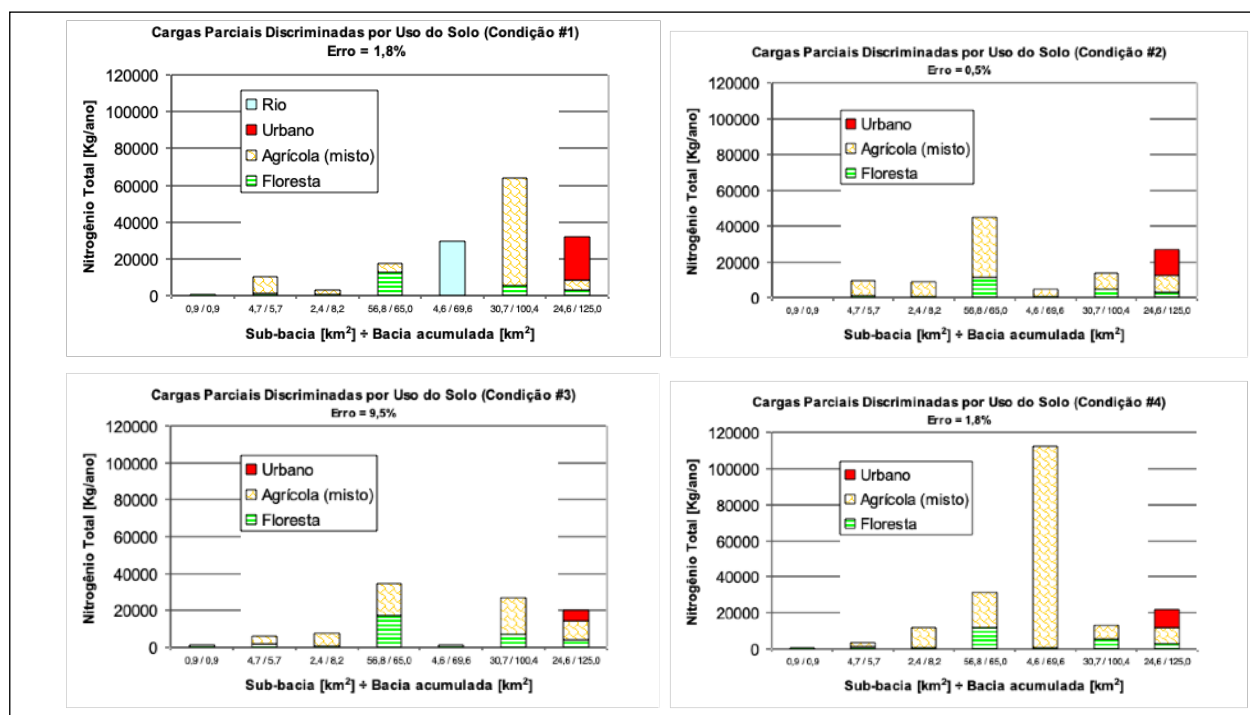


Figura 1.4 – Variação espacial e temporal de produção de cargas poluidoras de nitrogênio total



**Figura 1.5-** Variação espacial e temporal do balanço de cargas poluidoras de nitrogênio total.

Conforme os resultados da **Tabela 1.1**, as contribuições das fontes de cargas naturais e antrópicas também variaram sazonal e espacialmente, e cujas contribuições para as cargas totais tiveram valores médios anuais de 21%, 68% e 11% para os usos de florestas, agrícolas e áreas urbanas, respectivamente, que espacialmente ocuparam áreas de 28%, 71% e 1% da bacia regional. Estas contribuições de cargas indicam que, em termos médios anuais, os diferentes usos interferem de forma diferente no balanço de massas total de uma bacia média. As produções, ou cargas específicas por unidade de área fonte geradora, apresentaram resultados expressivamente diferentes, isto é valores médios anuais de nitrogênio total de: 3 (floresta), 26 (agrícola) e 110 (urbana) Kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Esses valores representam uma relação aproximada, em termos de aumento de produção por área fonte, de 1 : 8 : 37. Em termos de nitrogênio total, a produção de carga antrópica de uma área urbana equivale, a 37 vezes a produção de carga natural de uma área de floresta e mais de 4 vezes a produção agrícola, sendo que esta última produz uma poluição difusa, em média, 8 vezes superior à das florestas. Completando o estudo, as **Tabelas 1.2, 1.3 e 1.4** apresentam os resultados para os parâmetros de POI, SST e CI-“a”, respectivamente.

**Tabela 1.1** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de NT

| Condição         |                                 |                                   | Produção<br>média<br>espacial<br>(Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | Contribuições das cargas por<br>fonte geradora: |                 |               | Carga mé-<br>dia<br>(ton ano <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|-----------------|---------------|--|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) |   | Floresta<br>(%)                                 | Agrícola<br>(%) | Urbana<br>(%) |  |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 10,6 ± 0,2  | 18  | 63              | 19            | 127 ± 2                                      |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | 8,7 ± 0,1   | 20  | 67              | 13            | 109 ± 1                                      |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 7,1 ± 0,6   | 34  | 60              | 6             | 89 ± 8                                       |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | 15,8 ± 0,2  | 12  | 83              | 5             | 197 ± 3                                      |

**Tabela 1.1** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de NT (cont.)

| Condição         |                                 |                                   | Produção de fontes poluidoras (Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) |                               |        |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------|--------|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) | Floresta<br>média [mín.-máx.]  | Agrícola<br>média [mín.-máx.] | Urbana |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 2,9 [2,8 - 9,2]  | 23,4 [4,5 - 498,3]            | 194,3  |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | 2,6 [2,5 - 8,5]  | 20,5 [8,2 - 470,3]            | 114,8  |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 3,8 [3,7 - 12,4]   | 17,0 [8,2 - 398,2]            | 52,5   |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | 2,6 [2,5 - 8,4]  | 45,4 [7,4 - 801,0]            | 82,2   |

**Tabela 1.2** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de **POI**

| Condição         |                                 |                                   | Produção média<br>(Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | Contribuições das cargas por fonte geradora: |                 |               | Carga média<br>(ton ano <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|-----------------|---------------|---|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) |  | Floresta<br>(%)                              | Agrícola<br>(%) | Urbana<br>(%) |   |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 0,0209   | 42   | 14              | 44            | 0,26                                    |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | 0,0313   | 23   | 53              | 24            | 0,43                                    |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 0,0403   | 21   | 48              | 31            | 0,54                                    |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | 0,2688   | 3  | 62              | 34            | 3,34                                    |

**Tabela 1.2** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de **POI** (cont.)

| Condição         |                                 |                                   | Produção de fontes poluidoras (Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) |                               |        |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------|--------|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) | Floresta<br>média [ máx. ]   | Agrícola<br>média [mín.-máx.] | Urbana |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 0,009 [0,013]  | 0,844 [0,004 – 0,630]         | 0,964  |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | 0,012 [0,038]  | 0,064 [0,034 – 1,172]         | 0,874  |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 0,014 [0,061]  | 0,059 [0,069 – 1,504]         | 0,503  |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | 0,016 [0,040]  | 0,058[0,240 – 3,420]          | 9,600  |



**Tabela 1.3** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de SST

| Condição         |                                 |                                   | Produção média<br>(Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | Contribuições das cargas por fonte geradora: |                 |               | Carga média<br>(ton ano <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|-----------------|---------------|---|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) |  | Floresta<br>(%)                              | Agrícola<br>(%) | Urbana<br>(%) |   |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 6,10   | 54   | 40              | 6             | 76,23                                   |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | 10,12  | 18   | 20              | 62            | 127,12                                  |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 9,95   | 40   | 57              | 3             | 123,90                                  |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | 394,70   | 1  | 83              | 16            | 4928,40                                 |

**Tabela 1.3** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de SST (cont.)

| Condição         |                                 |                                   | Produção de fontes poluidoras (Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) |                               |        |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------|--------|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) | Floresta<br>média [mín.-máx.]  | Agrícola<br>média [mín.-máx.] | Urbana |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 2,9 [2,8 - 9,2]  | 23,4 [4,5 - 498,3]            | 194,3  |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | 14,8 [3,0 - 61,5]  | 14,8 [9,8 - 409,3]            | 502,6  |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 7,2 [5,2 - 17,2]   | 15,1 [8,2 - 398,2]            | 26,5   |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | 4,7 [3,5 - 11,8]   | 1147,4 [685,0 - 7147,4]       | 6723,6 |

**Tabela 1.4** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de **Clorofila "a"**

| Condição         |                                 |                                   | Produção média<br>dia<br>(Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | Contribuições das cargas por fonte geradora: |                 |               | Carga média<br>(ton ano <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|--|-----------------|---------------|---|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) |   | Floresta<br>(%)                              | Agrícola<br>(%) | Urbana<br>(%) |   |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 10,100  | 72   | 26              | 1             | 0,128                                   |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | 0,001   | 4  | 60              | 36            | 0,015                                   |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 0,002   | 63   | 11              | 26            | 0,024                                   |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | 0,034   | 0  | 100             | 0             | 0,434                                   |

**Tabela 1.4** Dinâmica espaço-temporal das cargas de fontes difusas de **Clorofila "a"** (cont.)

| Condição         |                                 |                                   | Produção de fontes poluidoras (Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) |                               |        |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------|--------|
| <i>T</i><br>(°C) | <i>IPA</i> <sub>7</sub><br>(mm) | <i>Rad</i><br>(Wm <sup>-2</sup> ) | Floresta<br>média [máx.]   | Agrícola<br>média [mín.-máx.] | Urbana |
| 18,6             | 9,7                             | 101                               | 0,010 [0,013]  | 0,023 [0,010 - 1,417]         | 0,015  |
| 27,8             | 15,6                            | 252                               | ≈ 0 [0,003]  | 0,005 [0,000 - 0,046]         | 0,089  |
| 25,2             | 0,0                             | 193                               | 0,002 [0,003]  | 0,001 [0,000 - 0,002]         | 0,041  |
| 16,4             | 62,6                            | 26                                | ≈ 0 [0,000]  | 0,122 [0,000 - 1,090]         | ≈ 0    |

As cargas pontuais para NT, POI e SST foram estimadas a partir da comparação gráfica entre os resultados regionais do balanço de massas para cargas difusas (Tabelas 1.1, 1.2, e 1.3) em contraste com os resultados apresentados na Figura 1.1. Nesse sentido, foram utilizadas os valores maximizados de produção estimados nas tabelas mencionadas, do sistema Canha, em virtude de terem sido encontradas em bacia cuja área de drenagem é próxima ao valor mencionado na seção 1.1, de 100 Km<sup>2</sup>. Esses valores foram comparados com os valores médios da produção total no sistema Jacupiranguinha. Por outro lado, as cargas difusas nessa área de controle é composta por aportes de áreas de florestas, agrícolas e urbanas. Ou seja, as componentes difusas destes usos e ocupações. As equações de balanço geral são, para resultados totais, cargas difusas e pontuais, respectivamente de  $Y_T = Y_d + \Delta Y_p$  e  $Q_T^* = Q_d^* + \Delta Q_p^*$ . Os valores de  $Q_d^*$  foram maximizados para 20 L·s<sup>-1</sup>·Km<sup>-2</sup>, que corresponde a uma permanência de vazões maiores de 10%, e foram tomados os valores médios de produção do sistema Jacupiranguinha. Os resultados da Tabela 1.7 mostram que, sob condições de equilíbrio e homogeneidade hidrológica de bacias, e para produção de cargas difusas em bacias com uma ocupação de florestas (28%), agricultura (71%) e urbano (1%), novas cargas de fontes pontuais podem representar em torno de 88%, 99% e 84% de nitrogênio total, fosfato inorgânico e sólidos suspensos totais incorporados nos corpos de água.

Tabela 1.7 Estimativas de cargas difusas e pontuais para condição  $Prob[Q \geq 20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Km}^{-2}] = 10\%$

|                                  | NT                                       |      | POI                                      |       | SST                                      |       |
|----------------------------------|--|------|--|-------|--|-------|
|                                  | (Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | (%)  | (Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | (%)   | (Kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | (%)   |
| $Y_d (Q_d^* = 20)$               | 16                                       | 17,8 | 0,27                                     | 0,4   | 395                                      | 15,3  |
| $\Delta Y_p (\Delta Q_p^* = 60)$ | 74                                       | 82,2 | 66,73                                    | 99,6  | 2189                                     | 84,7  |
| $Y_T (Q_T^* = 80)$               | 90                                       | 100  | 67,00                                    | 100,0 | 2584                                     | 100,0 |

### 1.3 Síntese

A discriminação de cargas pontuais e difusas, sob a hipótese de similaridade regional ou homogeneidade hidrológica levanta a reflexão da forma de manejo regional das micro-bacias sob análise. No entanto, conforme a limitação da metodologia usada a partir da expressão (1) e (2), estes resultados indicam os acréscimos de cargas pontuais  $\Delta YNT_p$ ,  $\Delta POI_p$ , e  $\Delta YSST_p$ , sem discriminar as fontes nem os locais. No entanto, Benassi (2006) e Almeida-Neto(2007) identificaram possíveis fontes de cargas poluidoras pontuais, de forma isolada de outras possíveis fontes pontuais, e que vertiam mais uma vazão equivalente a 55% da vazão de montante ao ponto de lançamento e cujos lançamentos apresentavam valores de condutividade elétrica 7 superiores daquela representativa do corpo receptor. Dessa maneira, é prioritário testar e validar estes valores apresentados na Figura 1.1 e Tabela 1.7, de maneira de corroborar se existem regras de operação de lançamento sincronizadas com o regime fluvial do rio. Essas evidências escapam ao alcance deste relatório. Por outro lado, em termos de cargas difusas, a síntese apresentada nas Tabelas 1.1 a 1.4 é relacionada com **NT**, **POI**, **SST** e **CI-“a”**, embora com valores distintos e alcances diferentes. Para balanços de massa sazonais, na escala regional, estimados com baixos erros relativos das cargas estimadas e observadas (erro mínimo de 0,5% e máximo de 9,5%), a relação entre as produções de nitrogênio total para diferentes usos mostrou-se altamente variável durante um ciclo sazonal. Portanto, sugerem altas variações espaciais (“regionais”) das produções de cargas poluidoras. Em termos gerais, os resultados indicaram que as relações variaram, na forma apresentada na **Tabela 1.8**. Nesta tabela, os sinais da quarta coluna indicam as condições de referência da produção de carga natural de floresta, de ser próxima (+/-), menor (-) ou maior (+) em relação à sua produção média anual.

É interessante observar alguns aspectos em função da área fonte de cargas: as variações internas das produções (**Tabela 1.1**) e a localização sazonal de máximos e mínimos de produção. Por um lado, as variações internas de produção, para diferentes áreas incrementais de bacia e para uma mesma área fonte, é muito significativa. Por exemplo, a máxima amplitude observada para a fonte agrícola teve variação espacial em 108 vezes ( $= 801,0 / 7,4$ ), que ocorreu em condições de alta umidade inicial e baixa temperatura, típicas de uma produção em condições de baixa evapotranspiração potencial, com uma provável menor fixação de nutrientes no solo agrícola e com maior suscetibilidade à erosão. Sob essas condições peculiares, as florestas, com menor taxa de produção sazonal (-), produziram 18 e 32 vezes menos nitrogênio total que as áreas agrícolas e áreas urbanas, respectivamente. À diferença desta condição, embora ainda com as florestas apre-

sentando taxas sazonais menores, e caso aumentasse a temperatura e radiação incidente e tivesse uma umidade antecedente menor, e a produção de cargas das áreas agrícolas e urbanas representariam 8 e 44 vezes a produção de florestas. Disto, as taxas de produção de florestas de máximo comportamento sazonal corresponderam para condições de baixíssima ( $IPA_7 = 0,0$  mm) umidade antecedente, altas temperaturas e radiações. Nesse caso, houve a maior aproximação, com a produção agrícola e urbana representando 5 e 14 vezes a produção de florestas, respectivamente. Um aspecto interessante destacou que a produção urbana e produção agrícola de nitrogênio total foram inversamente proporcionais com a temperatura ambiente, porém sob situações de excessos hídricos, houve distinções de produção entre ambos: as áreas agrícolas aumentaram sua produção de forma mais acelerada que a de área urbana. Este comportamento diferenciado sob efeitos de chuvas intensas indicou que as diferenças de transporte e deposição de nitrogênio total, sobretudo em áreas agrícolas, estão ligados rapidamente aos canais da rede de drenagem, o que explica o aumento substancial de cargas de origem rural, não florestal. As contribuições parciais de SST, POI e Clorofila "a" são motivos de um artigo (em preparação), no entanto os resultados são similares aos apresentados na tabela anterior e devem ser corroborados em termos de cenários ambientais.

**Tabela 1.8**– Síntese da produção de NT comparada à produção sazonal em área de florestas.

| Produção relativa de área fonte: |          |        | Referência sazonal | Condições iniciais |              |                     |
|----------------------------------|----------|--------|--------------------|--------------------|--------------|---------------------|
| Floresta                         | Agrícola | Urbano |                    | $T$ (°C)           | $IPA_7$ (mm) | $Rad$ ( $Wm^{-2}$ ) |
| 1                                | 8        | 67     | +/-                | 18,6               | 9,7          | 101                 |
| 1                                | 8        | 44     | -                  | 27,8               | 15,6         | 252                 |
| 1                                | 5        | 14     | +                  | 25,2               | 0,0          | 193                 |
| 1                                | 18       | 32     | -                  | 16,4               | 62,6         | 26                  |

## **2- Cenários ambientais**

Esta seção tem como objetivo principal a utilização das cargas regionais na proposição de cenários que visem estimativas da depuração natural de cargas poluidoras, sejam naturais e/ou antrópicas, sobre as micro-bacias analisadas.

### **2.1 Metodologia**

A metodologia consiste em propor condições que relacionam o regime fluvial médio, esperado regionalmente nas micro-bacias analisadas, e sua relação com os resultados de cargas descritas nas seções anteriores. Em primeiro lugar, estima-se o regime fluvial regional esperado para as micro-bacias e sua relação com as cargas regionais observadas e estimadas nas micro-bacias. A continuação, apresenta-se um dimensionamento gráfico que permita relacionar as mudanças de regime fluvial, e das respectivas cargas regionais, a partir de variabilidade climática e de possíveis mudanças no uso do solo, assim como possíveis comportamentos mistos.

#### **2.1.1 Regime fluvial e cargas regionais**

O regime fluvial esperado regionalmente pode ser representado por curvas de permanência regionalizadas. Na hipótese que as micro-bacias estudadas pertençam à uma região hidrológica homogênea, que integre aspectos de geologia, clima e relevo característicos, é possível estimar com boa precisão as condições de regime fluvial a partir de condições de um contínuo fluvial, isto é com mínimas ou nulas interferências no transporte de cargas e com reduzidas ou nulas retiradas pontuais de água superficial a partir dos cursos d'água. Caso houver valores conhecidos de demanda (não levantados neste estudo), podem-se introduzir e reavaliar os cálculos. Para uma situação normal, estudos de regionalização hidrológica são adequados para esta fase de cenários, com precisão aceitável, e com uma descrição da relação de processos de quantidade e de qualidade d'água.

Através do uso da técnica da regionalização hidrológica, é possível estimar as seguintes variáveis hidrológicas: (1) Vazão média de longo período ( $Q_{lp}$ ), (2) Vazão mínima associada à permanência de vazões entre 5% (Q5%) e 100% (Q100%) de duração anual. Outras vazões características, como vazão mínima de sete dias associada à probabilidade de ocorrência de 10 anos de tempo de retorno ( $Q_{7,10}$ ) é também possível. A limitação da metodologia de regionalização de curva de

permanência reside em dois aspectos: primeiro, são homogeneizados os comportamentos peculiares de alguma bacia característica, mantendo um comportamento regional médio entre várias bacias vizinhas; segundo, há um razoável bom ajuste aos comportamentos de regime fluvial para condições de não-extravazamento do rio para a planície de inundação ou várzeas ribeirinhas. Esta situação embora importante para as condições de indicadores de sustentabilidade (ver seção 3), pode ser estimada a partir de um comportamento tendencial observado na própria curva de permanência, e sobretudo a partir de dados coletados em campanhas amostrais. Em síntese, a abordagem de regionalização de curva de permanência é de uso corrente para as condições de variação de regime interno ao canal principal e com uso restritivo para as condições de alagamento de várzeas.

Através de estudos realizados pelo DAEE em 1983 (SIGRH, 2000), verificou-se que a descarga média pluri-anual, numa dada seção de um curso de água, pode ser obtida com boa aproximação, através de relação linear dessa vazão, denominada vazão média de longo período  $Q_{lp}$  com o total anual médio precipitado na bacia hidrográfica:

$$Q_{lp} = (\hat{a} + \hat{b} \cdot \bar{P}) \cdot A \quad (3)$$

onde  $\hat{a}$  e  $\hat{b}$  são parâmetros da reta de regressão,  $\bar{P}$  é a precipitação média anual [mm],  $A$  é a área da bacia [Km<sup>2</sup>] e  $Q_{lp}$  em [L s<sup>-1</sup>]. Para a UGHRI 4 os parâmetros são (DAEE, 2001):  $\hat{a} = -22,14$  e  $\hat{b} = 0,0292$ .

A obtenção da curva de permanência de vazões numa seção é a resposta para a amplitude das vazões para os regimes hidrológicos, associada a frequência (ou número de vezes) que ela é excedida. Para que os resultados pudessem ser comparados, as séries originais foram padronizadas dividindo-se as vazões mensais pela média de longo período da série ( $Q_{lp}$ ). Assim, a variável padronizada é definida por:

(3).

$$q_{p\%} = \frac{Q_{p\%}}{Q_{lp}}$$

Para a UGHRI-4 estes valores adimensionais variam conforme a probabilidade de excedência, de acordo com a **Tabela 2.1**.

**Tabela 2.1** Curva de permanência adimensional para as micro-bacias de estudo (DAEE, 2000)

| Prob(%)   | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 95   | 100  |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $q_{p\%}$ | 1,95 | 1,60 | 1,27 | 1,11 | 1,00 | 0,90 | 0,82 | 0,73 | 0,65 | 0,56 | 0,51 | 0,42 |

### 2.1.1 Variabilidade climática

As possíveis variabilidades climáticas foram analisadas para diferentes horizontes temporais, para  $t = 2008$  (situação atual), 2025, 2050 e 2100. Para análise de variabilidade temporal assume-se que previsões de aumento de temperatura regional ( $\Delta T$ ) a partir de modelos globais, incidem no limite de tensão de vapor de saturação ( $e_s$ ), na forma:

$$e_s(t, T + \Delta T) = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,37 \cdot (T + \Delta T)}{237,3 + (T + \Delta T)}\right) \quad (4),$$

em que a temperatura média esta em °C e a pressão de vapor em Pa. Para esses horizontes, supõe-se que a pressão de vapor de água na atmosfera tenha uma variação muito menor que a variação da tensão de vapor de saturação e, portanto, assume-se que  $e(t) \approx$  constante. Dessa maneira, a mudança da pressão de vapor de saturação acarretará uma variação esperada na umidade relativa média regional, na forma de

$$UR(t) = \frac{e(t)}{e_s(t, T)} \quad (5).$$



Regionalmente, há um bom ajuste entre os valores de umidade relativa média mensal e anual, com os valores respectivos de precipitações,  $P$ . Macedo (2005) ajustou valores regionais de  $UR$  e  $P$ , para uma região hidrologicamente homogênea no Estado de São Paulo, propondo uma equação de terceira ordem do tipo:

$$P(t) = 0,004 \cdot (UR(t))^3 - 0,4965 \cdot (UR(t))^2 + 21,398 \cdot (UR(t)) - 249,41, \text{ com } R^2 = 95.$$

Sob condições de regime anual, a mesma curva apresenta bons resultados para estimativas de médias anuais, isto é relacionando  $UR(t) \rightarrow \bar{P}(t)$ . Perceba-se que a variação da precipitação média anual acarretará uma mudança na vazão média de longo período, isto é  $\bar{P}(t) \rightarrow Q_p(t)$  e portanto nos valores adimensionais da curva de permanência regional, na forma  $q_p\%(t)$ , para todas as probabilidades estimadas originalmente na curva de permanência. Em suma, a variabilidade climática de temperaturas terá um impacto no regime fluvial médio esperado das condições futuras e de forma proporcional, e através de critérios conceituais de hidrometeorologia associados a um critério de causa-efeito entre precipitações médias e vazões médias esperadas no longo período. Nessa hipótese causal, variações gradativas nas vazões de longo período, e das vazões características do regime de permanência, são permitidas. Por outro lado, as curvas de permanência para vazões adimensionais supõem-se representativas do equilíbrio regional, mantendo a homogeneidade hidrológica entre as bacias vizinhas.

A carga natural de um parâmetro ou a produção (carga específica por unidade de área) nas bacias estudadas também são incluídas nesta metodologia. Uma produção, expressada na forma

$$Y_{i,j} = C_{i,j} \cdot Q_{i,j} \cdot A_i^{-1},$$

correspondente à  $i$ -ésima bacia de drenagem com área  $A_i$  e estimada ou observada para uma  $j$ -ésima condição sazonal, e pode ser associada à vazão específica correspondente,

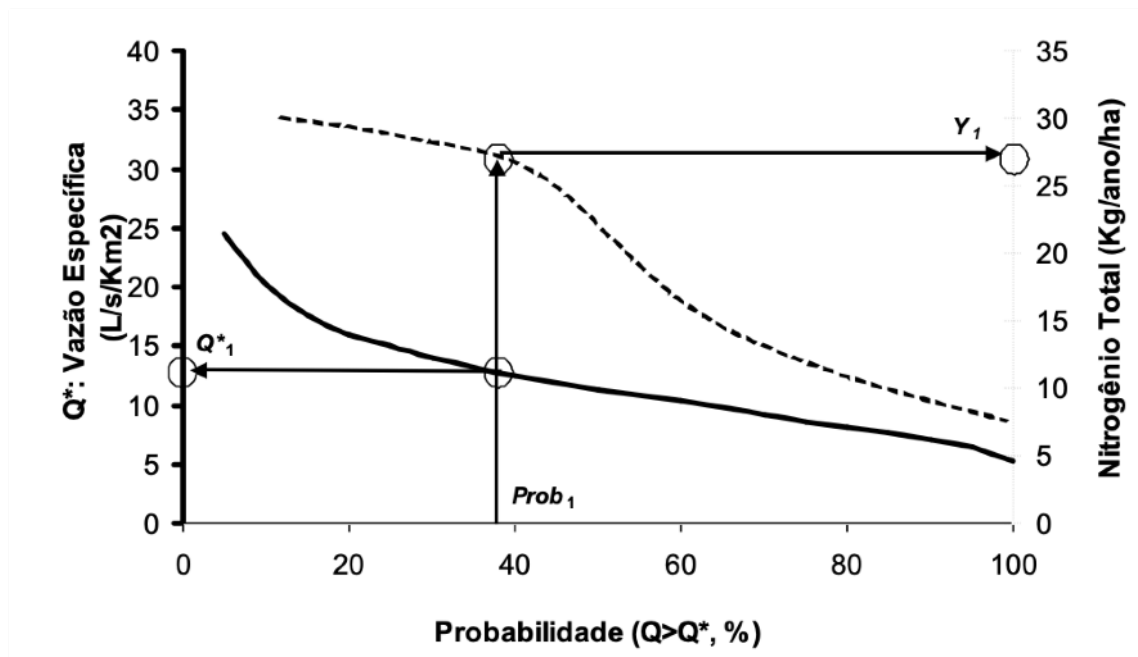
$$Q_{i,j}^* = Q_{i,j} \cdot A_i^{-1},$$

para a mesma probabilidade de permanência, isto é:

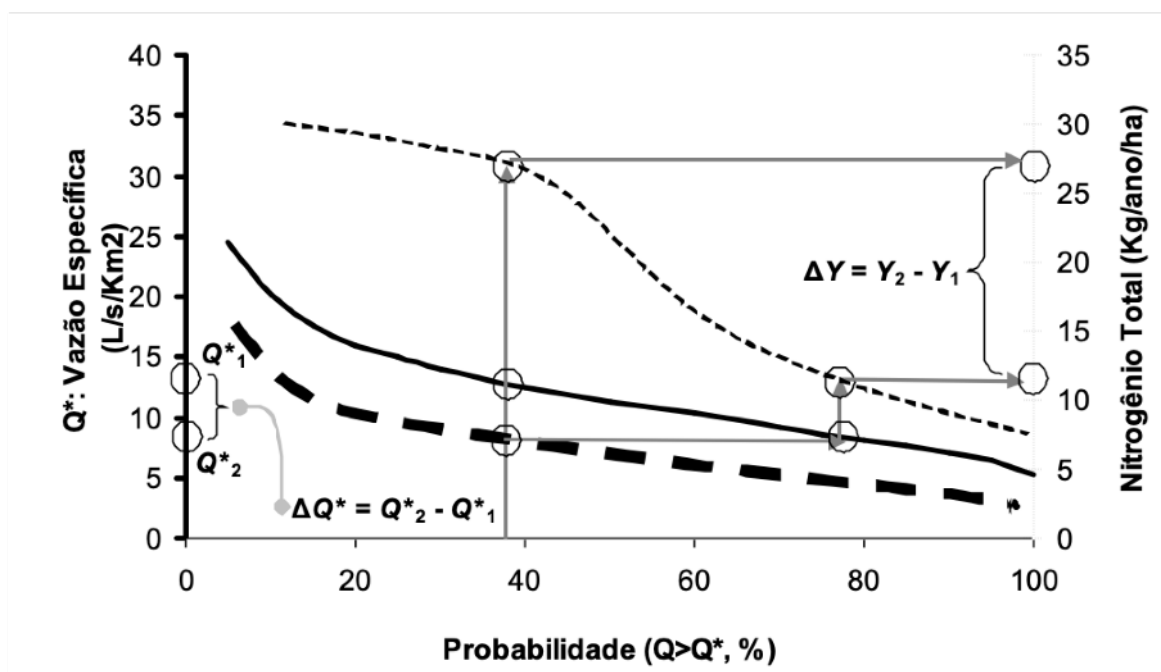
$$Q^*_{i,j}(Prob) \rightarrow q_p\% \text{ (curva de permanência)} \rightarrow Y_{i,j}(Prob).$$

A **Figura 2.1** apresenta o conceito de relação dual, entre aspectos quantitativos e qualitativos, graficamente. O método tem a limitação de que atribui, conforme a dinâmica sazonal, intervalos de variação aos valores de produção  $Y_{i,j}$  das cargas sob análise. Por outro lado, permite supor que os processos encontram-se em equilíbrio dinâmico, ou seja que uma região hidrologicamente homogênea mantém um processo de causa-comum entre parâmetros de quantidade e de qualidade de água. Esta hipótese interpreta que, sob condições de variabilidade de regime fluvial futuro, por causa da variabilidade climática e/ou do uso do solo, as relações quali-quantitativas se manterão, embora as magnitudes entre aspectos quali-quantitativos alcancem um novo equilíbrio dinâmico, imposto pelas mudanças exógenas do clima, do uso do solo, ou de uma interação entre ambas. Para o exemplo apresentado na **Figura 2.1**, para uma permanência de 37% de vazões ( $Prob=37\%$ ), espera-se que as vazões específicas nessa seção do rio sejam maiores ou iguais a  $12,5 \text{ L s}^{-1} \text{ Km}^{-2}$  e a produção de nitrogênio total, para a mesma seção do rio, estima-se em  $27 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

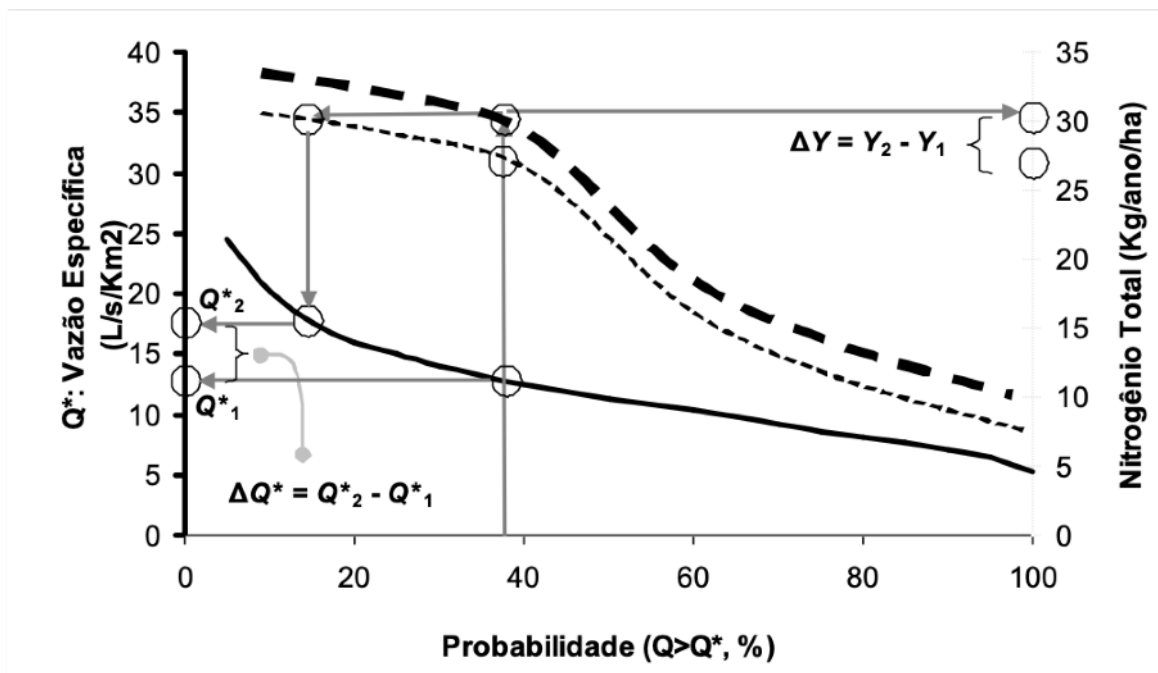
A **Figura 2.2** apresenta, para a mesma permanência de vazões da Figura 2.1, a estimativa de mudanças de regime fluvial, com uma curva de permanência sob impacto de variabilidade climática, a partir de aumento de temperatura média, de diminuição da umidade relativa futura e, portanto, diminuição da precipitação média e vazão de longo período. Portanto, para essa nova condição, esperam-se uma diminuição de vazão específica ( $-\Delta Q^*$ ) e de produção específica ( $\Delta Y$ ). Por outro lado, a **Figura 2.3** apresenta um cenário de mudança de uso do solo, que aumenta a produção de carga poluidora ( $+\Delta Y$ ), e afeta a quantidade de escoamento.



**Figura 2.1** Equilíbrio dinâmico através da relação dual do regime fluvial de permanências (abs-cissa) com os aspectos quantitativos (vazão específica, à esquerda, linha contínua) e qualitativos (produção de cargas poluidoras, à direita, linha de traços).



**Figura 2.2** - Exemplo de novo cenário de variabilidade climática afeta a permanência de vazão específica (linha de traços, em negrito,  $\Delta Q^* = Q^*_2 - Q^*_1$ ) e repercute na produção de carga poluidora ( $\Delta Y = Y_2 - Y_1$ ).



**Figura 2.3-** Exemplo de novo cenário de mudança de uso do solo que afeta a produção de carga poluidora (+ $\Delta Y$ , linha de traços, em negrito) e a permanência de vazão específica (+ $\Delta Q^*$ ).

As anteriores abordagens determinísticas de cenários para cargas difusas baseiam-se na equação básica relacionada por:

$$Y_D = \frac{C_D \cdot Q}{A_{bacia}} = \frac{\sum_{k=1}^M Y_{bacia_{i,j,k}} \cdot (A_{i,k})}{A_{bacia}} \quad (6).$$

Portanto, uma variação na produção de cargas difusas no rio ( $\Delta Y_D$ ) está associada a uma variação de vazão específica ( $\Delta Q^*$ ) e de novas áreas de uso e ocupação do solo ( $\Delta A_{k=1}$ ), que introduzem novas cargas específicas, através de uma expressão que relacione a derivada matemática da expressão (6), da forma (para  $M_D=2$ , onde o subíndice “D” identifica condição de carga difusa):

$$\Delta Y_d \approx \frac{\partial Y_D}{\partial C_D} \cdot \Delta C_D + \frac{\partial Y_D}{\partial Q} \cdot \Delta Q = \frac{Y_{1(D)} \cdot (A_1 + \Delta A_1) + Y_{2(D)} \cdot (A_2 - \Delta A_1)}{A_{bacia}}$$

$$\frac{Q_D}{A_{bacia}} \cdot \Delta C_D + \frac{C_D}{A_{bacia}} \cdot \Delta Q = \frac{Y_{k=1(D)} \cdot (A_{k=1} + \Delta A_{k=1}) + Y_{k=2(D)} \cdot (A_{k=2} - \Delta A_{k=1})}{A_{bacia}} \quad (7).$$

Rearranjando a equação (7), uma variação na concentração do parâmetro pode ser estimada da forma:

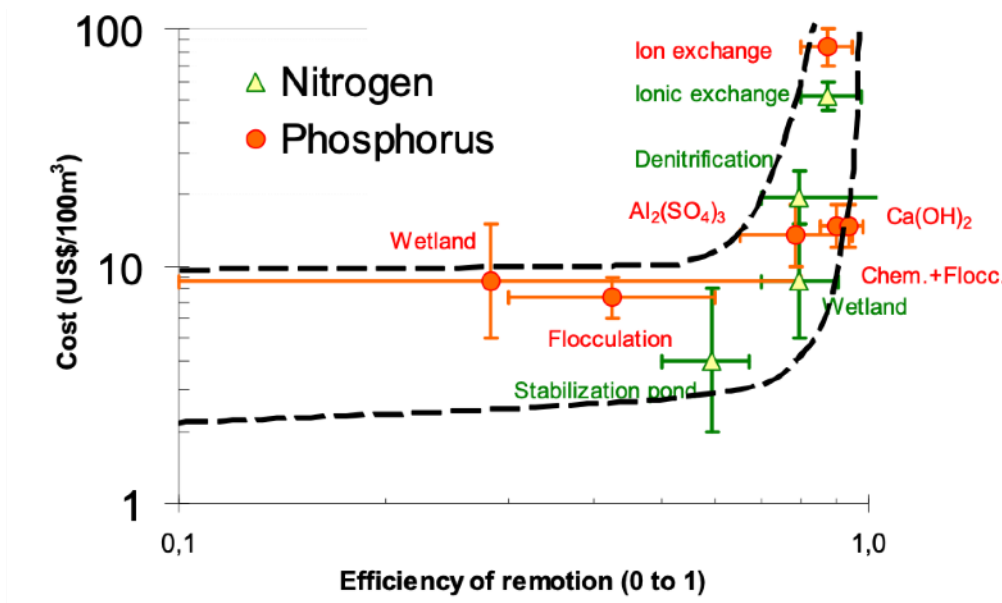
$$\Delta C_D = C_{novo} - C_D = \left[ \frac{Y_{1(D)} \cdot (A_1 + \Delta A_1) + Y_{2(D)} \cdot (A_2 - \Delta A_1)}{A_{bacia}} - \frac{C_D}{A_{bacia}} \cdot \Delta Q \right] \frac{A_{bacia}}{Q_D} \quad (8).$$

A equação (8) equivale a um processo de aumento de concentração, de forma similar a um processo de eutrofização, por exemplo: aumentos de fósforo e nitrogênio no corpo hídrico receptor devido a um descontrole de uso e ocupação da bacia de drenagem. Para uma política de manejo de bacia, uma expectativa de mudança da concentração média de um parâmetro em um ambiente fluvial da equação (8), que diminuiria a qualidade do corpo hídrico, pode estar associado ao preparo tecnológico de melhoria de eficiência de tratamento. Nesse caso, as instituições responsáveis de captação e distribuição deveriam investir em tecnologias que reverterem essa diminuição de qualidade a partir de um aumento de eficiência ( $\Delta E$ ) equivalente à perda de qualidade, isto é, uma eficiência de remoção definida como:

$$\Delta E(C_D) = \frac{|C_{novo} - C_D|}{C_{novo}} \quad (9).$$

As eficiências de tratamento têm um custo conforme a tecnologia utilizada e conforme o padrão de qualidade almejado pelos setores usuários. Frequentemente, estudos diversos identificam custos de tratamentos associados às eficiências para atendimento de setores localizados em áreas urbanas. Mendiondo (2008), na revisão de diversos métodos, apresentou uma síntese de estudos da literatura que apresentam eficiências de remoção conforme tecnologias variadas para remover teores de fósforo e nitrogênio. A **Figura 2.4** apresenta os custos médios (ordenadas) e eficiências de remoção (abscissas) de NT e POI usando tecnologias que variam desde as mais baratas e, em geral, menos eficientes, até as mais caras e mais eficientes. Na **Figura 2.4** aparecem relacionados os valores para lagoas de estabilização, várzeas artificiais, adição de sulfato de alumínio, processos biológico-químicos de desnitrificação, adição de hidróxido de cálcio, adição química para floculação, e intercâmbio iônico. Vários autores discutem a generalidade destes custos, de-

vido às diversas condições climáticas, hidráulicas e de operação que, na maioria das vezes, são muito diferentes para sistemas, em teoria, tecnologicamente similares. No entanto, é possível utilizar estas estimativas no roteiro de cenários ambientais de maneira de associar mudanças de uso do solo com perdas de qualidade de água e aumento de custos de tratamento.



**Figura 2.4** Custos e eficiências de tratamento de tecnologias de remoção de cargas NT e POI. Fonte: Mendiondo (2008).

Em síntese, os cenários podem ser resumidos em etapas, circunscritas com setas, e processos, representados entre colchetes, da forma:

Para variabilidade climática (Fig.1.6) temos:

$$[\Delta T] \rightarrow [\Delta UR] \rightarrow [\Delta \bar{P}] \rightarrow [\Delta Q^*] \rightarrow [-\Delta Y] \rightarrow \Delta C_D \rightarrow \Delta E(C_D) \rightarrow \Delta \$ (E; tratamento) ;$$

para mudança de uso do solo (Fig.1.7) temos:

$$\left[ \sum_{k=1}^M \overbrace{Y_{i,j,k} \cdot (A_{i,k} + \Delta A_{i,k})}^{Lbacia_{i,j,k} + \Delta Lbacia} \right] \rightarrow [+ \Delta Y (Prob)] \rightarrow [+ \Delta Q^*] \rightarrow \Delta E(C_D) \rightarrow \Delta \$ (E; tratamento) .$$

### 2.1.2 Tipos de cenários

Os cenários futuros, para o período 2000-2100, de modificação do uso do solo correspondem a cenários globais propostos pela Avaliação Ecológica do Milênio e adaptados a regiões urbanas e peri-urbana. Nestes cenários, os serviços ambientais de fornecimento de bens, de suporte e de regulação de ciclos de vida na bacia hidrográfica têm características próprias quanto à natureza da política pública empregada no Plano de Bacia: política pró-ativa ou reativa, combinadas com políticas com instituições conectadas em escala espacial ou focada em empreendimentos pontuais e isolados (Mendonço, 2005). A seguir são apresentados dois cenários de uso e ocupação, ambos sujeitos às políticas de manejo em escala de bacia, sendo um deles do tipo “reativo” e outro “pró-ativo”.

**Cenário “Segurança alimentar e energética”:** Este cenário, de natureza reativa da política pública, prevê um aumento de urbanização e aumento de áreas agrícolas conforme tendências históricas. Este cenário tendencial de urbanização é observado no período 1940-2003 nas cidades do interior paulista (Mendes & Mendonço, 2007), com taxa de crescimento anual de +4 m<sup>2</sup> de urbanização por novo habitante na bacia, e uma reconversão agrícola para atender possível mercado emergente de biocombustíveis, como “*cash-crops*” de alto rendimento monetário.

**Cenário “Ecotecnologias”:** Este segundo cenário é pró-ativo e propõe um controle rigoroso no uso e ocupação da bacia. Assim, é trabalhada uma estabilização no crescimento demográfico, um estágio de verticalização da urbanização em áreas previamente urbanizadas, sem aumento expressivo dessas áreas no longo prazo, aliado a tecnologias que compensem a poluição difusa adicional desse nova tipologia de urbanização. Assim, as áreas rurais experimentam um retrocesso paulatino de áreas, historicamente, agrícolas, agora reconvertidas em áreas de florestas protegidas e sustentadas com fundos e/ou créditos “verdes” (de carbono, de água virtual, etc.). Detalhes deste cenário adaptado aparecem em Mendonço (2005).

As taxas de produções de NT, POI, SST e Cl-a são utilizadas a partir das Tabelas 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4, supondo uma condição inicial (2000-2008) com uma distribuição de uso e ocupação conforme relatados na **seção 1**. Em todos os cenários são trabalhados os horizontes de planejamento de 2025, 2050 e 2100. As modificações de cargas difusas e vazões específicas são limitadas à

existência, eventual, não prevista nesses cenários de implantações de empreendimentos específicos, em locais determinados da bacia, que implicam em uma adaptação das equações (1) a (8) e que inclui uma modelagem matemática distribuída espacialmente e com intervalos de tempo menores. Nas abordagens apresentadas neste relatório, esta modelagem é realizada conforme as hipóteses explicadas nas seções anteriores, cujas limitações e vantagens foram definidas. Finalmente, os custos para tratamento mensal consideraram uma captação de água com forçado aumento, progressivo no tempo, da eficiência média de tratamento, a partir de NT e POI, para se adaptar à estimada paulatina perda de qualidade de água nos parâmetros de concentração média do corpo de água da rede de drenagem.

## 2.2 Resultados e discussões

As Figuras 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 apresentam os equilíbrios dinâmicos da abordagem dual da curva de permanência de vazões específicas e cargas de NT, POI, SST e POI.

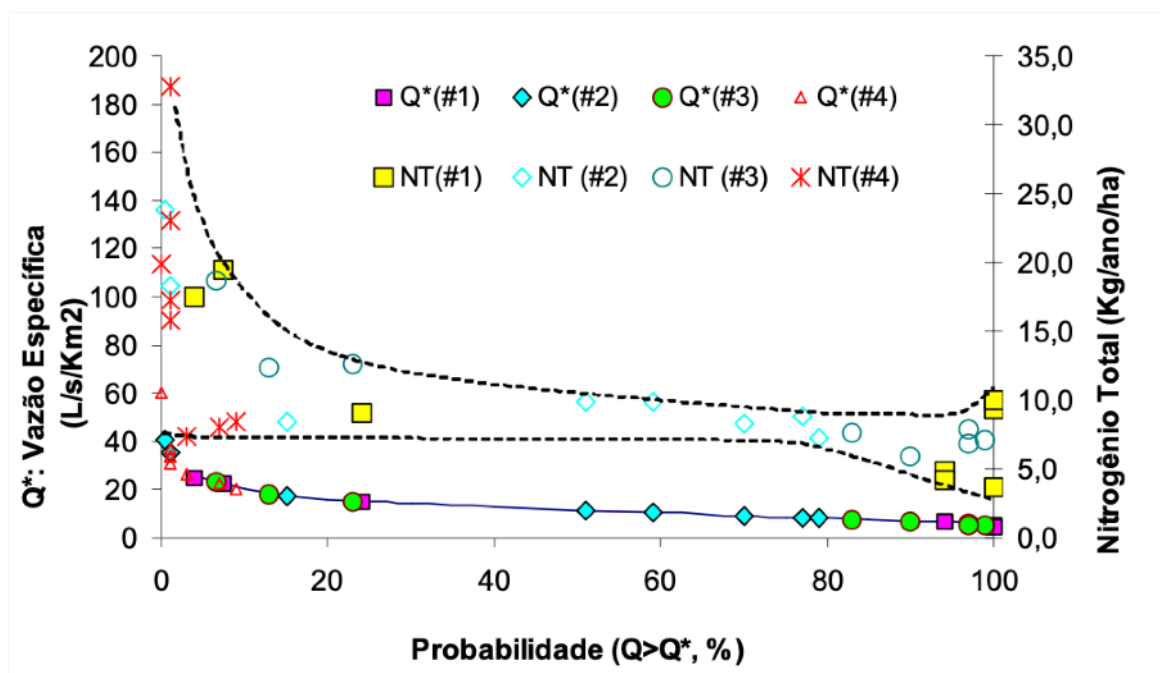


Figura 2.5 Equilíbrio dinâmico do comportamento dual para NT.



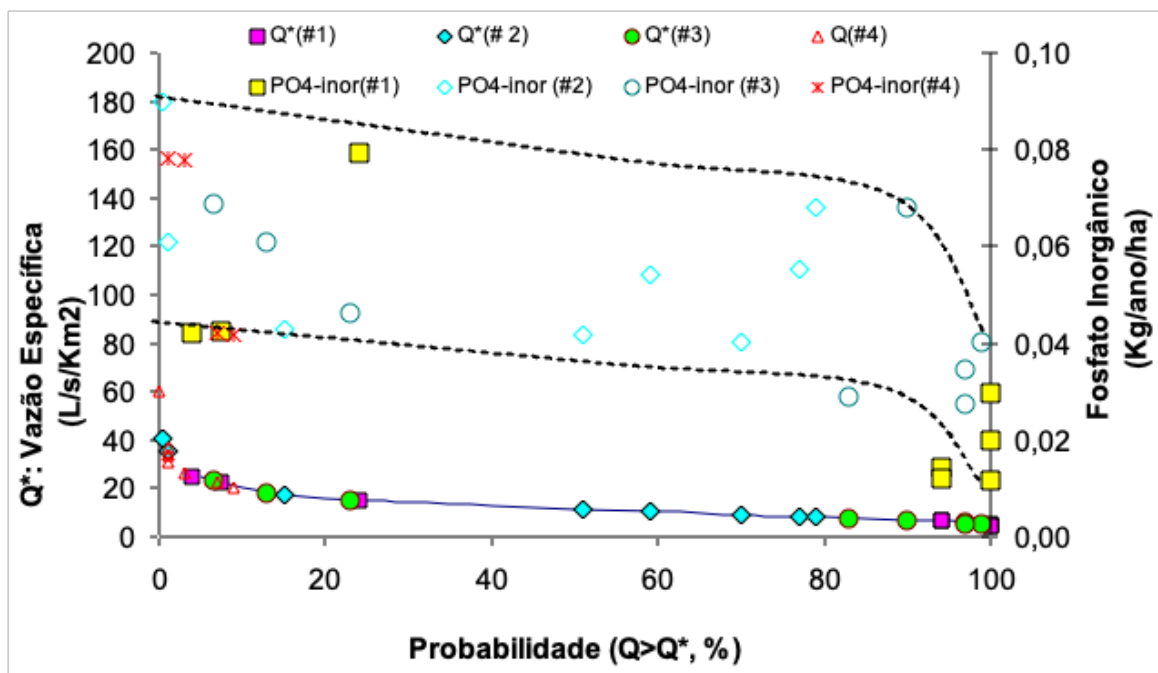


Figura 2.6 Equilíbrio dinâmico de comportamento dual para POI.

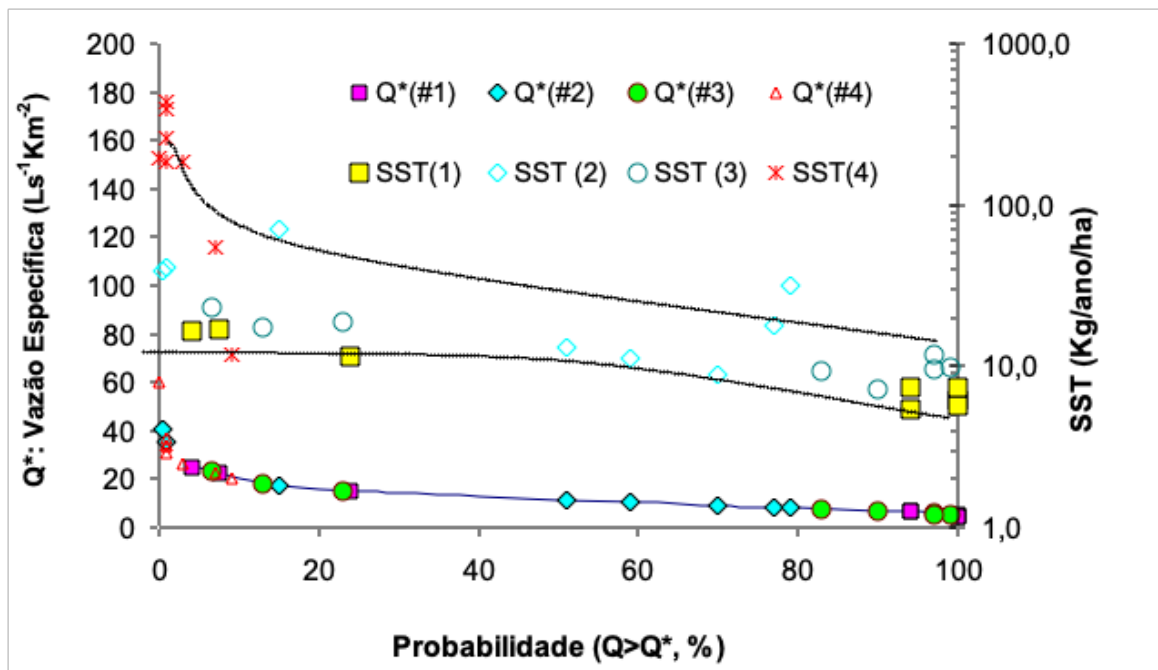
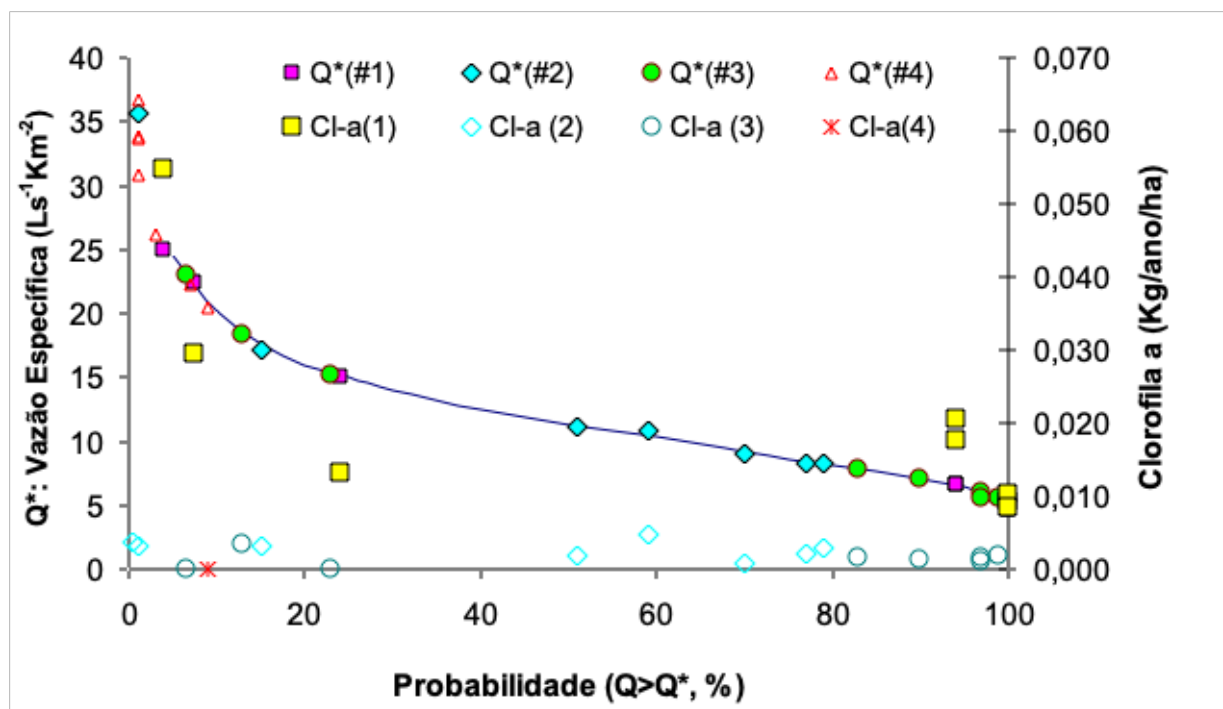


Figura 2.7 Equilíbrio dinâmico de comportamento dual para SST.



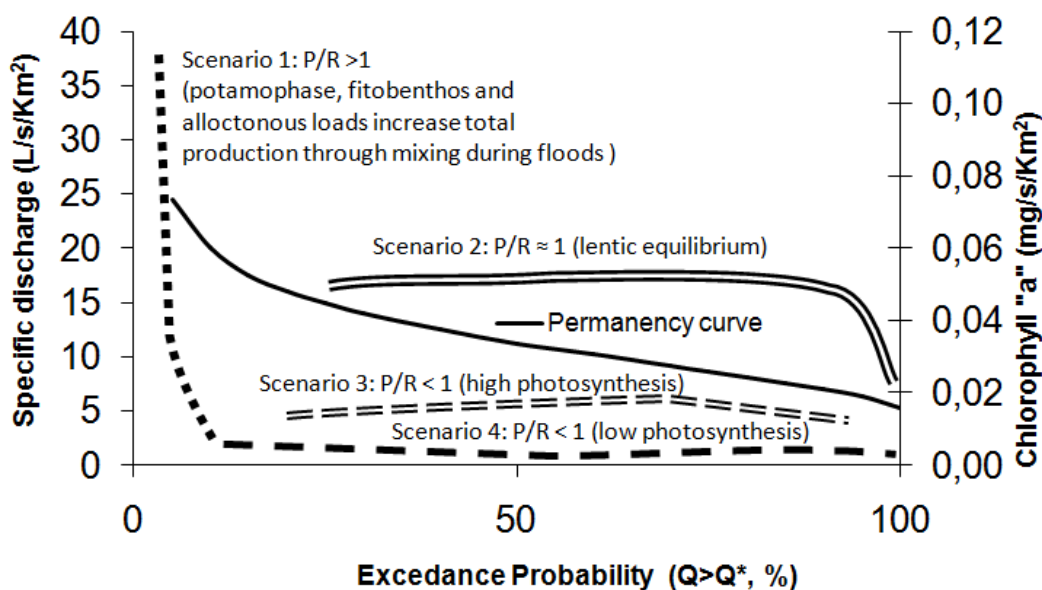
**Figura 2.8** Equilíbrio dinâmico de comportamento dual para Clorofila “a”.

A aplicação da metodologia de cenários tomou como base as estimativas de variabilidade climática para um intervalo de longo prazo, para os anos 2025, 2050 e 2100. As variações de temperatura ( $\Delta T$ ) correspondentes para esses horizontes foram de: -0,5, -1,0 e -2,0 °C, em relação à temperatura média ambiente da série histórica do período 1970-2000. Para estas variações de temperatura, as correspondentes diminuições de  $UR$ . Os resultados de NT, SST e POI indicam uma dispersão sazonal, que tem componentes aleatórias e determinísticas. Nesse último aspecto, os três parâmetros de produção de cargas difusas apresentam um crescimento com a diminuição da probabilidade de permanência, indicando que, ao aumentar as vazões, o balanço de massa regional pode ser interpretado como uma curva de efeitos cumulativos, em função da distribuição esperada das vazões em uma dada seção do rio. A baixa dispersão relativa de NT e SST, em comparação com os maiores desvios de produção de POI, indicariam a presença de efeitos difusos atuando com intensidades diferentes, embora com os mesmos usos do solo. No caso de Clorofila “a” evidencia-se quatro estágios característicos, interpretados como cenários de equilíbrio dinâmico que aparece na **Figura 2.9**. Um destes estágios correspondendo a altas vazões, portanto para um comportamento de potamofase, onde o fitobentos e cargas alóctonas transportadas no escoamento sob altas intensidades de chuva poderiam aumentar a produtividade total, devido à

mistura associada às altas taxas de turbulência, e mascarar uma situação de alta produtividade em relação ao consumo de matéria orgânica fosfatada, com um quociente “Produtividade/Consumo” (P/R) alto.

Os outros estágios correspondem a um comportamento de material autóctono do ecossistema ri-beirinho que reage de forma peculiar às cargas difusas que recebe da bacia. Por exemplo, um se-gundo estágio apresenta um cenário de equilíbrio com baixas velocidades nos canais principais da rede de drenagem e uma estável relação entre produção e consumo, que apenas decai o sufici-ente para vazões específicas baixas. Este segundo cenário de estabilidade dinâmica do sistema abrange um intervalo alto de vazões do regime fluvial, entre vazões de 25 a 90% da curva de permanência, e portanto representando uma condição básica do sistema. Na medida que aumenta a radiação e a temperatura, dois novos estágios aparecem (cenário 3 e cenário 4). Em ambos, a taxa de produção de matéria orgânica é menor que a de consumo, e no último cenário (4), esta relação é mínima. É importante salientar que estes dois cenários também são prováveis de ocor-rer em um intervalo amplo de vazões da curva de permanência e com pouca interação do rio para as várzeas. No primeiro cenário, esse comportamento se intensifica, a conectividade entre ambos compartimentos é máxima.

Na **Tabela 2.2** e **Tabela 2.3** aparecem estimativas de custos estimados de adaptação aos cenários previstos conforme variabilidade climática e mudanças de uso do solo (**Figura 2.10**). Foram uti-lizadas as taxas de produção identificadas nas Tabelas 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4, e estimados.



**Figura 2.9** Interpretação de estágios de cenários de clorofila “a” (Mendiondo, 2008).

**Tabela 2.2** Impactos dos cenários de variabilidade climática, sem mudança do uso do solo (1)

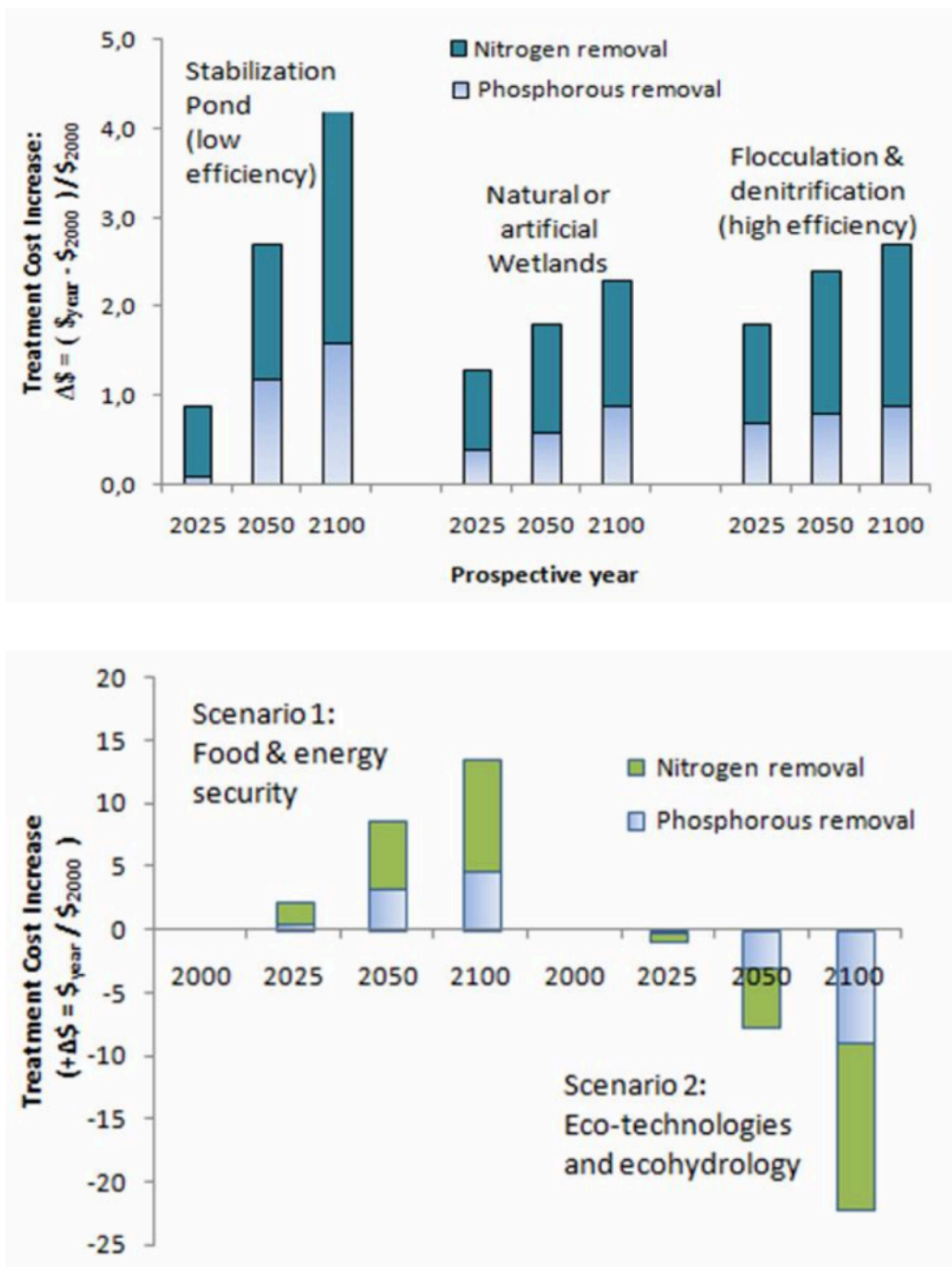
| Ano  | $\Delta T$<br>(°C) | $\Delta P$<br>(%) | $\Delta Q_{lp}$<br>(%) | $\Delta Y_{NT}$<br>(%) | $\Delta Y_{POI}$<br>(%) | $\Delta Y_{SST}$<br>(%) | $\Delta Y_{Clã}$<br>(%)(2) | $\Delta \$_{NT}$<br>x10 <sup>6</sup> R\$ | $\Delta \$_{POI}$<br>x10 <sup>6</sup> R\$ | $\$_{Total}$ (3)<br>x 10 <sup>6</sup> R\$ |
|--|--------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|--|---|---|
| Lagoas de Estabilização                      |                    |                   |                        |                        |                         |                         |                            |  |   |   |
| 2025   | +0,5               | -10               | 13,7                   | 6                      | 9                       | 26                      | 35                         | 0,1                                      | 0,8                                       | 0,9                                       |
| 2050   | +1,0               | -18               | 24,8                   | 10                     | 17                      | 49                      | 47                         | 1,2                                      | 1,5                                       | 2,7                                       |
| 2100   | +2,0               | -30               | 41,5                   | 28                     | 33                      | 68                      | 89                         | 1,6                                      | 2,9                                       | 4,5                                       |
| Várzeas artificiais                          |                    |                   |                        |                        |                         |                         |                            |  |   |   |
| 2025   | +0,5               | -10               | 13,7                   | 6                      | 9                       | 26                      | 35                         | 0,4                                      | 0,9                                       | 1,3                                       |
| 2050   | +1,0               | -18               | 24,8                   | 10                     | 17                      | 49                      | 47                         | 0,6                                      | 1,2                                       | 1,8                                       |
| 2100   | +2,0               | -30               | 41,5                   | 28                     | 33                      | 68                      | 89                         | 0,9                                      | 1,4                                       | 2,3                                       |
| Floculação química + denitrificação induzida |                    |                   |                        |                        |                         |                         |                            |  |   |   |
| 2025   | +0,5               | -10               | 13,7                   | 6                      | 9                       | 26                      | 35                         | 0,7                                      | 1,1                                       | 1,8                                       |
| 2050   | +1,0               | -18               | 24,8                   | 10                     | 17                      | 49                      | 47                         | 0,8                                      | 1,6                                       | 2,4                                       |
| 2100   | +2,0               | -30               | 41,5                   | 28                     | 33                      | 68                      | 89                         | 0,9                                      | 1,8                                       | 2,7                                       |

**Observações:**

- (1) Para produção de cargas associadas à vazão média de longo período;  
 (2) A partir de equilíbrios dinâmicos de produção menor ao consumo ( $P/R < 1$ );  
 (3) Para um tratamento mensal para remoção de NT e POI, com valores nominais, sem correção da inflação

**Tabela 2.3** Impactos de mudança de uso do solo, sem câmbio climático (Figura 2.10, inferior)

| Ano   | $A_{flo}$<br>(%) | $A_{agr}$<br>(%) | $A_{urb}$<br>(%) | $\Delta Y_{NT}$<br>(%) | $\Delta Y_{POI}$<br>(%) | $\Delta Y_{SST}$<br>(%) | $\Delta Y_{Clã}$<br>(%) | $\Delta Q_{lp}$<br>(%) | $\Delta \$_{NT}$<br>x10 <sup>6</sup> R\$ | $\Delta \$_{POI}$<br>x10 <sup>6</sup> R\$ | $\$_{Total}$ x<br>10 <sup>6</sup> R\$ |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--|---|---------------------------------------|
| Cenário 1: "Segurança alimentar e energética" |                  |                  |                  |                        |                         |                         |                         |                        |  |   |                                       |
| 2025  | 15               | 76               | 3                | 13                     | 16                      | 28                      | 2                       | -17                    | 0,4                                      | 1,8                                       | 1,2                                   |
| 2050  | 7                | 85               | 8                | 29                     | 30                      | 35                      | 6                       | -28                    | 3,2                                      | 5,5                                       | 8,7                                   |
| 2100  | 4                | 82               | 14               | 45                     | 76                      | 39                      | 15                      | -98                    | 4,6                                      | 8,9                                       | 13,5                                  |
| Cenário 2: "Ecotecnologias"                   |                  |                  |                  |                        |                         |                         |                         |                        |  |   |                                       |
| 2025  | 31               | 68               | 2                | 2                      | 13                      | 5                       | 5                       | +3                     | -0,3                                     | -0,7                                      | -1,0                                  |
| 2050  | 47               | 50               | 3                | 5                      | 41                      | 9                       | 14                      | +11                    | -3,1                                     | -4,6                                      | -7,7                                  |
| 2100  | 53               | 42               | 5                | 7                      | 67                      | 17                      | 28                      | +23                    | -9,0                                     | -13,1                                     | -22,1                                 |



**Figura 2.10** Mudanças do custo de tratamento de água por necessidades de aumento de eficiência por alterações do regime hidrológico por câmbio climático sem mudanças do uso do solo (superior) e por mudanças do uso do solo sem câmbio climático (inferior):

## 2.3 Síntese

É oportuno observar que os resultados da Tabela 2.3 e Tabela 2.4 são estimados de forma separada, para cargas difusas, determinísticas, e supondo equilíbrio dinâmico dual, entre processos quantitativos, regidos fundamentalmente pela vazão específica ( $Q^*$ ) e os qualitativos, dependentes da interação entre concentrações e vazões específicas ( $Y = C \cdot Q^*$ ). Portanto, os resultados aqui apresentados tem as mesmas limitações observadas nas seções anteriores.

Situações de sazonalidade, que correspondem a vazões específicas distantes da vazão de longo período, estão sujeitos a novas estimativas e conclusões. Por exemplo, se o Comitê de Bacia respectivo deliberar que a metodologia de cenários deve atender aos critérios de outorga baseados, por exemplo, em vazões do tipo  $Q_{7,10}$ , a metodologia pode ser adaptada facilmente a partir do estudo de Regionalização de Vazões do Estado de São Paulo.

Nesse caso, é preciso obter a vazão mínima de “ $d$ ” meses de duração associada à probabilidade de ocorrência em um ano qualquer. A partir dessas séries observadas de vazões médias mensais o DAEE, pode se obter séries de vazões mínimas anuais de vários meses consecutivos, para diferentes durações, para cada posto fluviométrico estudado, selecionando-se as vazões mínimas dessas durações para cada ano civil. Essas novas séries, no caso, podem ser padronizadas dividindo-se os valores originais da série pela média das vazões mínimas de cada duração. Assim, pode-se obter o valor da vazão de “ $d$ ” meses de duração e probabilidade de ocorrência  $1/T$  a partir da vazão média pluri-anual, com os parâmetros  $X_{Tr}$ ,  $A$  e  $B$  regionalizados, através da equação:  $Q_{d,Tr} = X_{Tr} (A + B \cdot d) \cdot Qlp$ , sendo “ $d$ ” [meses].

A vazão mínima de sete dias consecutivos, quando analisada de forma adimensional, e conforme DAEE (2001) tem normalmente um comportamento similar as distribuições adimensionais para vazões mínimas de “ $d$ ” meses consecutivos; portanto, pode-se utilizar o(s) mesmo(s) coeficientes estatísticos ( $X_{Tr}$ ). No entanto, deve-se corrigir com um coeficiente empírico que relaciona as mé-

dias das mínimas de duração de sete dias ( $Q^{*}_{7dias}$ ) e a média das mínimas anuais para duração de 1 mês ( $d=1$ ,  $Q^{*}_{1mês}$ ), isto é:  $C = Q^{*}_{7dias} / Q^{*}_{1mês}$  chegando na expressão corrigida.

Por outro lado, podem ser introduzidos cenários mistos, que combinem variabilidade climática e mudanças de usos do solo. Nesse caso, é preciso identificar as cargas poluidoras de um e outro efeito e somá-las. No entanto, a soma não representará fielmente o resultado esperado devido a que existem condições de contorno que são dinâmicas para ambos. Por exemplo, caso houver aumento da temperatura com o decorrer do tempo, as eficiências de diferentes tecnologias, que estão associadas às condições climáticas características, poderão sofrer mudanças sobre a eficiência de tratamento em função do custo de manter um desempenho original com novas variáveis físicas (umidade, temperatura ambiente, limiares de processos, etc). No caso de tratamento com várzeas artificiais, estas mudanças são expressivas, em virtude de serem sistemas com alta dependência de fatores atmosféricos. É, então, indispensável associar qualquer combinação de cenários com indicadores de sustentabilidade dos ecossistemas ribeirinhos, aquáticos e interfaces.

### **3- Indicadores de sustentabilidade**

Esta última seção visa a proposição e determinação de indicadores de sustentabilidade baseados nas teorias ecológicas, conforme os resultados obtidos no Projeto Temático e para rever critérios integrados de sustentabilidade, de atuação na escala local e para fontes mistas, tanto pontuais como difusas, para as micro-bacias do Vale do Ribeira.

Nesta seção, apresenta-se uma visão da integração ecohidrológica para pulsos temporais e espaciais, com ênfase no processo de inundação e usando conceitos, exemplos e cenários. Esta integração foi abordada com análise de variáveis limnológicas e hidrológicas em bacias hidrográficas. Apresentam-se indicadores de continuidade, diversidade, dinâmica, resiliência e vulnerabilidade, seus atributos e variáveis. Os parâmetros biológicos e químicos, em conjunto com as alturas hidrométricas e com as áreas alagadas na várzea, foram correlacionados com as vazões durante a passagem de pulsos. Esta integração foi realizada com uma síntese multi-dimensional e associada à curva de permanência de vazões. Mostra-se exemplos de cenários para pulsos das várzeas do rio Jacupiranguinha, SP.

A ecohidrologia associada a pulsos ribeirinhos considera o transporte de matéria e energia em sistemas dinâmicos e dissipativos com ênfase na variabilidade temporal de fatores de frequência, intensidade, tensão, recorrência, amplitude e sazonalidade (Neiff, 1996). Temporalmente, os pulsos se compõem de etapas de limnofase e potamofase que correspondem, respectivamente, a períodos contínuos de vazões e/ou alturas hidrométricas inferiores e superiores a determinados valores do regime fluvial.

Vários autores têm analisado essas abordagens a partir de diferentes princípios: de continuidade (VANNOTE *et al.*, 1980; GREGORY *et al.*, 1991; KAREIVA & WENERGREN, 1995; TOCKNER & SCHIEMER, 1997; DALE *et al.*, 2000), de diversidade (NEIFF, 1990; HULSE *et al.*, 2000; WARD & TOCKNER, 2001; BUNN & ARTHINGTON, 2002; COLLISCHONN *et al.*, 2005), de similaridade de habitats nas interfaces rio-várzea (THOMAZ *et al.*, 2007), da vulnerabilidade (DER VEEN, A. LOGTMEIJER, 2005; BERKES, 2007), da resiliência e estabilidade de sistemas dinâmicos (HOLLING, 1973; HOLLING & GUNDERSON, 2002; WALKER *et al.*, 2004). Os pulsos são distúrbios que induzem uma auto-organização da estru-



tura e da função para novas condições de equilíbrio ecossistêmico das bacias hidrográficas (MENDIONDO & TUCCI, 1997), em especial quando os ciclos temporais de limnofase e potamofase têm uma peculiar ocorrência.

As várzeas, no sentido amplo, são referidas como planícies de inundação sazonais ou permanentes (PETTS, 1990; ROSGEN, 1996; BRIERLEY & FRYIRS, 2005), com atributos que variam no tempo e no espaço e têm efeitos cumulativos (NCASI, 1999). Isto inclui uma visão ecohidrológica desde a fragmentação da paisagem (WHITE & PICKETT, 1985; DENSLOW *et al.*, 1985), os pulsos extremos (JUNK *et al.*, 1989; NEIFF *et al.*, 2000; RICHARDS *et al.*, 2002), a variação de indicadores de biomassa durante os pulsos (NEIFF *et al.*, 2000; MENDIONDO *et al.*, 2000; BOTTINO, 2008), até os padrões de similaridade (THOMAZ *et al.*, 2007). Recentes trabalhos na procura dos balanços de cargas nas várzeas durante pulsos de cheias, iniciados por Benassi (2006) e complementados por Almeida-Neto (2007), motivam a necessidade de integrar a ecohidrologia de forma teórica e prática. Este capítulo teve como objetivo apresentar a análise ecohidrológica, teórica e prática, tomando como ponto de partida uma várzea natural monitorada. O capítulo foi dividido em três partes: primeiro, um rápido elenco de indicadores e variáveis que representam os princípios ecohidrológicos integrados em um esquema conceitual; a seguir, mostra-se exemplos práticos de alguns destes princípios durante pulsos observados em várzeas monitoradas; finalmente discute-se, de forma sucinta, os possíveis cenários alternativos de prospecção do uso e ocupação das várzeas.

### **3.1 Metodologia**

Esta seção introduz rapidamente os conceitos e uma breve resenha dos indicadores de ecohidrologia de pulsos de inundação, com maior detalhamento para as várzeas. Em primeiro lugar, foram apresentados os indicadores e variáveis para formular cenários ecohidrológicos. Depois, mencionou-se as etapas do experimento em bacia monitorada.

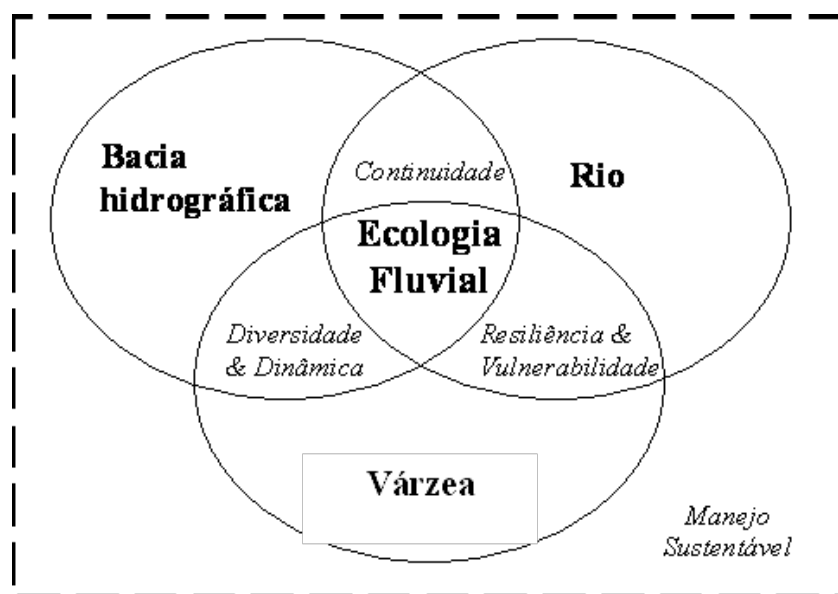
#### **3.1.1 Relação de indicadores, variáveis e cenários**

Os indicadores de sustentabilidade do sistema fluvial de bacias hidrográficas são categorias, de função e estrutura ecossistêmicas, e que abordam a ecohidrologia conforme proposto na

Figura 1. Estes indicadores enquadraram-se nas categorias de continuidade, diversidade, dinâmica, resiliência e vulnerabilidade, localizadas na primeira linha da **Tabela 3.1**. Nesta tabela, detalham-se variáveis (terceira linha) relativas ao setor de interação (segunda linha); por exemplo, as interações “bacia-rio”, “bacia-várzea” ou “rio-várzea”. Estes indicadores foram discutidos por Neiff *et al.* (2000), Zalewski (2000), Janauer (2000), Mendiondo *et al.* (2000a,b), Mendiondo & Valdés (2002), Zalewski & Wagner (2004), Hannah *et al.* (2007), entre outros. Estes foram abordados por Almeida-Neto (2007) em cenários de sustentabilidade.

### 3.1.2 Etapas experimentais

Os indicadores da **Figura 3.1** e **Tabela 3.1** podem ser levantados em etapas experimentais e visam identificar padrões ecológicos de sustentabilidade. A sua identificação tem como base uma seqüência mínima de etapas em trabalhos de campo (ALMEIDA-NETO, 2007): (a) análise de incertezas hidráulicas, (b) observação de pulsos naturais monitorados em três estágios: rio sem extravasamento, rio conectado à várzea e fase de recessão; (c) levantamento plani-altimétrico dos pontos característicos da várzea, (d) relação entre área alagada e altura d’água do rio, e (e) integração dos “hemisférios” limnológico e hidrológico.



**Figura 3.1** – Integração ecossistêmica de indicadores da ecohidrologia fluvial

**Tabela 3.1-** Indicadores da ecohidrologia de pulsos sobre várzeas. Fontes: adaptado de Neiff (1996), Neiff et al (2000), Bunn & Arthington (2002), Mendiondo *et al* (2000a,b), Zalewski (2000), Ward & Tockner (2001), Thomaz *et al* (2007), Almeida-Neto (2007)

|  | CONTINUIDADE  | DIVERSIDADE  | DINÂMICA   | RESILIÊNCIA   | VULNERABILIDADE   |
|--|---|--|--|---|---|
| <b>Descrição do indicador</b>          | <b>Bacia-Rio:</b><br>Indicador associado ao número e extensão de canais da rede de drenagem e da frequência de inundações máximas da várzea, responsáveis pela manutenção do regime dos rios, ciclos bio-geo-químicos subterrâneos e autodepuração de cargas.   | <b>Bacia-Várzea :</b><br>Quantificação de áreas alagadas permanentes em relação ao total de áreas alagadas da várzea, como indicativo de proporção de sistemas lenticos internos com potencial de intercâmbio de nutrientes, energia e/ou informação com o leito principal.  | <b>Bacia-Várzea:</b><br>Mecanismo não-linear de processos multivariados de nutrientes, de informação e de energia, transferidos entre a bacia de drenagem e a várzea, sob situações de limnofase e de potamofase dos pulsos.   | <b>Várzea-Rio:</b><br>Capacidade de recuperação potencial do indicador e/ou de alcançar um novo equilíbrio em face à ocorrência de entradas de matéria, energia e/ou informação   | <b>Várzea-Rio:</b><br>Análise de risco e gestão de várzeas, usando três fatores: ameaça (tempo de retorno), vulnerabilidade (custos indiretos de falta ou excesso de um serviço ambiental) e exposição (localização relativa dentro da várzea, em relação ao rio principal).  |
| <b>Variação do indicador [unidade]</b> | <b>X1:</b> número de sub-bacias afluentes laterais por unidade de comprimento longitudinal do rio principal [Nº/km]<br><b>X2:</b> densidade de afluentes na drenagem [km/km²]<br><b>X3:</b> frequência de ocorrência de completa inundação da várzea por pulsos extremos [Nº / décadas]<br><b>X4:</b> fração de áreas de lagoas perenes dentro das várzeas [km²/km², %]<br><b>X5:</b> quociente de perímetro molhado da seção potencial máxima de várzea e canal, relativo ao perímetro do canal principal [m/m, %] | <b>X6:</b> valor relativo, quociente das áreas com potencial de alagamento, perenes e intermitentes, com relação à área total de várzeas disponíveis para alagamento [km²/km², %]<br><b>X7:</b> valor relativo, ou quociente, do total de áreas de várzeas com relação à área total da bacia de contribuição de montante [km²/km², %]<br><b>X8:</b> número de usos e ocupações diferentes por unidade de área de várzea [Nº / km²] | <b>X9:</b> valor relativo, quociente, do tempo de manutenção de áreas alagadas nas várzeas após ocorrência de alturas máximas, pela duração do pulso respectivo [dias/dias, %]<br><b>X10:</b> valor relativo, quociente do tempo de extravasamento de pulso, acima de cota de conexão rio-várzea, sobre o tempo de duração de pulso total [dias/dias, %] | <b>X11:</b> taxa da diferença de indicadores de produção primária em áreas preservadas e em áreas degradadas da várzea [g PS/dia]<br><b>X12:</b> gradiente da vazão com cota hidrométrica (a) antes, e (b) depois do extravasamento [m³/s/m]<br><b>X13:</b> superfície dimensional de "loops" do indicador de produção primária versus altura hidrométrica<br><b>X14:</b> superfície dimensional de "loops" do indicador de produção primária versus área alagada | <b>X15:</b> fração de produção primária durante e após inundação máxima, em relação ao valor existente antes da inundação [gPS/gPS, %]<br><b>X16:</b> mudança das vazões Q5% e Q95%, na curva de permanência, devido a impactos antrópicos e uso do solo [m³/s]<br><b>X17:</b> mudança de probabilidade da vazão original de Q95%, como impactos diretos de ações antrópicos e/ou do uso [Probabilidade]<br><b>X18:</b> produto de velocidade média vezes profundidade média [m²/s] |

As incertezas hidráulicas da relação entre a cota hidrométrica e a vazão e o levantamento plani-altimérico das várzeas (etapas "a" e "c") não são abordados aqui e podem ser consultados em Almeida-Neto (2007). A observação de pulsos (etapa "b") e a relação de área alagada ver-

*sus* altura hidrométrica (etapa “d”) foram extraídas de Benassi (2006) e Almeida-Neto & Mendiondo (2007), respectivamente. Estes apresentam integração ecohidrológica (“e”) com parâmetros de biomassa, condutividade elétrica, nitrogênio total, nitratos, demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos inorgânicos (SSI), levantados por Benassi (2006).

### **3.2 Resultados e discussão**

Para facilitar a interpretação e discussão dos resultados, observa-se que as nomenclaturas “parâmetros” e “variáveis” são para as categorias deste capítulo e não devem ser confundidos com a nomenclatura usada na parametrização de modelos matemáticos.

Nesta seção, apresentaram-se resultados de condutividade elétrica e de biomassa. Os resultados correspondem à várzea de 12,5 ha do Sistema 1, com altas cargas poluidoras (ver seções anteriores) de Jacupiranguinha, SP, cuja área total de drenagem é 411 km<sup>2</sup>, até a confluência, e com rede de drenagem de 1.200 km e um comprimento de 59 km (BENASSI, 2006). Conforme Almeida-Neto (2007), o rio Jacupiranguinha é tipo C-5 na classificação de Rosgen (1996), para rios com leito predominantemente formado por areias, com pequenos acúmulos de cascalho e ocasionalmente silte e argila, com declividade média menor que 0,02 e com quociente entre a largura e a profundidade do canal maior que 12.

#### **3.2.1 Interpretação espacial**

Na **Figura 3.2** estão apresentadas as imagens da seqüência temporal do alagamento, do momento “1” até o momento “5”, durante um pulso de inundação na várzea do rio Jacupiranguinha. Em cada sub-figura desta seqüência, apresenta-se a cota instantânea no linigrama, situado no extremo superior de cada sub-figura. A linha horizontal no linigrama representa a altura de transborde do rio para a várzea. No exemplo, a máxima superfície de área inundada é 125.000 m<sup>2</sup> e o perímetro molhado corrigido é de 1 550 m. Conforme a duração do pulso desenvolve, as áreas inundadas não sempre se repetem na subida e na descida do hidrograma. Isto evidencia que parte da não-linearidade das respostas de parâmetros biogeoquímicos da está associada à dinâmica hidrológica (ALMEIDA-NETO, 2007).

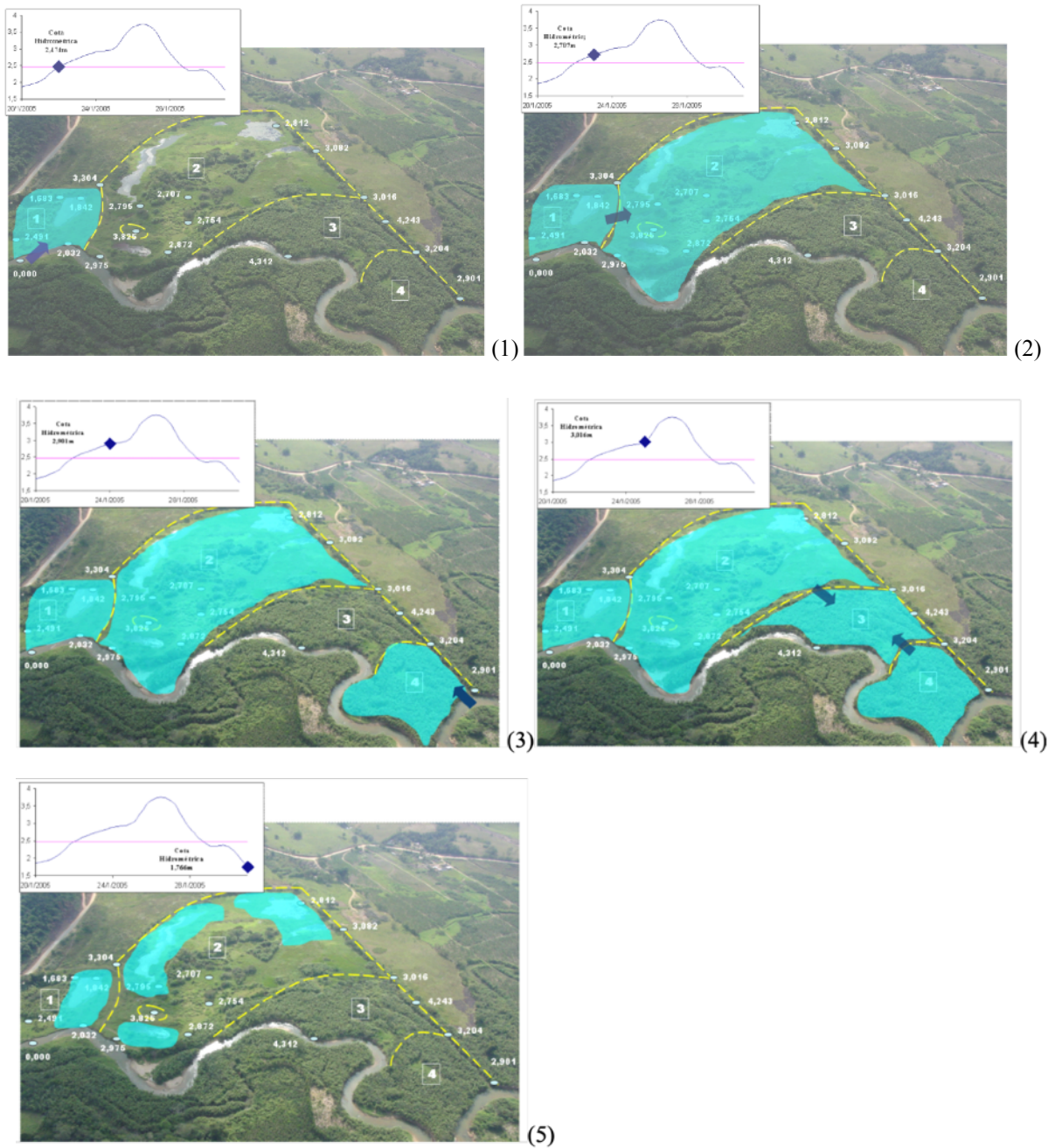


Figura 3.2- Dinâmica espaço-temporal de inundação durante pulso em várzea de 12,5 ha do rio Jacupiranguinha. O rio esco da esquerda à direita da foto. Fonte: Almeida-Neto (2007).

### 3.2.2 Interpretação temporal

Para a interpretação temporal de pulsos (**Fig.3.3**), o hidrograma foi dividido em três partes, cada uma representando uma fase de inundação. Na fase 1, a cota do rio aumentou, mas não extrapolou a calha do rio; na fase 2, a altura da linha d’água chegou ao ponto máximo de extravasamento e a área inundada também (área 1 e 2). Na fase 3, durante a recessão de níveis, a altura d’água diminuiu rapidamente e uma parte da área da várzea continuou inundada, em

especial as lagoas intermitentes (Figura 2). Na Figura 3, o eixo principal das ordenadas corresponde à área alagada e o eixo secundário às cotas hidrométricas do rio Jacupiranguinha.

### 3.2.3 Síntese ecohidrológica

O comportamento temporal do pulso da **Figura 3.3** incidiu nas concentrações e cargas associadas aos ciclos biogeoquímicos, inclusive quanto ao transporte de sedimentos. Para análise de resultados, usou-se um gráfico dividido em quadrantes (ver **Fig. 3.4**): o primeiro quadrante é formado pela altura ou cota hidrométrica d'água  $h(t)$  do rio no eixo das abscissas e uma variável limnológica nas ordenadas; o segundo quadrante tem área inundada da planície de inundação no eixo das abscissas e a mesma variável limnológica anterior nas ordenadas. Os dois primeiros quadrantes formam o chamado "hemisfério limnológico". O terceiro quadrante tem as cotas hidrométricas no eixo das abscissas e a vazão nas ordenadas, ou seja, corresponde a uma curva-chave; no quarto e último quadrante, a relação é entre as áreas inundadas no eixo das abscissas e a vazão no eixo das ordenadas. O terceiro e o quarto quadrante formam o denominado "hemisfério hidrológico-hidráulico".

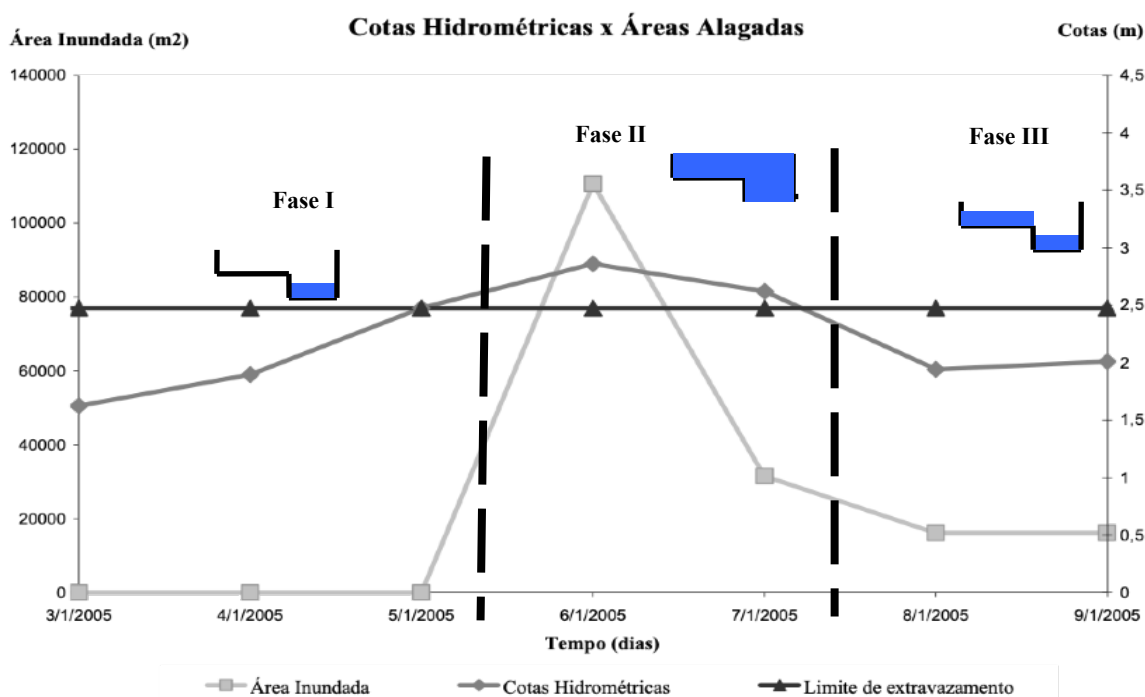
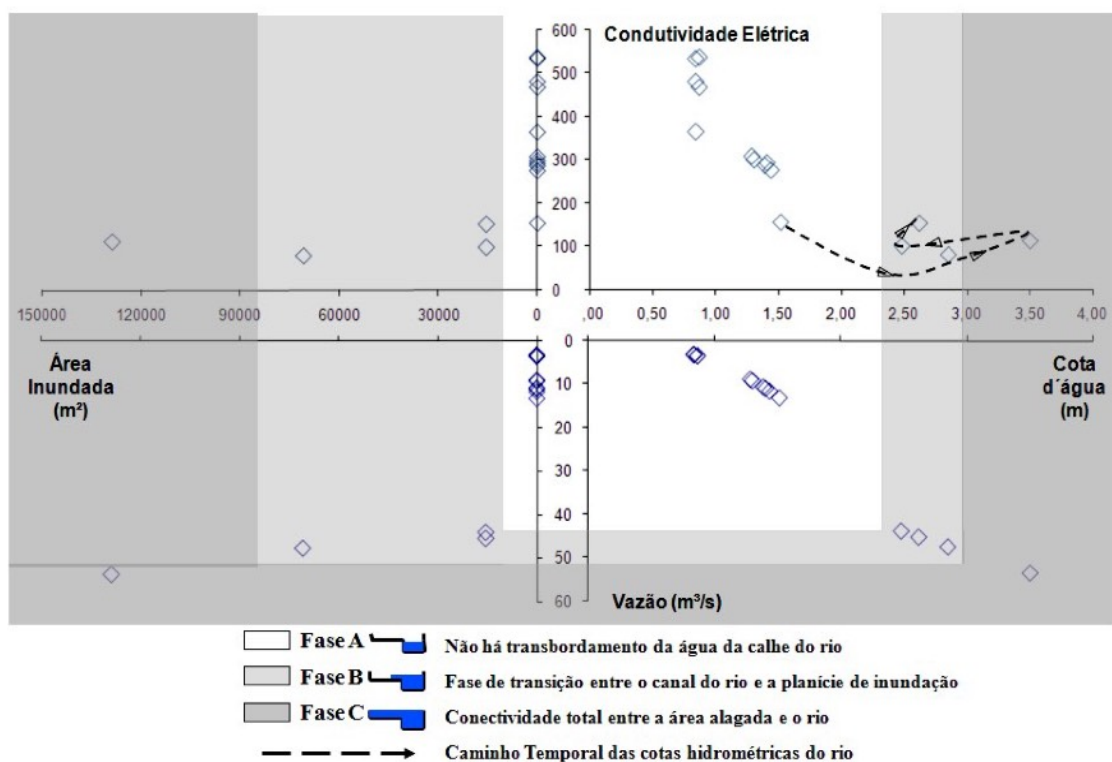


Figura 3.3– Relação entre área alagada e altura hidrométrica durante um pulso de inundação na várzea do rio Jacupiranguinha em 03 09/01/2005. Fonte: Almeida-Neto (2007)

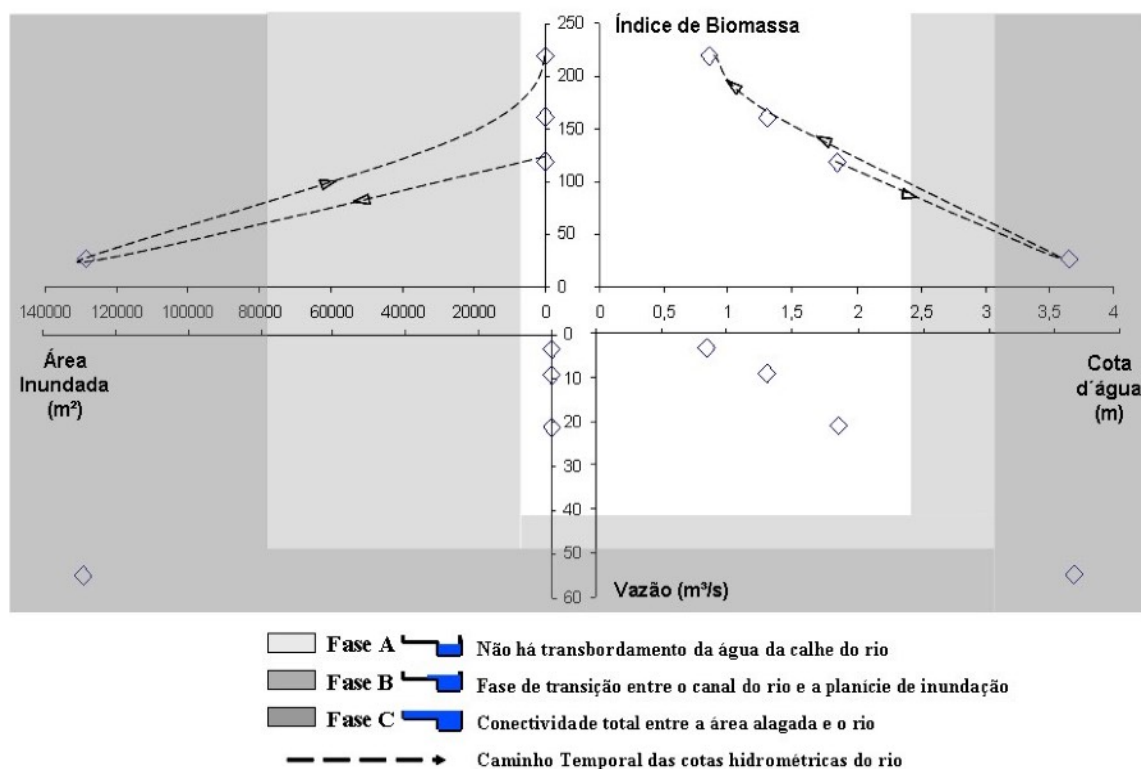


Na **Figura 3.4**, com condutividade elétrica, e na **Figura 3.5**, com índice de biomassa, são mostrados três tons de cinza para as fases de conectividades: "A: conectividade inexistente" "B: mista" e "C: completa". É útil observar a Figura 3, com etapas temporais I, II e III, em conjunto com a **Figura 3.4** e suas conexões A, B e C.

O tom branco da **Figura 3.4** representa uma conexão "A", quando o rio não extrapolou a calha principal, e portanto ainda não houve completa conexão entre o rio e a várzea. Na fase de conexão "B", com um tom cinza claro da **Figura 3.4**, o comportamento foi misto, conforme explicado a seguir. Por um lado, durante a fase de inundação, o rio começou a extrapolar o canal principal sem alagar toda a área de várzea. Por outro lado, durante a recessão dos níveis, as águas retornaram à calha principal que diminuiu os níveis mais rapidamente que os da várzea e esta reteve volumes por tempo maior (**Figura 3.3**, Fase III). O tom cinza escuro da **Figura 3.4** representa a conexão "C", quando toda a várzea alaga e houve máximo intercâmbio de cargas rio-várzea. A condutividade elétrica é um indicador potencial da interação entre a planície de inundação e o rio principal durante os pulsos, pois está relacionada com a quantidade de materiais dissolvidos presentes e é considerada um indicador da poluição potencial. Na **Figura 3.4** nota-se que quando ocorre inundação da várzea, a condutividade elétrica diminui em função da diluição e mistura de cargas.



**Figura 3.4-** Síntese ecohidrológica de concentrações de condutividade elétrica durante pulsos nas várzeas do rio Jacupiranguinha. Ver explicação no texto. Fonte: Almeida-Neto (2007).



**Figura 3.5** - Síntese ecohidrológica de concentrações de índice de biomassa durante pulsos nas várzeas do rio Jacupiranguinha. Ver explicação no texto. Fonte: Almeida-Neto (2007).

A Figura 3.5 apresenta a síntese ecohidrológica a partir do índice de biomassa de macrófitas aquáticas ( $g\ PS/m^2$ ) monitorado por Benassi (2006). Da mesma forma que explicado para a Figura 4, o quadrante direito superior da Figura 5 foi formado pela cota hidrométrica da água no eixo das abscissas e pelo índice de biomassa ( $gPS/m^2$ ) nas ordenadas; no segundo quadrante aparece a área inundada da planície de inundação no eixo das abscissas e índice de biomassa ( $gP.S/m^2$ ) nas ordenadas. Novamente, estes dois primeiros quadrantes formaram um hemisfério limnológico. O terceiro quadrante teve as cotas hidrométricas no eixo das abscissas e a vazão nas ordenadas; no quarto e último quadrante apareceu a relação entre as áreas inundadas da área alagada no eixos das abscissas e a vazão no eixo das ordenadas. O terceiro e o quarto quadrante formaram, novamente, o hemisfério das variáveis hidrológico-hidráulicas. De acordo com Neiff (1996) e Neiff *et al.* (2000), alterações das flutuações dos níveis da água podem levar ao aumento ou redução da biomassa de macrófitas aquáticas, dependendo dos seus tipos, da frequência, da intensidade e da amplitude do pulso registrado. Vários autores (p.ex. AHEARN *et al.*, 2006; BAYLEY, 2006) postulam que as relações entre as cotas hidrométricas e a biomassa são evidências macroscópicas dos pulsos. Quando ocorre inundação na várzea, a biomassa atinge o seu menor índice observado. Esses resultados são reportados por



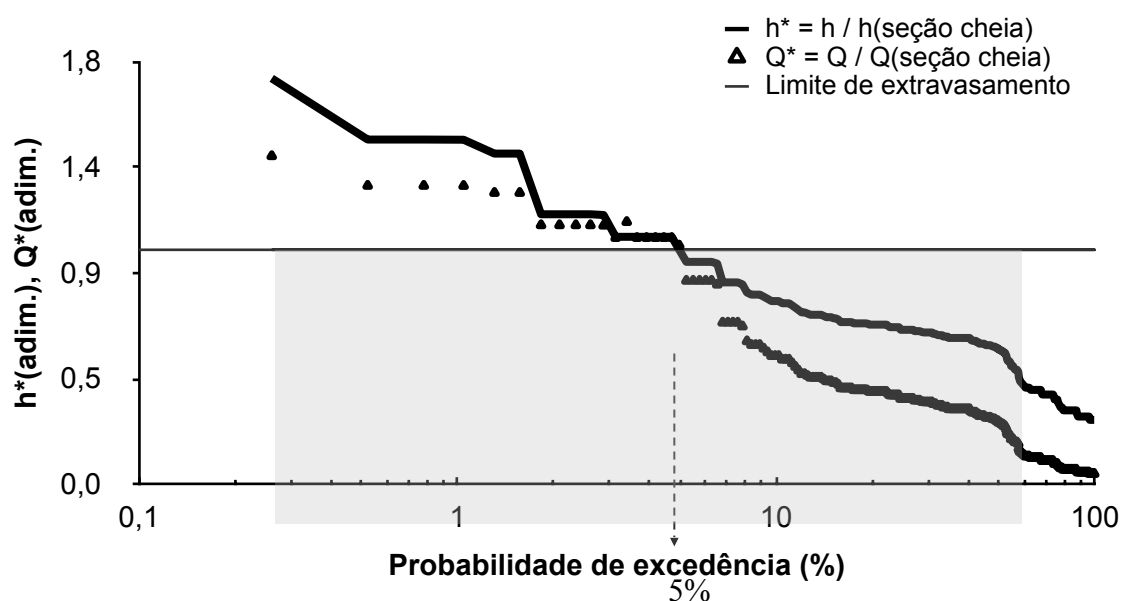
outros autores (NEIFF *et al.*, 2000; MENDIONDO *et al.*, 2000). A biomassa depende também da velocidade média da corrente, da sazonalidade climática e dos padrões espaciais de drenagem da várzea (Neiff *et al.*, 2000).

### 3.2.4 Cenários adaptados à ecohidrologia local

Os cenários propostos nas seções anteriores visavam uma abordagem geral na escala de bacia. No entanto, estas abordagens devem ser adaptadas às condições de cada local. Neste caso, as variáveis postuladas na **Figura 3.1** e na **Tabela 3.1** podem ser sintetizadas se adotada uma quinta dimensão temporal, perpendicular ao plano onde se situam os “hemisférios” limnológicos e hidrológicos (**Figuras 3.4 e 3.5**). Essa nova dimensionalidade foi tratada na curva de permanência; isto é, a curva que ordena os valores de vazões  $Q(t)$  ou alturas hidrométricas  $h(t)$  e lhes atribui uma probabilidade média de ocorrência em um dado local do rio. Por exemplo, a vazão característica  $Q_{95\%}$  representa comportamento provável com 95% da amostra de vazões com valores superiores ou iguais à  $Q_{95\%}$ ; portanto, estas ocorreriam durante 95% da permanência total de pulsos desse período nessa seção do rio. Por ter probabilidade de excedência alta, a  $Q_{95\%}$  indica vazão baixa, de estiagem ou de limnofase. Por outro lado, uma vazão característica  $Q_{5\%}$  representa 5% da amostra de vazões que superaria ou igualaria esse valor; portanto a  $Q_{5\%}$  seria uma vazão relativamente alta, de cheias ou de potamofase. Um valor  $Q_{50\%}$  seria um valor intermediário, isto é,  $Q_{5\%} > Q_{50\%} > Q_{95\%}$ , o que explica um comportamento decrescente destas vazões com a probabilidade de excedência. A **Figura 3.6** mostra a curva de permanência, cuja linha horizontal é a fronteira de conexão hidrológica, entre o rio e a várzea ( $h=2,47$  m). As linhas representam permanências adimensionais das alturas, em negrito, de  $h^*(t)=h(t)\div 2,47$  m; e os triângulos, a permanência adimensional das vazões, de  $Q^*(t)=Q(t)\div 43,7$  m<sup>3</sup>/s). De acordo com a figura, 5% dos registros de  $Q(t)$  e  $h(t)$  desse período mostram conexão direta, durante o pulso, do canal do rio Jacupiranguinha com a várzea. Conforme a **Figura 3.6**, o retângulo interno apresentou o intervalo de vazões, e respectivas durações, observadas experimentalmente nesse período.

A curva de permanência também mostra a probabilidade de excedência como variável variável explanatória de funções de vazão e de altura hidrométrica, por exemplo do tipo  $Q=f_1(Prob)$  e  $h=f_2(Prob)$ . Assim, a curva de permanência é de utilidade para a interpretação dos pulsos e, indiretamente, para a inferência dos atributos antes explicados (**Figura 3.1 e Tabela 3.1**) na prospecção de cenários. Neiff (1996), Neiff *et al.* (2000), Mendiondo *et al.* (2000a,b), Thomaz

*et al.* (2007), entre outros, analisam esta interdependência como forma indireta de avaliar a permanência temporal dos parâmetros biogeoquímicos e cargas respectivos. Parâmetros como condutividade elétrica (*CE*), índice de biomassa (*IB*), nitrogênio total (*N-tot*), fósforo total (*P-tot*), demanda química (*DQO*) e biológica (*DBO*) de oxigênio, sólidos suspensos inorgânicos (*SSI*), orgânicos (*SSO*) e totais (*SST*), entre muitos outros podem ser indiretamente associados a vazões características de limnofase e potamofase, como  $Q_{95\%}$ ,  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{5\%}$  ou outras. Na **Tabela 3.2** estão apresentados os resultados das possíveis interações ecossistêmicas a partir de um cruzamento das variáveis  $X_1$  a  $X_{18}$  das categorias “continuidade”, “diversidade”, “dinâmica”, “resiliência” e “vulnerabilidade” (**Figura 3.1** e **Tabela 3.2**) com alguns parâmetros biogeoquímicos e da curvas de permanência. A interseção de colunas e linhas mostra a magnitude das possíveis interações, ou seja, o grau de correlação entre variáveis e parâmetros. Estas correlações podem variar de muito positivas ‘+ +’ a muito negativas ‘- -’. Em alguns casos, parâmetros como  $X_{12}$ , ou “gradiente da vazão com cota hidrométrica (a) antes, e (b) depois do extravasamento” podem ter comportamentos dissímiles. Isto é, o grau de associação entre variáveis e parâmetros pode demonstrar graus de resiliência diferentes entre os ecossistemas várzea-rio-bacia. Por exemplo, se forem analisados durante a fase não-linear de geração de escoamento, propagação e aumento das vazões, ou durante a fase de recessão, posterior à ocorrência do pico da cheia. Conforme **Tabela 3.2**, várias interações são indeterminadas (‘?’) e outras podem não ter relação direta (‘s/r’).



**Figura 6-** Curvas de permanência adimensionais de alturas (linhas) e vazões (triângulos) do rio Jacupiranguinha para um período de 382 dias. Ver explicação no texto.

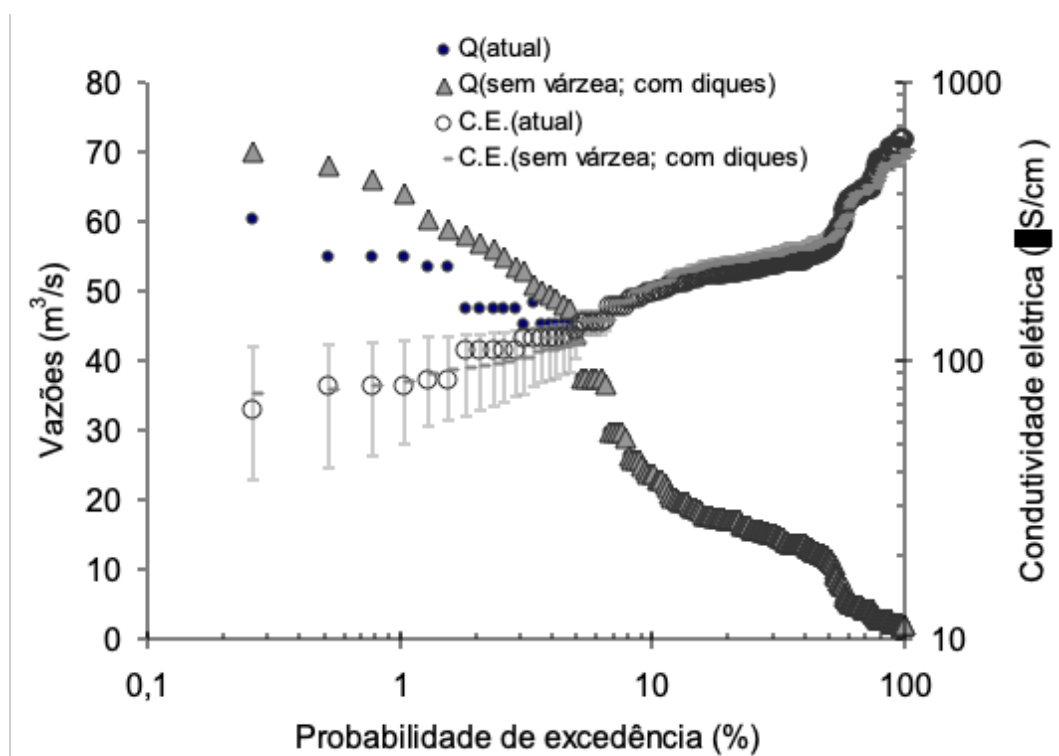
**Tabela 3.2-** Matriz de interação entre parâmetros e indicadores das variáveis ecohidrológicas para cenários prospectivos (ver **Tab.3.1**).

| Parâmetro<br>(unidades)                       | Categorias: indicadores e variáveis |                |                |                |                |                    |                |                |                 |                 |                    |                 |                 |                 |                        |                 |                 |                 |
|---|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|   | <i>Continuidade</i>                 |                |                |                |                | <i>Diversidade</i> |                |                | <i>Dinâmica</i> |                 | <i>Resiliência</i> |                 |                 |                 | <i>Vulnerabilidade</i> |                 |                 |                 |
|   | X <sub>1</sub>                      | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | X <sub>6</sub>     | X <sub>7</sub> | X <sub>8</sub> | X <sub>9</sub>  | X <sub>10</sub> | X <sub>11</sub>    | X <sub>12</sub> | X <sub>13</sub> | X <sub>14</sub> | X <sub>15</sub>        | X <sub>16</sub> | X <sub>17</sub> | X <sub>18</sub> |
| <b>Q<sub>95%</sub></b><br>(m <sup>3</sup> /s) | ++                                  | ++             | ?              | +              | +              | ++                 | +              | ?              | ++              | --              | ++                 | s/r             | ?               | ?               | ?                      | -               | --              | -               |
| <b>Q<sub>50%</sub></b><br>(m <sup>3</sup> /s) | +                                   | +              | ?              | +/-            | +/-            | +                  | +              | ?              | +               | -               | +                  | s/r             | +/-             | ?               | ?                      | +/-             | ?               | +/-             |
| <b>Q<sub>5%</sub></b><br>(m <sup>3</sup> /s)  | +/-                                 | +              | ++             | +/-            | -              | +/-                | -              | +/-            | +/-             | +               | +/-                | +/-             | +/-             | +/-             | -                      | +/-             | ?               | +               |
| <b>Q<sub>1%</sub></b><br>(m <sup>3</sup> /s)  | +/-                                 | +/-            | +              | -              | --             | -                  | --             | +/-            | -               | ++              | -                  | ++;-            | -               | -               | --                     | +               | +               | ++              |
| <b>CE</b><br>(μS/cm)                          | -                                   | -              | -              | +/-            | +/-            | +/-                | -              | ++             | +/-             | +/-             | -                  | -;+             | -               | -               | -                      | -               | +               | -               |
| <b>DQO</b><br>(mg/L)                          | -                                   | -              | -              | +/-            | -              | -                  | -              | +              | -               | +/-             | ?                  | -;?             | -               | -               | ?                      | -               | +               | -               |
| <b>DBO</b><br>(mg/L)                          | -                                   | -              | -              | +/-            | +/-            | +/-                | -              | +              | +/-             | +/-             | -                  | -;+             | -               | -               | -                      | -               | +               | -               |
| <b>N<sub>tot</sub></b><br>(mg/L)              | +/-                                 | +              | -              | +/-            | +              | +/-                | +/-            | +              | +               | -               | +                  | +;-             | ?               | ?               | ?                      | +               | ++              | +/-             |
| <b>P<sub>tot</sub></b><br>(mg/L)              | +                                   | +/-            | -              | +/-            | +              | +/-                | +/-            | +              | +               | -               | +/-                | +;-             | ?               | ?               | ?                      | ++              | ++              | +/-             |
| <b>IB</b><br>(gPS/m <sup>2</sup> )            | +/-                                 | +/-            | -              | +              | +              | +/-                | +              | +/-            | +               | -               | +                  | +;+             | +               | +/-             | -                      | --              | -               | -               |
| <b>SSI</b><br>(mg/L)                          | +                                   | +              | +              | -              | -              | +                  | -              | +              | -               | +               | -                  | +;+             | ?               | ?               | ?                      | +               | ++              | +               |
| <b>SSO</b><br>(mg/L)                          | +                                   | +              | +              | +/-            | -              | -                  | -              | +              | -               | +               | -                  | +;+             | +/-             | ?               | +                      | +               | +               | ?               |
| <b>SST</b><br>(mg/L)                          | +                                   | +              | +              | -              | --             | +/-                | --             | ++             | --              | ++              | --                 | +;+             | +/-             | ?               | ?                      | ++              | ++              | +               |

Notações de possíveis interações entre as magnitudes das variáveis (colunas) e dos parâmetros (linhas):  
 + : *positiva*, ++ : *altamente positiva*, - : *negativa*, -- : *altamente negativa*, +/- : *mista*, x ; x : *subida e recessão do pulso*, ? : *indeterminado*, s/r: *sem relação*

A **Tabela 3.2** foi adotada para cenários sem mudança climática e para determinadas mudanças de uso do solo na bacia, de ocupação das várzeas ou até de interferência nos rios. A vantagem deste enfoque é de oferecer elementos para inferir os possíveis valores de parâmetros. No entanto, os casos de interdependência ou de causacomum por auto-recuperação ambiental (MILNER, 1996), os casos de ritmos, sucessão e evolução (MARGALEF, 2002), os efeitos cumulativos no balanço de sedimentos (NCASI, 1999) e nas taxas de transporte (SIMONS & SENTÜRK, 1992) são parcialmente consideradas nesta Tabela.

Na **Figura 3.7** foi apresentado um exemplo dos alcances e limitações do uso desses cenários prospectivos. Dois cenários de uso das várzeas foram comparados: (1) da situação atual e (2) com ocupação da várzea mais construção de diques. Este segundo cenário impediria a continuidade e conexão do rio durante a passagem de cheias e o transbordamento natural. Os diques, ao acelerar o escoamento, confinariam mais as linhas de corrente e aumentariam os termos de inércia das equações de *momentum* das cheias (CUNGE *et al*, 1980; p.17); assim por continuidade hidráulica, isto ocasiona rebaixamento das cotas hidrométricas, aumento localizado de vazões e propagação de processos erosivos nas margens e a aumento de cheias em áreas de jusante (MAYS, 2001, p.535).



**Figura 3.7-** Cenário de permanência (1) “atual”, com a manutenção das várzeas, para as vazões (●) e para a condutividade elétrica (○), e (2) “com remoção das várzeas e construção de diques” para as vazões (▲) e para a condutividade elétrica (■).

Na **Figura 3.7**, para as vazões altas, i.e.  $Q > Q_{5\%}$ , o cenário atual indicou decréscimo da condutividade elétrica  $CE$  (círculos brancos), predispondo processo de diluição potencial das cargas poluidoras transportadas pelo escoamento do rio durante vazões altas. Para o cenário de ocupação da várzea, a descaracterização do uso e a construção de diques que impeçam a conexão com o rio, prováveis efeitos de natureza mista (ver interação do tipo “+/-“ das variáveis  $X_4$  e  $X_5$  com o parâmetro  $CE$  na **Tab.3.2**) são aguardados. Neste cenário, há remoção de áreas de lagoas dentro das várzeas ( $X_4$ ) e diminuição do perímetro molhado da seção transversal total, da várzea mais canal ( $X_5$ ). Este induzido cenário, no caso, aumentaria as vazões ( $+\Delta Q$ ) e diminuiria a condutividade elétrica ( $-\Delta CE$ ). Este primeiro comportamento, de relação inversa ou de interação negativa entre magnitudes, foi responsável pelo intervalo inferior ( $\perp$ ) de  $CE$  (**Figura 3.7**). No entanto, conforme as novas alturas hidrométricas do segundo cenário forem menores que as do atual cenário ( $-\Delta h$ ) e as novas áreas implantadas artificialmente na antiga várzea serem novas fontes de poluição difusa e/ou local ( $+\Delta CE$ ), haverá novo aumento de cargas poluidoras e possível aumento de  $CE$ . Este novo processo foi responsável pelo intervalo superior ( $\top$ ) de  $CE$  na **Figura 3.7**.

### 3.3 Conclusões transitórias e recomendações parciais

Esta seção revisitou brevemente conceitos, apresentou exemplos e traçou um possível uso de cenários prospectivos, adaptados à escala local, a partir da ecohidrologia de pulsos com ênfase nas faces de inundação de várzeas. Esta adaptação visa uma possível política de manejo focada em controlar cargas pontuais. Para controle de cargas difusas deve-se atender aos roteiros apresentados nas seções anteriores, na escala de bacia hidrográfica. Neste caso (cargas pontuais, escala local), foi possível resgatar atributos de continuidade, diversidade, dinâmica, resiliência e vulnerabilidade como categorias, não-únicas, para interpretação alternativa de problemas tradicionais das áreas de biologia, química, física, engenharia e matemática ao tratar pulsos e a ecologia fluvial (**Figura 3.1** e **Tabela 3.1**). Estes colocam a ecohidrologia como uma prática possível para ampliar os conhecimentos, as hipóteses de trabalho e as incertezas de monitoramento de parâmetros e variáveis; por exemplo, para as escalas espaciais e temporais dos pulsos dentro das várzeas (**Figura 3.2**). A temporalidade dos pulsos (**Figura 3.3**) foi

tratada de forma simplificada para abordar casos monitorados, em uma única sub-bacia hidrográfica em fase de testes; ainda assim, também foram citadas as necessidades metodológicas gerais apontadas por diversos autores. A síntese ecohidrológica de quadrantes e hemisférios não é única e nem restrita. No caso dimensional (**Figuras 3.4 e 3.5**), os “hemisférios” de observação experimental puderam ser rapidamente substituídos por novos indicadores. Porém, foi evidenciado a seguir que a dimensão temporal é útil se atrelada aos quadrantes limno-hidrológicos. Dessa maneira, torna-se um contínuo dimensional de pulsos, recorrentes e cíclicos, usando os quadrantes (**Figuras 3.4 e 3.5**), que relacionam parâmetros, alturas hidrométricas, vazões, áreas alagadas e probabilidades. Portanto, é possível ter um contínuo multidimensional associados às permanências. Nesse sentido, as permanências hidrológicas adimensionais (Figura 6) e absolutas (**Figura 3.7**) foram discutidas em torno de possíveis interações esperadas para alguns parâmetros e variáveis ecohidrológicas (**Tabela 3.2**).

As limitações e alcances destas abordagens, dirigidas ao controle de cargas pontuais ou mistas, podem ser propostos em futuros trabalhos, em consonância com o estado da arte das pesquisas e com foco para oportunidades de trabalho interdisciplinar. Dentre estas, recomendam-se pesquisas de: (1) análise de sensibilidade e de incertezas na demarcação espacial e temporal dos pulsos durante os ciclos de potamofase, (2) simulação matemática multi-dimensional e ecossistêmica bacia-rio-várzea com balanço acoplado de ciclos biogeoquímicos, refinando a quantificação de cargas, de fluxos e de estoques, (3) modelagem de uma espiral contínua e real de nutrientes que se relaciona com um espiral virtual de parâmetros, alturas hidrométricas, vazões, áreas alagadas e probabilidades, para conferir as interações de variáveis e parâmetros, (4) novas hipóteses e cenários plausíveis para um intervalo amplo de possibilidades de uso e manejo dos sistemas bacia-rio-várzea com regionalização de funções em bacias com dados escassos.

## 5. REFERÊNCIAS

- AHEARN, D, VIERS, J, MOUNT, J. DAHLGREN, R (2006) Priming the productivity pump: flood pulse driven trends in suspended algal biomass distribution across a restored floodplain, *Freshwater Biology* (2006) 51, 1417–1433
- ALMEIDA-NETO, P. (2007). Hidrogramas experimentais de áreas alagadas da micro-bacia do rio Jacupiranguinha, Baixo Ribeira do Iguape, SP. Diss (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 119p.
- ALMEIDA-NETO, P., MENDIONDO (2007) Relações experimentais entre alturas hidrométricas e áreas alagadas da micro-bacia do rio Jacupiranguinha, In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais CD-Rom, São Paulo: ABRH
- AVALIACAO ECOSSISTÊMICA DO MILÊNIO (2005) Scenarios, v.2, Island Press, Washington (disponível em [www.MAweb.org](http://www.MAweb.org))
- BAYLEY, P (2006) The flood pulse advantage and the restoration of river-floodplain systems, *Regulated Rivers: Research & Management* 6 (2):75-86
- BENASSI, R. F. (2006). *Dinâmica Espaço-Temporal de um sistema de áreas alagáveis na planície de inundação do rio Jacupiranguinha, Vale do Ribeira de Iguape, SP*. São Carlos, 2006. Tese (Doutoramento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BERKES, F. (2007) Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking, *Natural Hazards* (2007) 41:283–295
- BOTTINO, F. (2008). *Estudo experimental e matemático da qualidade da água do rio Canha visando a ecologia fluvial de pequenas bacias*. Diss (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BRIERLEY, G.J. AND FRYIRS, K.A (2005) *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publications, Oxford, UK. 398pp
- BUNN, S.E.; ARTHINGTON, A.H. (2002) *Basic principles and ecological consequences of the altered flow regimes for aquatic diversity*. *Environmental Management*, v.30, nº 4, p. 492-507.

- CALIJURI, M. C. (2003) Estudo dos sistemas naturais e artificiais redutores de cargas poluidoras para a sustentabilidade dos recursos hídricos do Baixo Ribeira de Iguape – SP – Projeto Temático. Nro. 02/13449-1, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COLLISCHONN, W.; ANGRA, S.; FREITAS G.; PRIANTE G. R.; TASSI R.; SOUSA C. (2005). Em busca do hidrograma ecológico. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa (PB), 2005 *Anais*. ABRH: São Paulo
- CUNGE, A , HOLLY, F., VERWEY, A (1980) *Practical aspects of computational river hydraulics*, London: Pitman Publ. Program
- DAEE-USP-FCTH (2001) Regionalização hidrológica do Estado de São Paulo, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, USP, São Paulo, 347p + anexos.
- DALE, V.H., BROWN, S., HAEUBER, R.A., HOBBS, N.T., HUNTLY, N., NAIMAN, R.J., RIEBSAME, W.E., TURNER, M.G. AND VALONE, T.J. (2000) ESA Report: Ecological principles and guidelines for managing the use of land. *Ecological Applications* 10(3), 639–670.
- DENSLOW, J. 1985. Disturbance-mediated coexistence of species. In: S. Pickett & P. White (eds), *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*: 307-323. San Diego: Acad. Press
- DER VEEN, A. LOGTMEIJER. C. Economic Hotspots: Visualizing Vulnerability to Flooding, *Natural Hazards* (2005) 36: 6580
- GREGORY, S.V., SWANSON, F.J., MCKEE, W.A. AND CUMMINS, K.W. (1991) An ecosystem perspective of riparian zones. *Bioscience* 41, 540–551.
- HANNAH, D., SADLER, J. P., WOOD, P. J. (2007), Hydroecology and ecohydrology: a potential route forward?, *Hydrological processes* 31: 3385-3390
- HOLLING, C. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4: 1-23.
- HOLLING, C.S. AND GUNDERSON, L.H. (2002) Resilience and adaptive cycles. In *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems* (L.H. Gunderson and C.S. Holling, eds.), pp. 25–62. Island Press, Washington, D.C.



- HULSE, D., EILERS, J., FREEMARK, K., WHITE, D. AND HUMMON, C. (2000) Planning alternative future landscapes in Oregon: evaluating effects on water quality and biodiversity. *Landscape Journal* **19**(2), 1–19.
- JANAUER, G.A. (2000) *Ecohydrology: fusing concepts and scales*. Ecological Engineering, . 16 p. 9-16.
- JUNK, W.J., BAYLEY, P.B. AND SPARKS, R.E. (1989) The flood pulse concept in river-flood-plain systems. Special Publication of the *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 106, 110–127
- KAREIVA, P. AND WENNERGREN, U. (1995) Connecting landscape patterns to ecosystem and population processes. *Nature* **373**, 299–302.
- MACÊDO, R. F. (2005) Proposta Metodológica para Análise de Disponibilidade e Demanda Hídrica na Escala de Bacia Hidrográfica, Diss. (Mestrado) Hidráulica e Saneamento, EESC/USP, São Carlos, 180p + anexos.
- MARGALEF, R. (2002) *Teoría de los sistemas ecológicos*. Barcelona: AlfaOmega
- MAYS, L. (2001) *Water resources engineering*. New York: John Wiley & Sons
- MENDES, H C, MENDIONDO, E M (2007) Histórico de expansão urbana e impactos das inundações, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.12, n.11, p.17-28
- MENDIONDO, E M (2005) An overview on urban flood risk management, *Minerva* **2**(1), 102-131
- MENDIONDO, E M (2008) Challenging issues on urban biodiversity related to ecohydrology, *Brazilian Journal of Biology* (submitted)
- MENDIONDO, E. M., TUCCI, C. E. (1997) Escalas hidrológicas I, II, III: conceitos, diversidade de processos, e hipótese integradora de processos na bacia vertente, *Rev. Bras. Rec. Hídricos*, v. 2, n. 1, p. 53-122 (três artigos)
- MENDIONDO, E. M.; VALDES, J. B. (2002), Strategies for sustainable development of water resources systems. In: *2nd. Intern. Conf. of New Trends in Water & Environ. Eng. for Safety & Life: Eco-Compatible Solutions for Aquatic Ecosystems*, 2002, Capri, Rotterdam, Holanda : Balkema.

- MENDIONDO, E. M., NEIFF, J. J., DEPETTRIS, C. A., (2000) Ecohydrology of wetlands aided by remote sensing: a case study. In: U. Maione, B. Majone-Lehto, R. Monti (eds.). *New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life*, 1 ed. Rotterdam: A. A. Balkema, p 43-56
- MENDIONDO, E. M. ; CLARKE, R. T. ; TOENSMANN, F. (2000). River restoration, discharge uncertainty and floods. In: F. Toensmann & M. Koch. (eds.). *River flood defence*, Kassel, Germany: Herkules Verlag, v. 2, p. 141-152.
- MILNER, A. M. (1996) System recovery, In: G. Petts & P. Calow (eds) *River Restoration*, Chapter 12:205-226, London: Blackwell Science
- MOCCELLIN, J. (2005) A micro-bacia do Jacupiranguinha como unidade de estudo para a sustentabilidade dos recursos hídricos do baixo Ribeira de Iguape, SP, Diss. (Mestrado), EESC/USP, São Carlos, 151p
- NCASI – US National Council for air and Stream Improvement, Inc.(1999) *Scale considerations and the detectability of sedimentary cumulative watershed effects*, Technical Bulletin 776, Research Triangle Park, 327p.
- NEIFF, J.J. (1990) Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. *Interciencia* 15 (6): 425-441.
- NEIFF, J. J. (1996) Large rivers of South America: toward a new approach. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 167-180. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Vg.
- NEIFF, J.J., MENDIONDO, E. & DEPETTRIS, C. (2000). ENSO's floods on the Lower Parana River ecosystems in South America, In: F. Toensmann & M. Koch (eds) *Flood Defence Control*, Kassel, Germany: Herkules Verlag, 2000, v. 1, p. F-181-F-192.
- PETTS, G (1990) Regulation of large rivers: problems and possibilities for environmentally-sound river development in South America, *Interciencia* 15(6): 389-394.
- RICHARDS, R, BRASINGTON, J., HUGHES, F. (2002) Geomorphic dynamics of floodplains: ecological implications and a potential modelling strategy, *Freshwater Biology* 47, 559–579.
- ROSGEN, D. (1996). *Applied River Morphology*, Ed. Wildland Hydrology, 2<sup>nd</sup>. Ed.

- SIGRH – Sistema de Informações para Gestão de Recursos Hídricos no Estado de São Paulo / DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica (2000) Relatório Final, São Paulo, DAEE.
- SIMONS, D., SENTÜRK, F (1992) *Sediment transport technology*, Chelsea: BookCrafters (Colorado: Water Resources Publications)
- THOMAZ S, BINI, L M, BOZELLI, R L (2007) Floods increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems, *Hydrobiologia* 579(1): 1-13
- TOCKNER, K. AND SCHIEMER, F. (1997) Ecological aspects of the restoration strategy for a river-floodplain system on the Danube River in Austria. *Global Ecology and Biogeography Letters* 6, 321–329.
- VANNOTE, R. L.; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R., & CUSHING, C. E. (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, v. 37, n 1, p-130-137
- WALKER B, HOLLING C, CARPENTER S, KINZIG A (2004) Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. *Ecology and society* 9(2):5
- WARD, J & TOCKNER, K (2001) Biodiversity: towards a unifying theme for river ecology. *Freshwater Biology* 46: 807–819.
- WHITE, P. & PICKETT, S. 1985. Natural disturbance and patch dynamics. In: S. Pickett & P. White (es), *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*: 3-16. San Diego: Acad. Press.
- ZALEWSKI, M (2000). Ecohydrology – the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, v.16, p.1-8.
- ZALEWSKI, M.; ROBERTS, R. (2003). Ecohydrology – a new paradigm for integrated water resources management. *Sil News* v.40, p.1-5.
- ZALEWSKI, M., WAGNER, I. (2004) Integrated Watershed Management- Manual of Ecohydrology & Phytotechnology, UNEP-IHP, United Nations Environment Programme -*International Hydrologic Program*, Osaka, Japan, 479p

## **Anexo I: Trabalhos complementares**

Zaffani, A, Cruz, N, Taffarello, D, Mendiondo, EM (2014) Uncertainties in the Generation of Pollutant Loads in Brazilian Nested Catchment Experiments under Progressive Change of Land Use and Land Cover, *J Phys Chem Biophys* 2014, 5:1 DOI: 10.4173/2161-0398.1000173, <https://www.longdom.org/open-access-pdfs/uncertainties-in-the-generation-of-pollutant-loads-in-brazilian-nested-2161-0398.1000173.pdf>

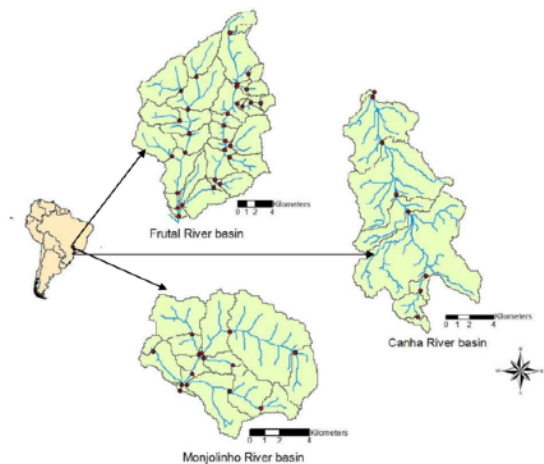


Figure 1: Drainage basins under study and their location in South America

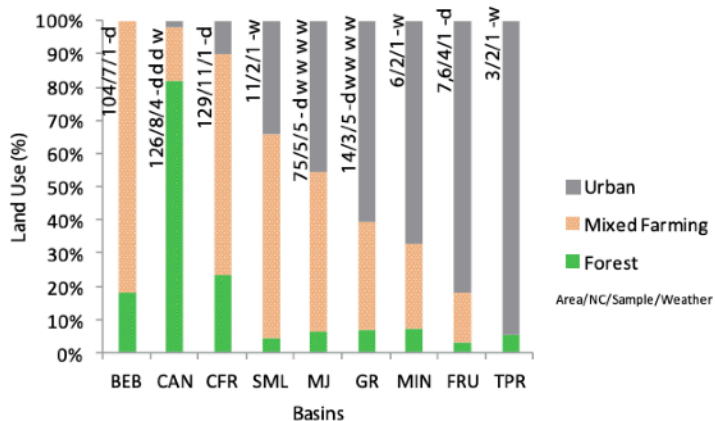


Figure 2: Land use and characterization of nested catchments

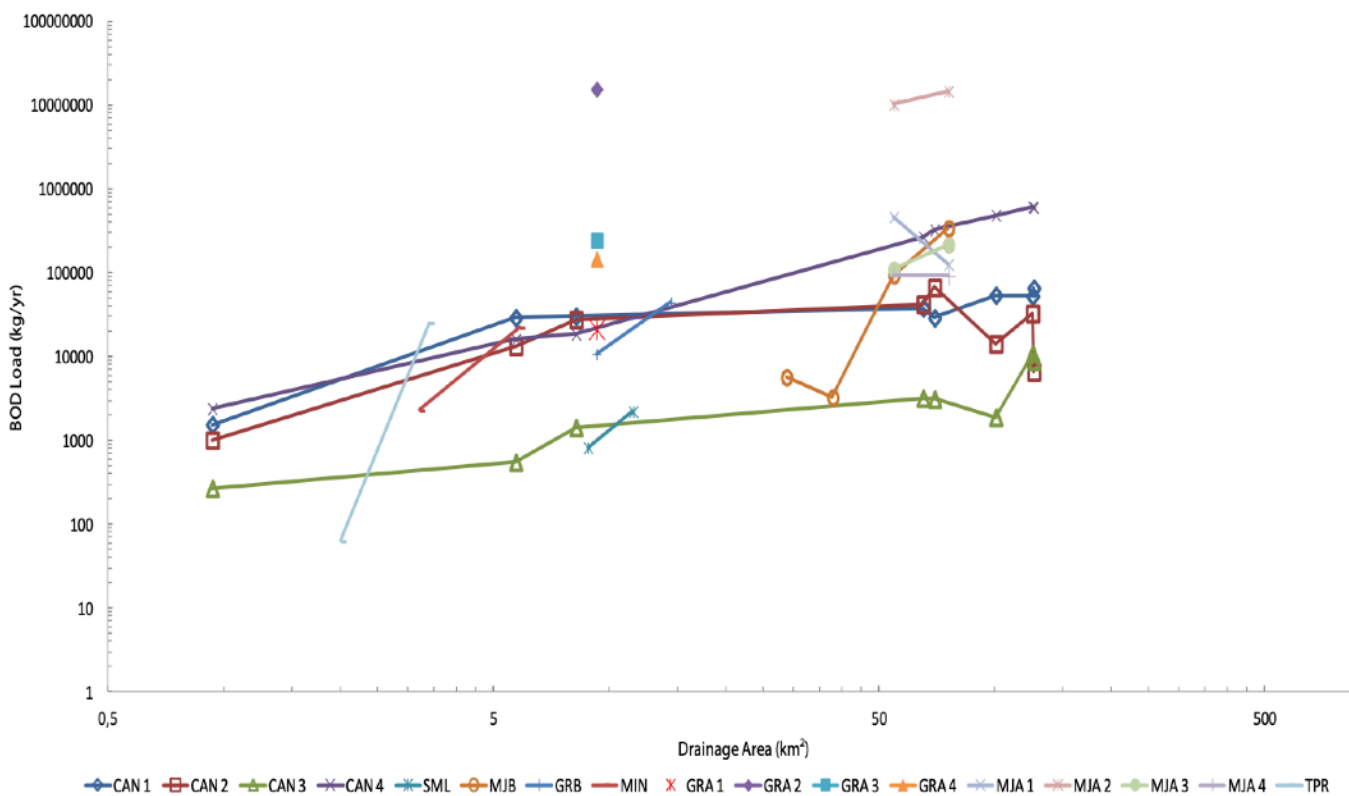


Figure 3: BOD<sub>5,20</sub> load related to the drainage area

Zaffani, A, Cruz, N, Taffarello, D, Mendiondo, EM (2014) Uncertainties in the Generation of Pollutant Loads in Brazilian Nested Catchment Experiments under Progressive Change of Land Use and Land Cover, *J Phys Chem Biophys* 2014, 5:1 DOI: 10.4173/2161-0398.1000173, <https://www.longdom.org/open-access-pdfs/uncertainties-in-the-generation-of-pollutant-loads-in-brazilian-nested-2161-0398.1000173.pdf>

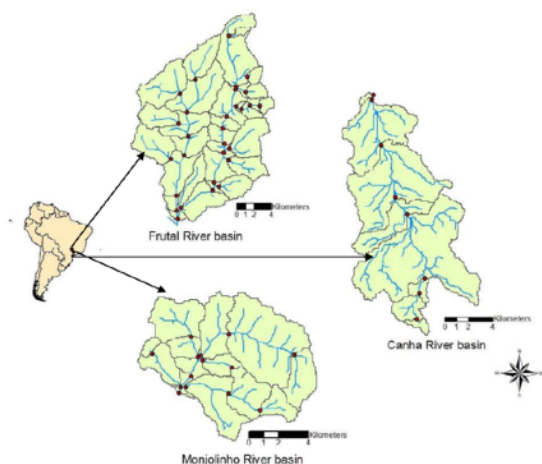


Figure 1: Drainage basins under study and their location in South America

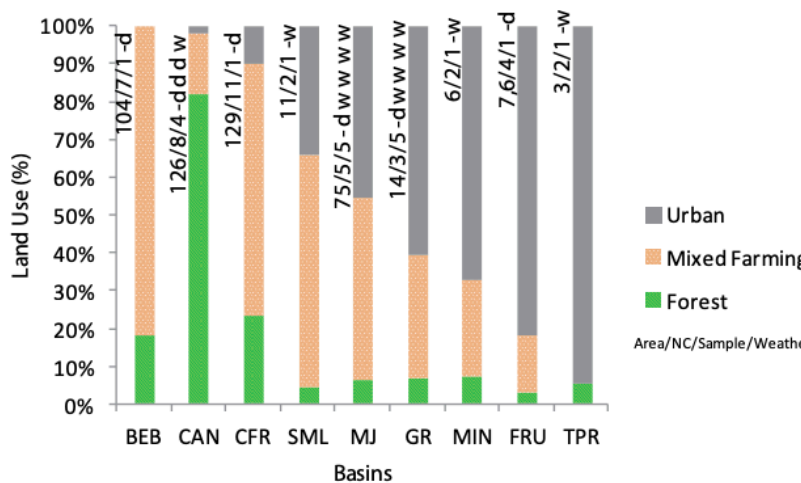


Figure 2: Land use and characterization of nested catchments

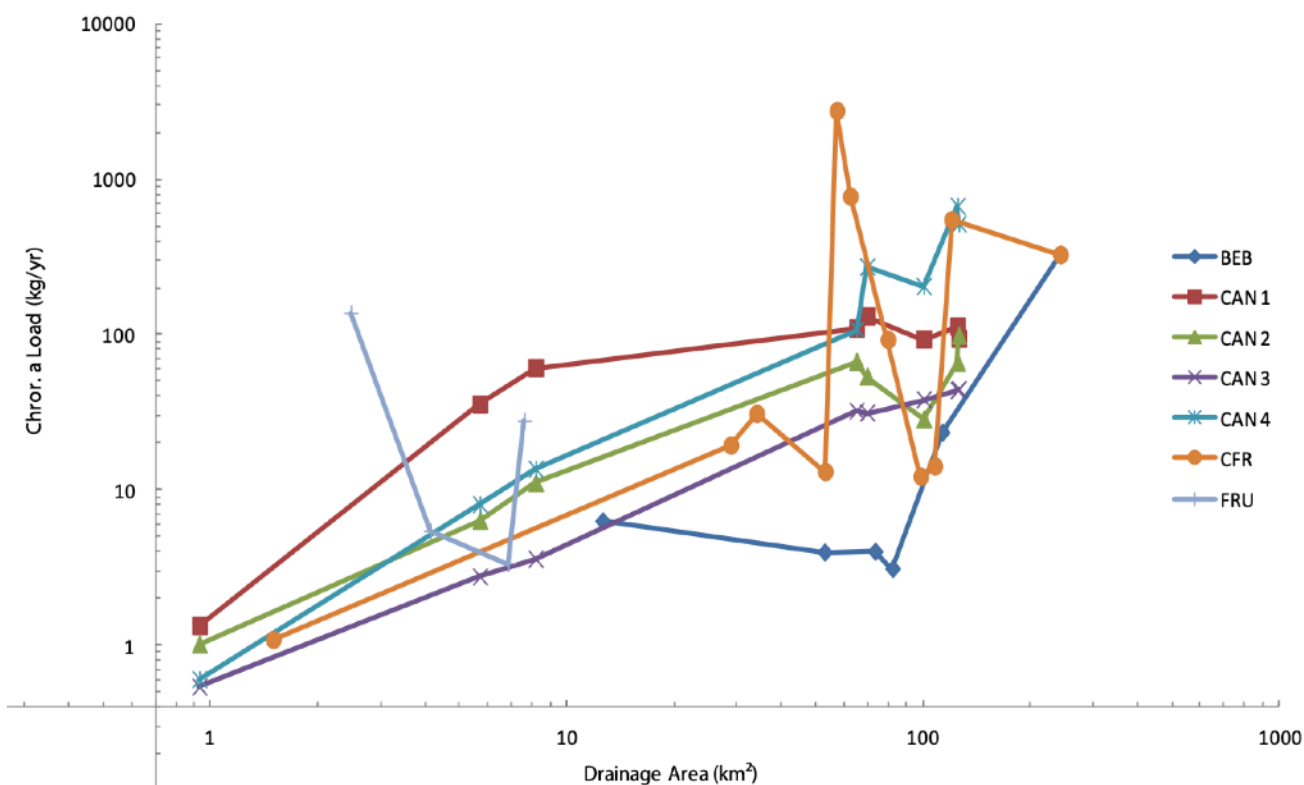


Figure 4: Chlorophyll a load related to the catchment area

Zaffani, A, Cruz, N, Taffarello, D, Mendiondo, EM (2014) Uncertainties in the Generation of Pollutant Loads in Brazilian Nested Catchment Experiments under Progressive Change of Land Use and Land Cover, *J Phys Chem Biophys* 2014, 5:1 DOI: 10.4173/2161-0398.1000173, <https://www.longdom.org/open-access-pdfs/uncertainties-in-the-generation-of-pollutant-loads-in-brazilian-nested-2161-0398.1000173.pdf>

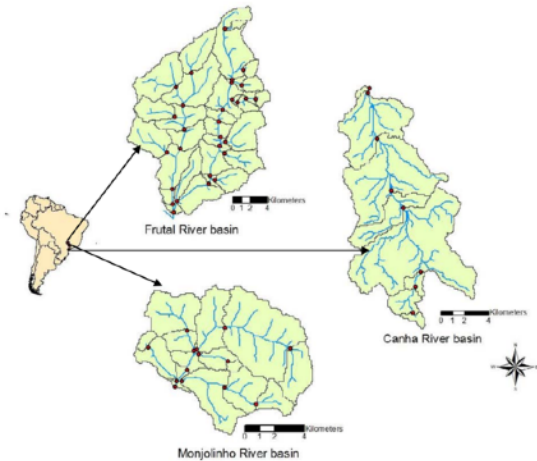


Figure 1: Drainage basins under study and their location in South America

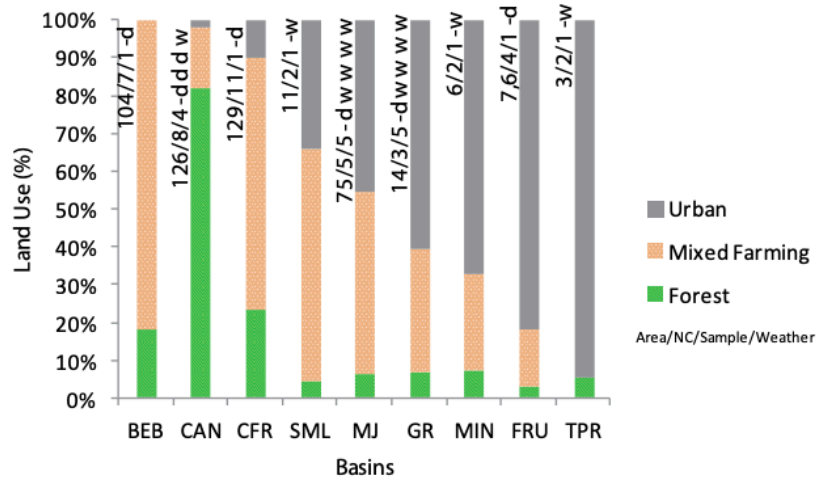


Figure 2: Land use and characterization of nested catchments

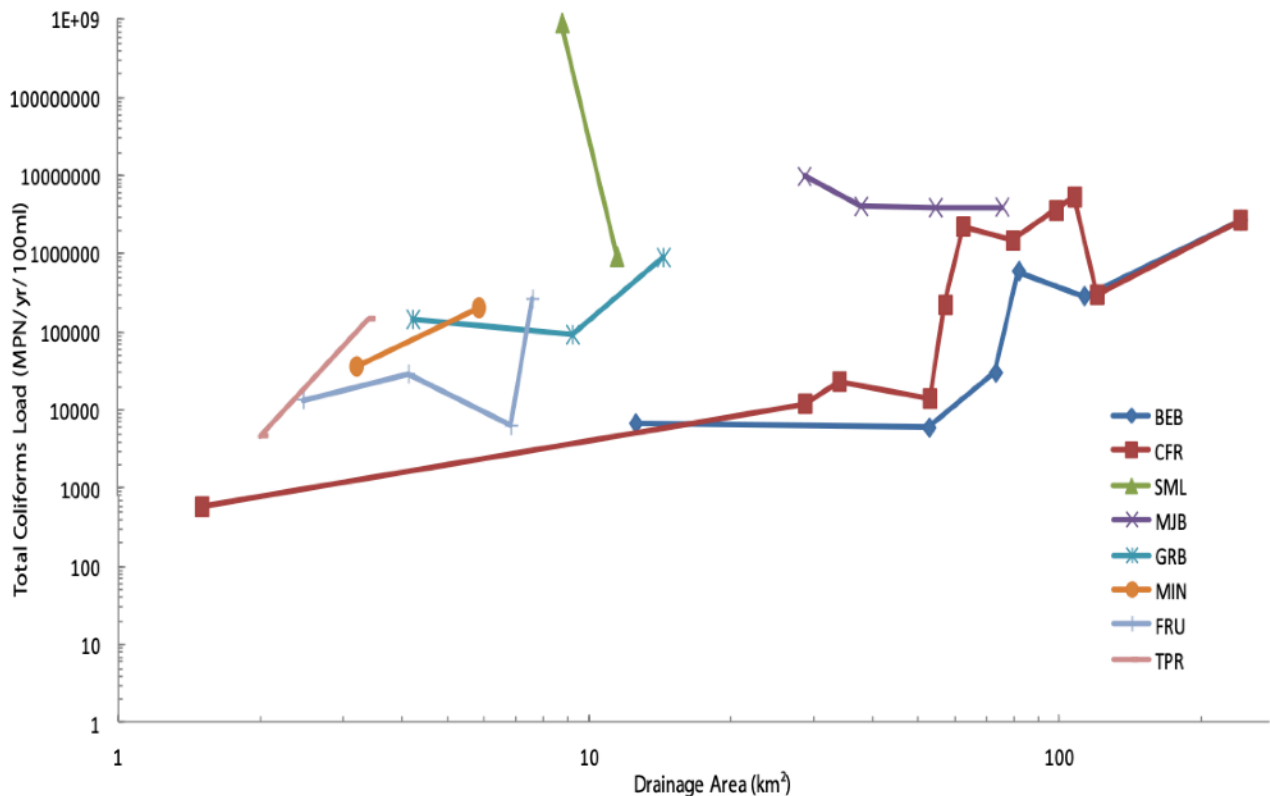


Figure 5: Total coliform loads related to the catchment area



Taffarello, D, Mohor, G S, Calijuri, M C, Mendiondo, E M (2016) Field investigations of the 2013–14 drought through quali-quantitative freshwater monitoring at the headwaters of the Cantareira System, Brazil, *Water International*, 41:5, 776-800, DOI: 10.1080/02508060.2016.1188352, <http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2016.1188352>

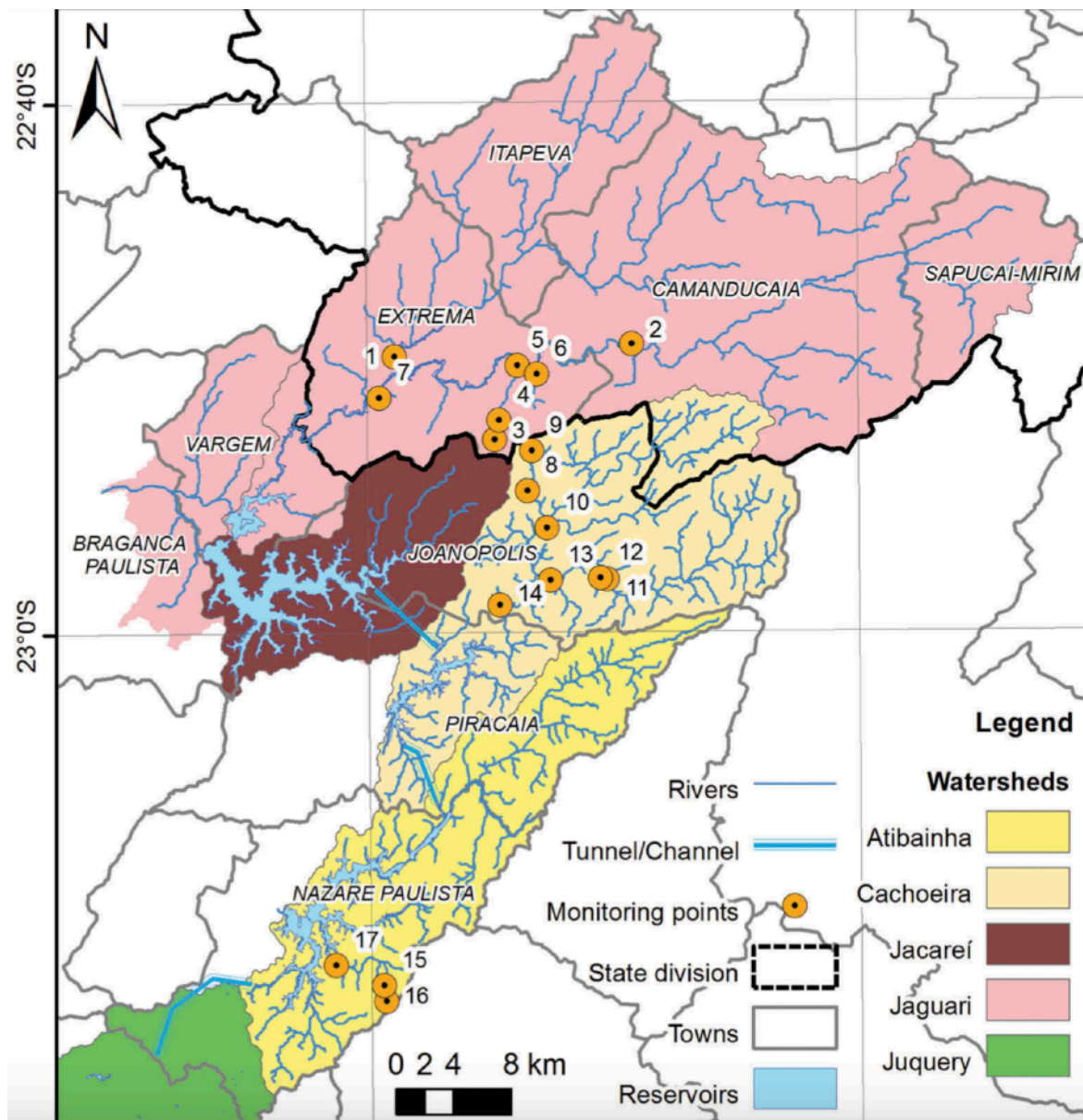
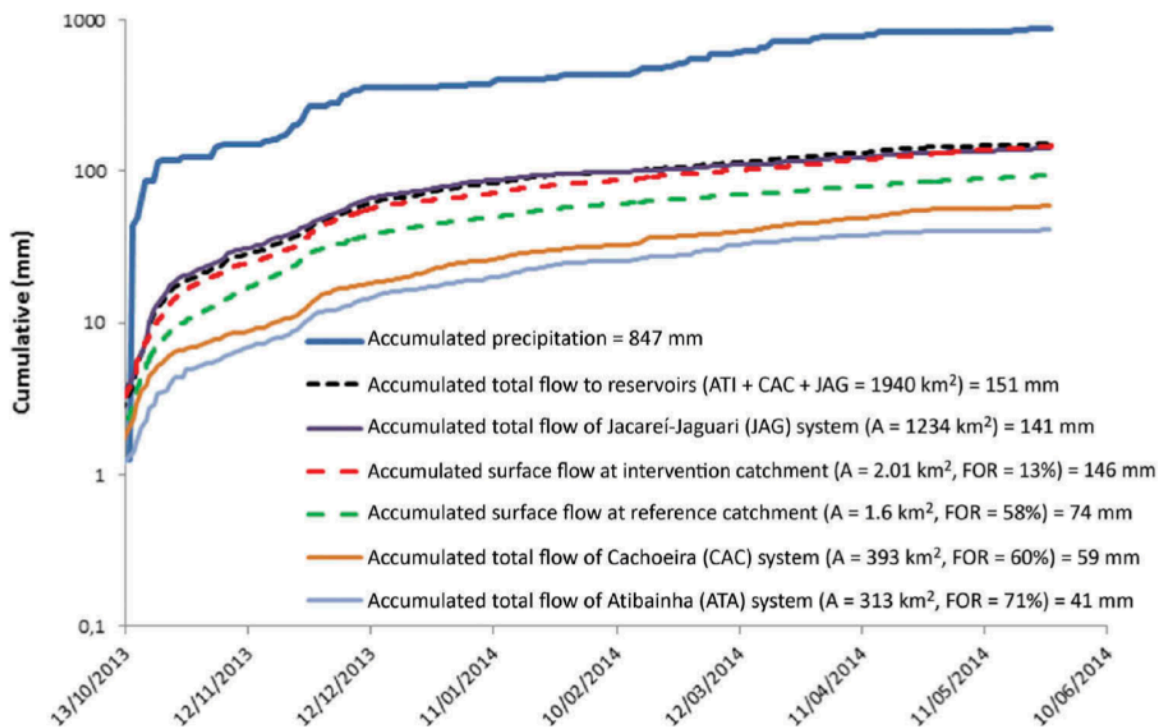


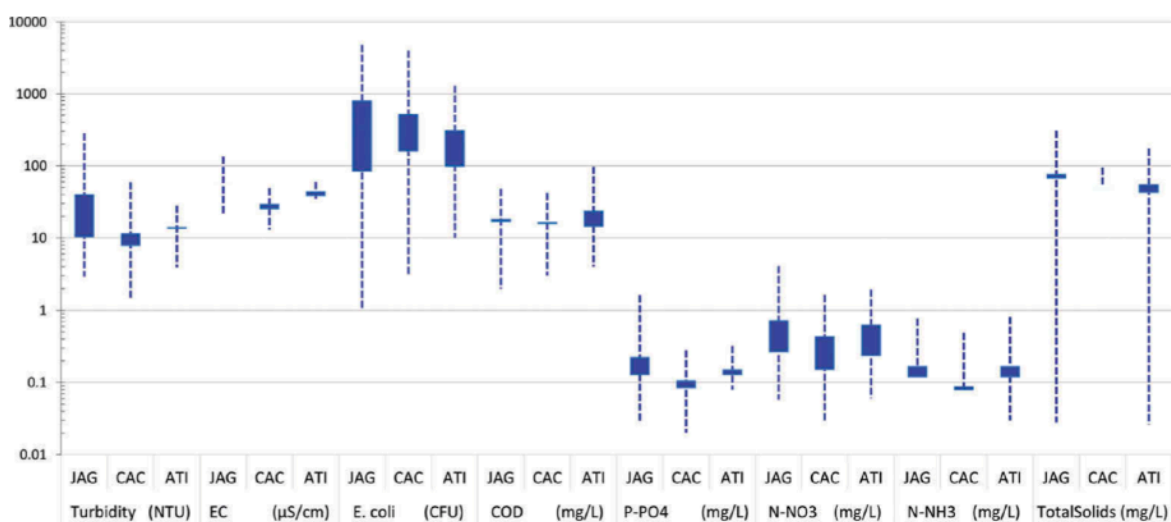
Figure 1. Monitoring points (open circles) during the 2013–14 period plotted with outlets of headwaters of the Cantareira Water Supply System.



Taffarello, D, Mohor, G S, Calijuri, M C, Mendiondo, E M (2016) Field investigations of the 2013–14 drought through quali-quantitative freshwater monitoring at the headwaters of the Cantareira System, Brazil, *Water International*, 41:5, 776-800, DOI: 10.1080/02508060.2016.1188352, <http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2016.1188352>

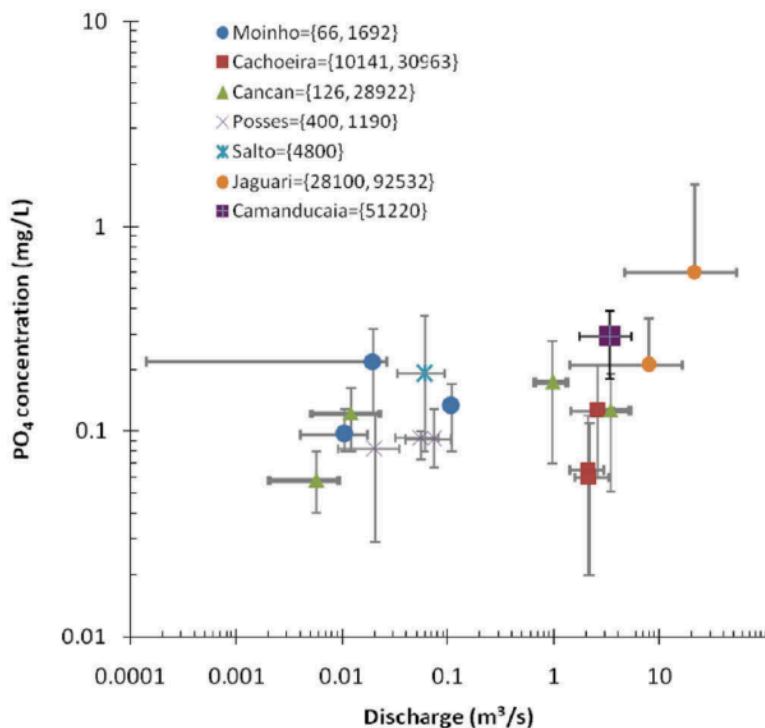


**Figure 4.** Seasonal water yield for nested catchments of the Cantareira Water Supply System. A: drainage area of the catchment. FOR: % of soil covered by forestry.

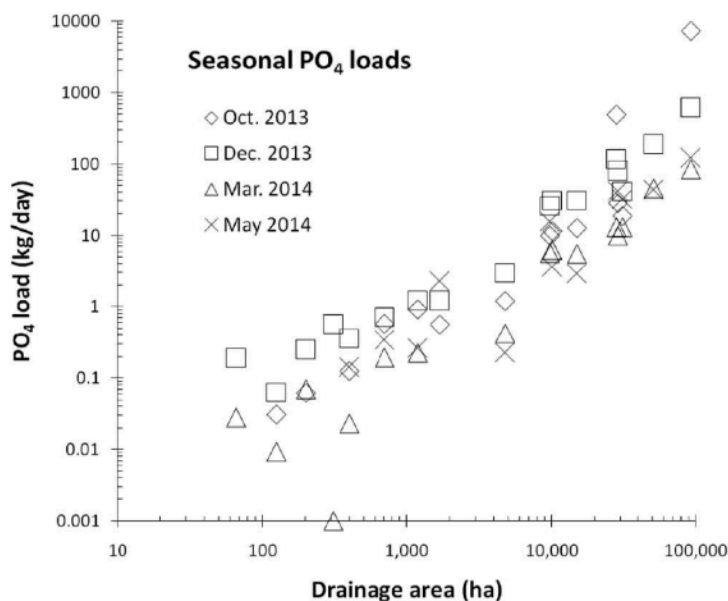


**Figure 5.** Some observed water quality variables, with dimensional units, for 2013–14 at main river tributaries of the Jaguari (JAG), Cachoeira (CAC) and Atibainha (ATI) sub-basins of the Cantareira System, Brazil.

Taffarello, D, Mohor, G S, Calijuri, M C, Mendiondo, E M (2016) Field investigations of the 2013–14 drought through quali-quantitative freshwater monitoring at the headwaters of the Cantareira System, Brazil, *Water International*, 41:5, 776-800, DOI: 10.1080/02508060.2016.1188352, <http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2016.1188352>

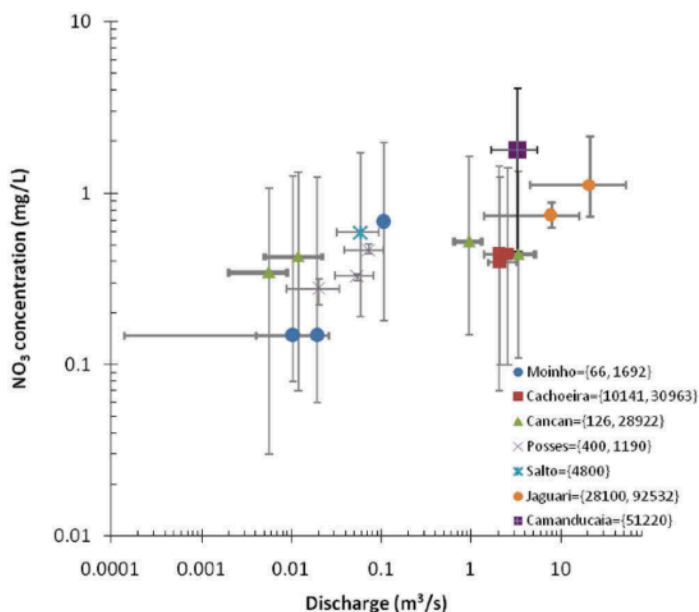


**Figure 6.** Experimental evidence of phosphate concentrations versus observed flow discharges at 17 nested catchment experiment sites in the Cantareira System.

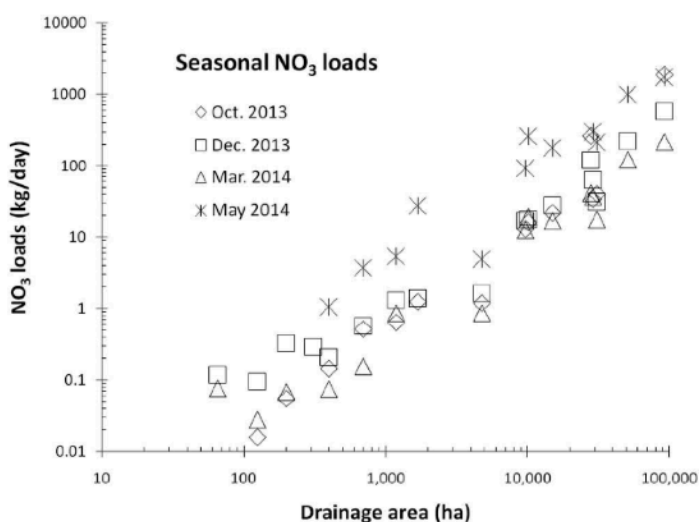


**Figure 7.** Experimental evidence of seasonal phosphate load variability related to drainage area at 17 nested catchment experiment sites in the Cantareira System.

Taffarello, D, Mohor, G S, Calijuri, M C, Mendiondo, E M (2016) Field investigations of the 2013–14 drought through quali-quantitative freshwater monitoring at the headwaters of the Cantareira System, Brazil, *Water International*, 41:5, 776-800, DOI: 10.1080/02508060.2016.1188352, <http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2016.1188352>

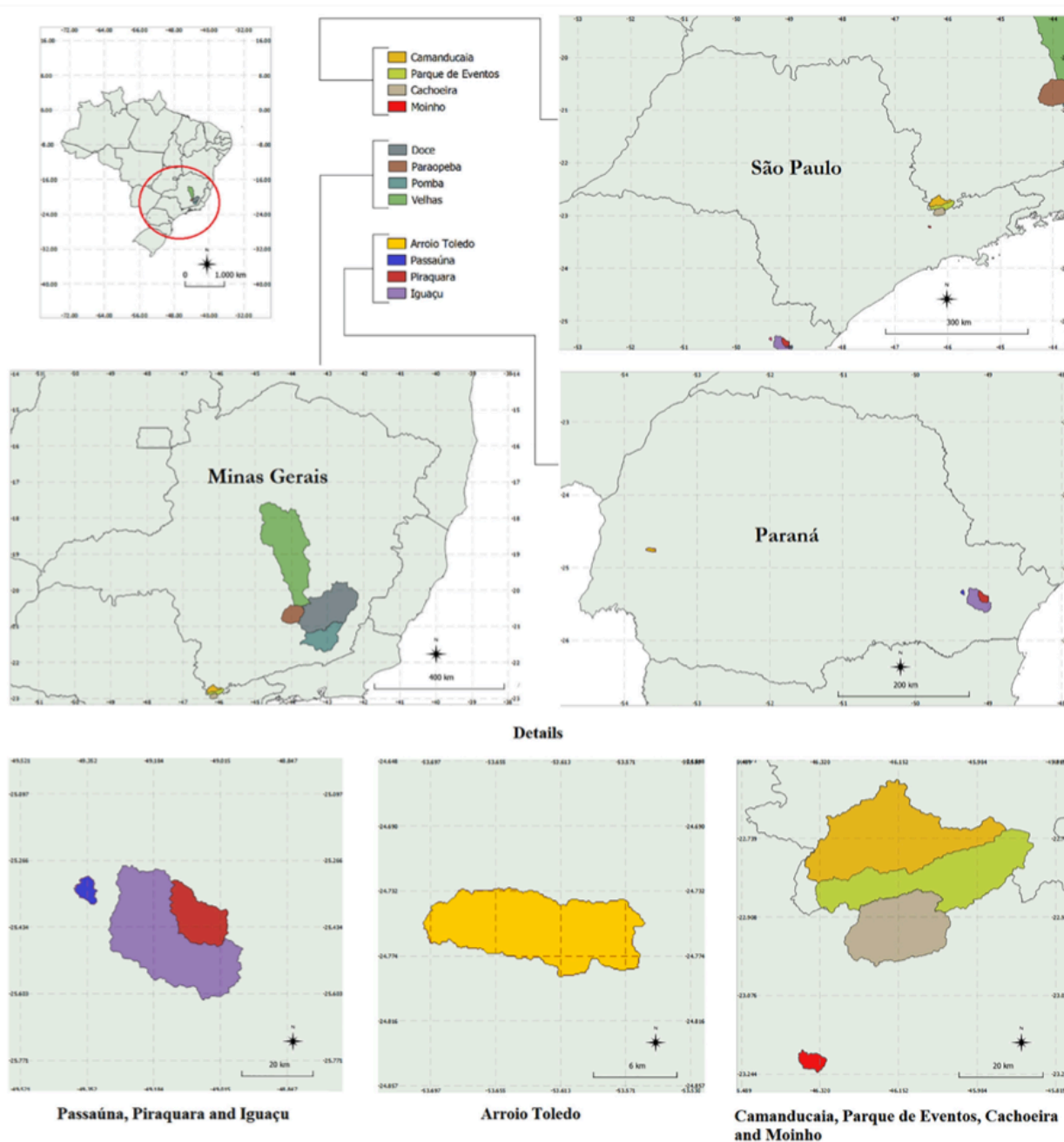


**Figure 8.** Experimental evidence of nitrate concentrations versus observed flow at 17 nested catchment experiment sites in the Cantareira System.



**Figure 9.** Experimental evidence of discharge seasonal nitrate load variability related to drainage area at 17 nested catchment experiment sites in the Cantareira System.

Taffarello, D., Bittar, M S, Sass, K., Calijuri, M C, Cunha, D G F, Mendiondo, E M (2020) Ecosystem service valuation method through grey water footprint in partially-monitored subtropical watersheds, Science of the Total Environment 738 (2020) 139408, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139408>



**Fig. 3.** Scheme of subtropical watersheds selected for this study: Rio das Velhas, Paraopeba, Doce, Pomba, Camanducaia (F23 Sabesp (Brazilian water and waste management company) monitoring post), Parque de Eventos (Minas Gerais state, Southeast Brazil), Cachoeira and Moinho (São Paulo State), Passauna, Piraquara, Toledo and Iguacu (Parana state, South Brazil).

Taffarello, D., Bittar, M S, Sass, K., Calijuri, M C, Cunha, D G F, Mendiondo, E M (2020) Ecosystem service valuation method through grey water footprint in partially-monitored subtropical watersheds, Science of the Total Environment 738 (2020) 139408, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139408>

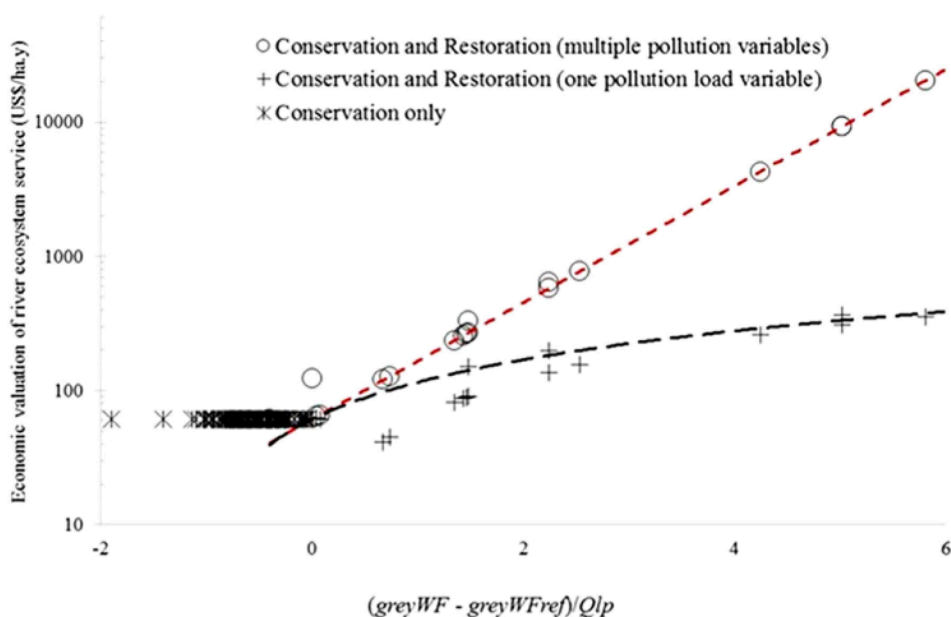


Fig. 6. Uncertainty of regional valuation of regulating services of autodepuration of TP related to  $(greyWF_r - greyWRef_r)/Qlp$ , at  $Prob = [8\%, 100\%]$  in Brazilian studied watersheds.

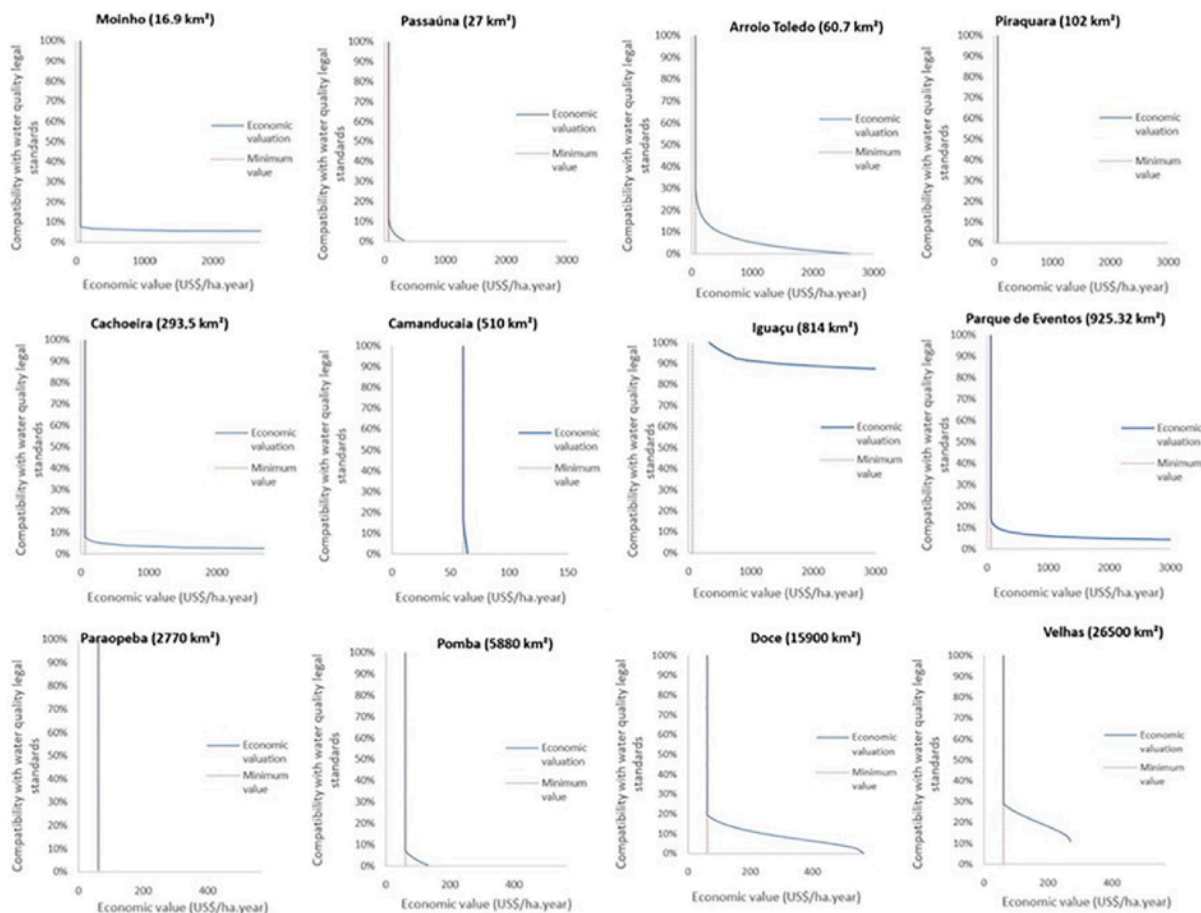


Fig. 5. Results of  $V_{WaterES}$  (Total Phosphorus) based on the magnitude of non-compliance of  $WD = (greyWF_{obs} - greyWRef_r)/Qlp$  with  $RVC = 61 US\$/ha.year$  applied to 12 Brazilian watersheds.