

AVALIANDO A RELAÇÃO ENTRE A ADEQUABILIDADE HIDROLÓGICA E O POTENCIAL ESTABELECIMENTO DE ECÓTONOS

Lafayette Dantas da Luz¹

Resumo - A variabilidade hidrológica tem sido reconhecida como de fundamental importância para os ecossistemas aquáticos e transicionais, sendo uma variável essencial para os processos biogeoquímicos. A hidrologia molda ambientes, habitats, e comunidades, contribuindo para a riqueza de espécies e diversidade. No entanto, a variabilidade hidrológica associada ao fim mencionado não tem sido abordada quantitativamente e relacionada com os benefícios ecológicos esperados. Este artigo apresenta um procedimento para a quantificação da variabilidade hidrológica, enfocando elementos associados ao potencial para o desenvolvimento das vegetação em ecótonos, e mais especificamente em áreas úmidas, tipo várzeas de inundação. Uma função simplificada relacionando a dinâmica hidrológica e a adequabilidade para o fim mencionado é assumida como exemplo. Por fim, séries temporais de um Índice de Adequabilidade da dinâmica hidrológica foram geradas e analisadas em termos de seu possível desempenho (performance), isto é em termos de sua possível habilidade de preservar e reproduzir o ambiente em questão. Isso objetiva a caracterização do desempenho hidrologia-vegetação de sistemas hídricos, propiciando comparações entre os mesmos, ou comparações entre cenários de um dado sistema. Espera-se com isso proporcionar elementos úteis para ações de planejamento e gestão ambiental.

Abstract - In natural ecosystems, hydrologic variability has been recognized as a crucial characteristic, which is a driving variable of biogeochemical processes. Besides, it shapes landscapes, habitats, and communities, and contributes for species richness and biodiversity as well. However, such variability has been barely quantified and related to the expected ecological benefits. The present paper presents a procedure for quantifying hydrological variability and for relating it to the potential ability for marsh vegetation establishment. A simple suitability function relating hydrological dynamics and suitability was proposed as an example. Finally, time series of dynamics suitability were computed and assessed in terms of their likely performance or, in other words, in

¹ Universidade Federal da Bahia / Escola Politécnica – Rua Aristides Novis, 2, Federação, Salvador, Ba, CEP 40.210-630 – (71) 245-6126 – lluz@ufba.br

terms of their underlying ability of preserving and reproducing the marsh. All this is intended for performance characterization and comparisons among diverse hydrologic scenarios, which may be of use for environmental planning and management.

Palavras-chave - Hidroperíodo, habitat, índices de adequabilidade, índices de performance, impactos ambientais, uso do solo, vegetação, ecótonos, áreas úmidas, várzeas, *wetlands*

INTRODUÇÃO

A variabilidade dos fatores ambientais em sistemas naturais tem sido reconhecida como característica de extremo valor, resultando em riqueza de espécies e diversidade. A hidrologia situa-se como uma das mais importantes variáveis que atua moldando paisagens, ambientes, e habitats em diversas escalas espaciais e temporais. Trata-se de variável condutora dos complexos processos biogeoquímicos e no estabelecimento da fauna e flora que ocorre nos ambientes aquáticos, e ainda mais nos ambientes transicionais – os ecótonos. Porém tal variabilidade hidrológica não tem sido bem entendida, explicitada, quantificada, e relacionada aos benefícios ecológicos esperados.

Comunidades podem assimilar as alterações ambientais através de uma gama de estratégias comportamentais ou fisiológicas. Estas estratégias podem ser tais como: movimento, dispersão, readaptação ambiental, ou mesmo nenhuma ação (Willard and Hiller, 1989). A idéia de que a produção biológica is incrementada por meio de uma variedade de processos durante os ciclos de inundações inspiraram o conceito referido como “flood-pulse” (Bayley, 1995). Este autor assume a hipótese de que “ há uma taxa ótima de elevação dos níveis d’água a qual maximizaria a produção (biológica). Se a taxa for muito rápida, os processos biológicos nas margens não seriam capazes de manter-se adequadamente diante do avanço das águas. Ao contrário, se a taxa for muito lenta, a deficiência de oxigênio poderia inibir a fauna e as taxas de decomposição. Junk et al. (1989) salientam que a pulsação das cheias é “a principal força responsável pela existência, produtividade, e interações entre a biota em sistemas rio-planícies de inundação”.

Diversos aspectos caracterizam as áreas úmidas e devem ser consideradas para a sua classificação e delimitação (Cowardin et. al, 1979). O tipo de vegetação é uma das mais visíveis características que definem a tipologia de uma área úmida.

Diversas espécies aquáticas, anfíbias, e mesmo terrestres dependem das estruturas oferecidas pelas áreas úmidas, pelo menos por algum período de seus ciclos de vida. Esses ambientes transicionais, mais ou menos frequentemente inundados, oferecem estrutura, abrigo, e alimento, dentre outros benefícios, para o desenvolvimento daquelas espécies. Portanto a existência e

extensão das áreas úmidas transicionais são requisito e condição, mesmo parcialmente, para a qualidade do habitat. Tal existência e extensão dependem, por outro lado, dos padrões hidrológicos de níveis e fluxos das águas. Alterações em tais padrões moldam diferentemente os ambientes no médio e longo prazos.

Keddy and Reznicek (1984, 1986) and Keddy (2000) apresentaram um modelo que associa tipos de vegetação costeira da região dos Great Lakes, EUA/Canadá, com os níveis das águas e suas frequências. Tal modelo associa a vegetação emergente que caracteriza as várzeas de inundação (marshes) à faixa de elevações situadas entre a média de longo-termo e os níveis d'água mínimos. Entretanto, os autores enfatizam que os limites entre os tipos de vegetação variam à medida que os níveis das águas se modificam. Isso também depende de outros fatores que agem em conjunto com a hidrologia, tais como a declividade dos terrenos, tipo de substrato, ação de ondas, química da água, e incêndios ocasionais.

As relações entre os níveis de água característicos e o provável tipo de vegetação encontrado em cada faixa de elevações das águas marginais são representadas esquematicamente na Figura 1, assim como o nível de tolerância e escalas de tempo relacionadas com enchentes e estiagens, derivadas da literatura.

Luz and Loucks (2002) apresentaram uma metodologia para a avaliação do desempenho da adequabilidade de habitat para uma espécie de peixe, como bioindicador, de uma área úmida de várzea, a fim de subsidiar o planejamento e gerenciamento do uso dos solos e das águas. Os autores ressaltam que os fatores analisados quanto a adequabilidade do habitat para o bioindicador foram essencialmente relacionadas à presença de profundidades das águas, sua frequência, e a estabilidade das mesmas, deixando de lado o aspecto da variabilidade hidrológica, reconhecido como um elemento ambiental essencial, a ser ainda investigado e agregado nas análises de habitat.

Este artigo apresenta uma extensão da análise feita pelos autores supramencionados ao referir-se à variabilidade hidrológica.

Um Índice de Dinâmica Hidrológica é apresentado, buscando representar de forma inicial e simples alguns aspectos da variabilidade considerados importantes para o estabelecimento das comunidades da flora marginal aos cursos d'água.

Muitos autores () mencionam ou usam aspectos de análise de frequência quando referem-se ao desenvolvimento da biota em área úmidas. Tal análise, aplicada a níveis e profundidade das águas, deve referir-se sempre aos aspectos de magnitude e também duração do evento.

A avaliação da dinâmica hidrológica foi desenvolvida considerando períodos contínuos de anos (1 a 10 anos), os quais relacionam-se a escalas de tempo nas quais bancos de sementes e brotações são armazenadas e/ou maturadas, em conjunto com tempos requeridos para o crescimento

de dadas espécies. Tais escalas de tempo são referidas, também, aos períodos de tolerância das plantas a enchentes ou estiagens.

Um Índice de Adequabilidade em função da dinâmica hidrológica é proposto, visando a avaliação do impacto da variação dos níveis d'água no potencial para o desenvolvimento e manutenção de uma área úmida de várzea. Tal índice é destinado à caracterização da adequabilidade da dinâmica hidrológica, possibilitando comparações entre cenários.

Um caso de estudo é apresentado como exemplo, referindo-se a uma área úmida de várzea do rio Irondequoit, afluente ao Lago Ontário, no estado de New York, EUA.

ÍNDICE DE DINÂMICA HIDROLÓGICA (HDI)

O Índice de Dinâmica Hidrológica aqui proposto é uma forma de focar aspectos de séries temporais de níveis d'água não expressos diretamente via análises de frequência tradicionais ou análises estatísticas básicas. Este índice pode assumir valores entre 0 e 1, indicando respectivamente estabilidade absoluta e uma alta variabilidade hidrológica. O mesmo pode ser computado como um único número relativo a uma série temporal de níveis d'água, porém seu real valor é possibilitar comparações entre cenários hidrológicos diversos. Assim, o HDI busca capturar a diferença entre um dado cenário hidrológico comparativamente a um cenário de referência. Este cenário de referência apresentaria, então, características hidrológicas que devem servir de base de comparação. Tais características podem expressar as condições hidrológicas naturais, não-alteradas, anteriores, ou desejadas. Ou mesmo os seus opostos.

O HDI consiste de três medidas parciais que levam em conta as flutuações intra-anuais dos níveis d'água, bem como as variabilidades ao longo de sequências de anos contínuos. Tal número de anos contínuos é aqui referido como “ciclos-de-tempo”, os quais foram considerados de 1 a 10 anos contínuos. Os ciclos-de-tempo são deslocados sequencialmente ao longo das séries temporais para a computação do HDI.

O Índice de Dinâmica Hidrológica para um ciclo-de-tempo l , num ano y , é obtido pela média geométrica de três componentes, ou medidas parciais, como indicado a seguir. Os três componentes são: Oscilação, Amplitude Relativa, e Desvio Relativo.

$$HDI_{y,l} = \left(Oscilação_l * AmplitudeRelativa_{y,l} * DesvioRelativo_{y,l} \right)^{1/3}$$

Oscilação:

O Índice de Oscilação quantifica o grau de flutuação dos níveis de água em cada ciclo-de-tempo no longo prazo, isto é ao longo dos anos de uma série temporal, considerando uma faixa específica de elevações de significância ecológica ou biológica.

Como um exemplo de faixa específica de elevações, as áreas de inundação de várzea (*marshes*) no estuário do rio Irondequoit, são esperadas de se estabelecer entre a média e os mínimos dos níveis d'água do rio, como proposto no modelo de Keddy and Reznicek (1984) and Keddy (2000) para a região costeira dos Great Lakes.

O HDI é uma medida de frequência que, no entanto, busca capturar o aspecto da oscilação dos níveis d'água dentro de uma ciclo-de-tempo, simultaneamente ao cômputo da ocorrência de níveis altos e baixos das águas. Níveis baixos, temporariamente expondo o substrato das várzeas, são importantes para possibilitar a germinação de sementes e estabelecimento de brotações. Níveis altos, causando inundação do substrato, tem um papel crítico na criação de condições adversas para a invasão por plantas de ambientes terrestres, que caso contrário competiriam e substituiriam a flora típica das várzeas (*marshes*). Este componente do HDI tem o objetivo de medir a frequência das mudanças de fase dos níveis em torno da faixa de elevações de interesse, num ciclo-de-tempo l , ao longo dos períodos de tempo (anos). O mesmo é calculado por:

$$\text{Índice de Oscilação}_l = (n^\circ \text{ de mudanças de fase}_l) / (n^\circ \text{ total de períodos de tempo})$$

Uma mudança de fase ocorre quando os níveis d'água mínimo e máximo diários, num ciclo-de-tempo de l anos, alcança posições respectivamente abaixo e acima das elevações de referência. Estas são relacionadas aos limites da faixa de elevações de significância ecológica sob análise.

Keddy and Reznicek (1984) definem que tais limites entre tipos de ambientes/tipos de vegetação migram a medida que os padrões dos níveis d'água mudam. Portanto a adoção de níveis referenciais estáticos, como a média de longo período e o mínimo dos níveis d'água não representariam tal dinâmica. Assim, foi adotado o uso de médias móveis para representar a migração potencial dos ecótonos em questão, resultante das variabilidades hidrológicas de longo período.

Focando no caso das áreas úmidas de várzea (*marshes*), seu limite superior foi assumido como igual à média móvel dos níveis d'água médios mensais dos 10 anos anteriores a cada período de tempo. Assim, esse limite superior é o referencial para a avaliação dos níveis máximos da série temporal (cenário) sob análise. Similarmente, o limite inferior relacionado à várzea de inundação foi assumido como a média do referencial anteriormente mencionado e a média móvel dos níveis d'água mínimos mensais dos 10 anos anteriores a cada período de tempo.

A adoção de médias móveis de 10 anos como referência fundamenta-se nas sugestões encontradas na literatura de que extensões de 5-10 anos contínuos de inundação resulta em efeitos degenerativos na vegetação emergente. Ainda, tem sido observado que 10 ou mais anos de inundação elimina completamente a vegetação perene emergente (Harris & Marshal, 1963; van der Valk & Davis, 1979; de Swart et al., 1994; Chow-Fraser et al., 1998; Seabloom et al., 2001).

Por outro lado, apenas um ano de seca resulta no declínio da vegetação emergente, enquanto secas mais prolongadas resultam no estabelecimento de vegetação tipicamente terrestre. Diversos pesquisadores reportam que a ocorrência de pelo menos um evento de seca a cada um a dez anos favorece o rejuvenescimento das várzeas e a germinação de sementes, muito embora plantas emergentes perenes podem reproduzir-se por meio do espalhamento vegetativo de rizomas (Meeks, 1969; van der Valk & Davis, 1979; Seabloom et al., 2001). Esses elementos justificam a adoção da média móvel de 10 anos para os mínimos anuais dos níveis d'água mensais.

Uma ilustração esquemática dos níveis de referência mencionados e a ocorrência de mudanças de fase é apresentada na Figura 2.

Amplitude Relativa:

A Amplitude Relativa busca quantificar a magnitude da diferença entre os níveis máximo e mínimo diários no ano y , considerando os últimos l anos, isto é o ciclo-de-tempo (Figura 3). Com a finalidade de unificação de escala e comparação, as amplitudes absolutas computadas para os ciclos-de-tempo, do cenário sob análise, são divididas pela máxima amplitude observada na série completa de níveis d'água do cenário de referência. Portanto o denominador da expressão da Amplitude Relativa, abaixo, é um valor único para a série temporal do cenário de referência (base de comparação entre cenários hidrológicos).

Maiores as amplitudes absolutas, maiores as contribuições para o Índice de Dinâmica Hidrológica (HDI). Em termos biológicos, maiores as amplitudes, mais largas serão as faixas entre os ambientes aquático e terrestre nas quais as estruturas típicas dos ecótonos podem estabelecer-se.

A Amplitude Relativa varia entre 0 e 1, respectivamente a nenhuma e à máxima diferença entre o mais elevado e o mais baixo dos níveis d'água ocorridos. A Amplitude Relativa do cenário s , no ano y , num ciclo-de-tempo l , pode ser expressa por:

$$Amplitude\ Relativa_{s,y,l} = \frac{Max(nível_{s,y,l})_i - Min(nível_{s,y,l})_i}{Max(nível_{ref})_j - Min(nível_{ref})_j},$$

onde:

$(nível_{s,y,l})_i$ = vetor de níveis d'água diários relativos ao cenário sob análise (s), no ano y , nos l anos anteriores (ciclo-de-tempo);

$i = 1, 2, \dots, 365$; dias do ano y ;

$(nível_{ref})_j$ = vetor de níveis d'água diários da série completa do cenário de referência (ref);

$j = 1, 2, \dots, (365*N)$; dias dos N anos de simulação.

Desvio Relativo:

Este terceiro componente do HDI busca identificar o quanto as oscilações de curto-prazo (1 a 10 anos) distanciam-se da média da série temporal de níveis sob análise. Este índice parcial foi assumido como a “distância” relativa entre os pontos centrais das amplitudes absolutas (Figura 4), computadas conforme exposto anteriormente, e a média da série de níveis d’água. Com isso, identifica-se os desvios que podem ocorrer a médio e longo prazos (períodos maiores que 10 anos). Tais desvios contribuem para o deslocamento potencial, ou a potencial possibilidade de migração, dos ecótonos para elevações superiores e inferiores.

O Desvio relativo é obtido por:

$$\text{Desvio Relativo}_{s,y,l} = (\text{Distância Absoluta}_{s,y,l}) / (\text{Distância Absoluta}_{ref,l}),$$

onde :

$$\text{Distância Absoluta}_{s,y,l} =$$

$$ABS [(max\{níveis_{s,y,l}\}_i + min\{níveis_{s,y,l}\}_i) / 2 - (nível\ médio_s)],$$

e

$$\text{Distância Absoluta}_{ref,l} =$$

$$ABS [(max\{níveis_{ref,l}\}_j + min\{níveis_{ref,l}\}_j) / 2 - (nível\ médio_{ref,l})]$$

A *Distância Absoluta*_{s,y,l} é o valor absoluto da diferença entre o ponto central da máxima amplitude no ano *y* e ciclo-de-tempo *l*, e o nível d’água médio, para o cenário sob análise.

A *Distância Absoluta*_{ref,l} é o valor absoluto da diferença entre o ponto central da máxima amplitude observada na série de dados de níveis d’água, considerando um ciclo-de-tempo *l*, da série temporal de níveis do cenário de referência (*ref*) e sua média.

UM ÍNDICE DE ADEQUABILIDADE RELACIONADO À DINÂMICA HIDROLÓGICA

A variabilidade hidrológica natural, ou sua dinâmica, é benéfica e definidora do estabelecimento da biota dos vários ambientes e ecótonos. No entanto, a magnitude desejada para tal variabilidade não tem sido quantificada. Ainda, tal aspecto é inerentemente de difícil quantificação. Uma frequência extremamente elevada de mudanças de fase, entre enchentes e secas, poderia ser prejudicial por não prover os tempos mínimos adequados e requeridos para o estabelecimento das espécies, assim como poderia impactar negativamente os ciclos e processos biogeoquímicos.

Nesse sentido o Índice de Dinâmica Hidrológica, HDI, é útil para quantificar a variabilidade hidrológica, mas é inadequado para assumir o papel de indicador da adequabilidade para o

estabelecimento da vegetação típica das várzeas inundáveis (*marshes*). Essa afirmação baseia-se no fato de que um HDI elevado não relacionaria-se, monotonicamente, com a melhor condição hidrológica para a persistência do ecótono, as várzeas inundáveis.

Uma função matemática para descrever a “adequabilidade” relacionada à dinâmica hidrológica somente pode ser baseada na experiência de especialistas. “Adequabilidade” deve ser inferida a partir de informações indiretas (e.g., tamanho de populações, grau de diversidade de comunidades) já que não se trata de fator mensurável. No entanto, uma “função de adequabilidade” genérica que é frequentemente identificável em dados biológicos fornece um ponto de partida de utilidade, e assume a forma de U-invertido. Esse formato assume a existência de uma máxima adequabilidade para uma certa faixa de valores de dinâmica hidrológica, e condições menos favoráveis à medida que se tenha menores ou maiores valores para a dinâmica. Assim o formato U-invertido assume, genericamente, os princípios mencionados anteriormente quanto as relações entre dinâmica hidrológica e a adequabilidade para um potencial estabelecimento de um ecótono.

Utilizando o Índice de Adequabilidade proposto, pode-se gerar séries temporais dos índices de adequabilidade hidrológica esperados. Avaliações adicionais sobre o desempenho do sistema hidrológico para os fins considerados podem ser desenvolvidas com base em índices de desempenho (*performance*) usuais.

ÍNDICES DE DESEMPENHO RELACIONADOS À ADEQUABILIDADE HIDROLÓGICA PARA O ESTABELECIMENTO DE ECÓTONOS

Os conceitos referentes a tradicionais índices de desempenho (*performance*) são baseados na idéia de um valor referencial delimitados entre os estados satisfatório e não-satisfatório de um sistema. Frequentemente, na área das engenharias, estados não-satisfatórios, ou estados de falha, têm sido referidos como eventos em que cargas são maiores que a resistência da estrutura ou sistema (Yen, 1987; Duckstein and Plate, 1987; Ganoulis, 1994; Mays and Tung, 1992). Tais procedimentos têm sido adaptados à avaliação de sistemas naturais e ecossistemas (Bain and Loucks, 1999; Knapp et al., 2000). No caso de ecossistemas, *cargas* são referidas como *estressores*, *resistências* são relacionadas com a *capacidade de suporte*, e *falha* é associado a *estresse*, *degradação*, *acidente*, ou *dano* (Odum, 1985; Engel et al., 1999). Funções de adequabilidade como apresentadas no item anterior são baseadas nos conceitos de capacidade de suporte do ecossistema e têm sido utilizadas em avaliações de risco ecológico (Rand and Newman, 1998).

Nos estudos desenvolvidos, níveis da água são considerados “estressores”, e um evento de falha é aquele no qual o Índice de Adequabilidade (medida do grau de estresse) ocorre com um valor abaixo daquele assumido como referencial.

Loucks (1997) refere-se à questão da sustentabilidade de sistemas de recursos hídricos e apresenta medidas de desempenho dos mesmos. Os índices de desempenho considerados na presente metodologia são:

- **Confiabilidade** (reliability): a probabilidade de uma condição ou estado de sucesso
- **Resiliência** (resiliency): a probabilidade que um estado de sucesso ocorra no próximo período de tempo após a ocorrência de um estado de falha,
- **Vulnerabilidade**: mede a magnitude e extensão dos estados de falha, sendo desenvolvido em termos de:
 - o Magnitude esperada de falha;
 - o Magnitude individual da vulnerabilidade (EV) com $P[EV > ev]$;
 - o Magnitude cumulativa média da vulnerabilidade (CEV) com $P[CEV > cev]$;
 - o Duração esperada da falha; e
 - o Duração da vulnerabilidade (DV) com $P[DV > dv]$;

onde $P[.]$ é a probabilidade estimada da categoria em questão ser maior que um certo valor.

Informações sobre como esses índices de desempenho são calculados e como foram aplicados às avaliações referidas neste artigo encontram-se no artigo de Luz (2003), nos Anais deste Simpósio, ou em Luz (2002).

APLICAÇÃO A UM ESTUDO DE CASO

A metodologia apresentada foi aplicada ao caso da área úmida estuarina (*wetland*) do rio Irondequoit, estado de New York, EUA. Tal área recebe as águas de 391 km² da bacia de drenagem à montante, sendo ligada ao Lago Ontario pela Irondequoit Bay. A vegetação predominante na mesma são “*cattails*” (*Typha glauca*). Os fluxos hídricos têm sido alterados na bacia por conta das ocupações ocorridas nos últimos três séculos, ao passo que as influências do Lago Ontário foram alteradas desde os anos 60 quando suas águas passaram a serem reguladas visando geração hidroelétrica, controle de enchentes, e navegação.

Uma série de modelos de simulação integrados foram desenvolvidos a fim de gerar níveis das águas na área úmida. Esta informação foi obtida por modelo regressivo que considera os níveis do Lago Ontário e as vazões oriundas da bacia à montante da zona úmida, as quais foram sintetizadas com base em variáveis físicas e hidrometeorológicas. Séries hidrometeorológicas foram geradas estocasticamente, reproduzindo os momentos estatísticos das séries históricas.

Das séries de níveis d'água na área úmida foram computadas séries do Índice de Dinâmica Hidrológica, HDI. Após, essas séries foram convertidas em séries do Índice de Adequabilidade para o estabelecimento da vegetação típica daquela área úmida. Finalmente, essas últimas séries foram

analisadas através do cálculo de Índices de Desempenho com a finalidade de comparação entre cenários.

No estudo de caso, o cenário de referência considerou o padrão pré-regulação dos níveis do Lago Ontário, combinado com uma cobertura de floresta na bacia mais extensa do que a vigente, com o que espera-se reproduzir uma realidade mais parecida com aquela existente na primeira metade do Século XX.

Foram geradas 100 réplicas de séries temporais com extensão de 100 anos, com as quais se computa frequências e variâncias.

RESULTADOS

Resultados I: Dinâmica hidrológica e adequabilidade para o estabelecimento de vegetação da zona úmida

Os elementos parciais da variabilidade hidrológica são combinados no Índice de Dinâmica Hidrológica, os quais são apresentados na Figura 6. Este índice e o Índice de Adequabilidade computado para os dez ciclos-de-tempo são mostrados nas figuras 6 e 7, respectivamente. Nesses dois gráficos somente o aspecto da operação do Lago Ontário é mostrado, já que os diferentes usos do solo na bacia não influíram significativamente nos níveis d'água da zona úmida. As médias dos desvios padrão obtidos em cada réplica foram usados para definir os intervalos de 95% de confiança.

As Oscilações resultaram mais significativas para o caso de níveis não-regulados no Lago Ontário. Assim, os resultados mostram que o padrão hidrológico após a adoção da operação é menos adequada para manter o ecótono (várzea, *wetland*) migrando dentro da faixa natural de elevações em comparação com o comportamento pré-operação.

As Amplitudes Relativas resultaram valores inferiores para os cenários de pré-regulação do Lago Ontário para ciclos-de-tempo inferiores a 4 anos. As amplitudes dos níveis no curto prazo (espaço de poucos anos) parecem ter aumentado com a operação do lago, o que pode ser uma compensação aos desvios mais acentuados que costumavam ocorrer antes da operação. Para períodos superiores a 4 anos, as Amplitudes Relativas são maiores para os cenários de pré-regulação do lago, o que é causado pelos desvios mencionados. Essas amplitudes se relacionam com a faixa de elevações em que o ecótono pode se estabelecer. No entanto, elas devem ser analisadas em termos dos diferentes ciclos-de-tempo, os quais se relacionam a escalas de tempo necessárias para a realização de ciclos biogeoquímicos e ciclos de vida de plantas. Enfocando o desenvolvimento de plantas, espécies com ciclos de vida curtos podem beneficiar-se das maiores amplitudes das oscilações dos níveis que ocorrem em escalas de tempo similares aos seus requisitos

de tempo requeridos (*timing*). Neste sentido espécies anuais ou de curto ciclo (4 anos ou menos) beneficiar-se-iam com as maiores amplitudes dos cenários pós-regulação. Ao contrário, espécies perenes, perenes de reprodução vegetativa (com ciclos de vida não definidos), e espécies dependentes de bancos de sementes (devido à longa vida das sementes e/ou brotações vegetativas, conforme van der Valk, 1981) podem beneficiar-se das amplitudes naturais, ou pré-regulação, no longo prazo. *Typha Glauca*, a espécie predominante dentre as plantas emergentes da zona úmida estudada, enquadra-se na última das categorias mencionadas.

A série de níveis do cenário referencial, assumido como base de comparação, apresenta desvios em torno da média de longo período maiores que os desvios das séries analisadas, as quais relacionam-se com a condição regulada dos níveis do Lago Ontário. Por esse fato os Desvios Relativos resultaram em maiores valores para os cenários pré-operação do lago. Esse elemento parcial da dinâmica hidrológica busca medir a faixa potencial de elevações marginais ao corpo aquático na qual o ecótono pode migrar ou expandir/contrair. Os maiores desvios, os quais ocorrem no padrão hidrológico pré-operação do lago, permitem faixas mais largas para tal.

Ressalte-se que essas medidas, acima comentadas, são definem apenas o potencial hidrológico. A dimensão real das áreas úmidas transicionais e de fixação de sua vegetação depende, dentre outros fatores, da declividade dos terrenos entre os domínios puramente aquático e terrestre.

O Índice de Dinâmica Hidrológica, que resulta da combinação dos três índices parciais acima referidos, forneceu maiores valores para os cenários pré-operação do lago, independentemente dos ciclos-de-tempo.

Com respeito ao Índice de Adequabilidade, os resultados obtidos mostram (Figura 8) maior adequabilidade para o estabelecimento da vegetação de várzea (*marsh*) no caso dos cenários pré-operação. As diferenças da adequabilidade entre as duas condições do Lago Ontário são ainda maiores em períodos curtos de tempo, convergindo assintoticamente para certos valores a medida que os ciclos-de-tempo aumentam.

Resultados II: Índices de desempenho relacionados aos referenciais de adequabilidade

Os Índices de Adequabilidade computados a partir da dinâmica hidrológica foram gerados para 10 ciclos-de-tempo, de 1 a 10 anos consecutivos.

Os Índices de Desempenho apresentados no item 3 foram aplicados à avaliação do desempenho do sistema estudado, em termos de suas condições hidrológicas. Para tais cálculos, considera-se “falha” quando um índice de adequabilidade ocorre com valor inferior a algum valor referencial, num dado período de tempo.

Os resultados obtidos para “confiabilidade” e “resiliência” são mostrados nas Figuras 9 e 10, respectivamente. Nelas somente os gráficos para ciclos-de-tempo de 1 e 10 anos são apresentados,

já que os demais situam-se entre os mesmos. Além disso, somente os aspectos de operação do Lago Ontário são destacados, já que os usos e cobertura do solo na bacia pouco impactaram os níveis água da área estudada. Observe-se que as confiabilidades (Figura 9) expressam frequências de excedência com relação aos referenciais do Índice de Adequabilidade. Maiores confiabilidades foram obtidas para os cenários referidos à pré-operação do lago, para todos os referenciais. Considerando o cenário pré-operação os resultados relativos aos ciclos-de-tempo 1 e 10 anos não diferem significativamente. No entanto, tal diferença é grande para o cenário pós-operação, o que é consequência da atenuação das flutuações hidrológicas de longo prazo.

A Figura 11 mostra s resultados para os valores esperados das magnitudes de falha individual e falha contínua. Figura 12 mostra a magnitude da vulnerabilidade (individual e contínua) e a duração da vulnerabilidade para os ciclos-de-tempo 1 e 10 anos. Somente os resultados para a frequência de excedência 0,75 são mostrados.

Resiliências também resultaram maiores para o cenário de pré-operação do Lago. Para ambos os cenários, resiliências são mais elevadas para os ciclos-de-tempo mais curtos, o que pode ser associado à sazonalidade bem definida do sistema neste horizonte temporal, ao contrário do que ocorre em ciclos mais longos especialmente para o cenário pré-operação do sistema.

Resultados III: Índices de desempenho para um índice de adequabilidade referencial

Os resultados dos Índices de Desempenho foram apresentados, anteriormente, considerando um conjunto de valores do Índice de Adequabilidade (0,1 a 0,9). Como aqueles índices baseiam-se na ocorrência de falhas, valores referenciais separando os estados satisfatório e não-satisfatório (ou sucesso e falha) devem ser adotados. Um valor referencial de 0,5 é aqui assumido para fins de exemplificação. O valor adotado como referencial é subentendido como o valor mínimo desejável de adequabilidade, em média, no longo prazo. O aspecto da escalas temporais, através dos ciclos-de-tempo para os cálculos, foi mantido nos resultados aqui apresentados.

Em geral, o desempenho do sistema estudado e expresso pelos índices considerados foi melhor na condição dos níveis pré-operação do sistema Lago Ontário-rio St.Lawrence.

Em termos das escalas temporais avaliadas, *adequabilidade* e *confiabilidade* resultaram um tanto similares, apresentando um pequeno acréscimo em seus valores à medida que os ciclos-de-tempo aumentam, estabilizando-se assintoticamente quando aproxima-se do ciclo de 10 anos. *Resiliência*, no entanto, decresce para os maiores ciclos-de-tempo. *Magnitudes de falhas*, em todos os casos, não mostram padrões de crescimento ou redução conforme sejam os ciclos-de-tempo. *Duração das falhas*, entretanto, são crescentes para os ciclos-de-tempo mais longos.

CONCLUSÃO

A metodologia apresentada neste artigo, através do uso dos diversos índices propostos, constitui uma maneira de associar quantitativamente a idéia da adequabilidade ecológica e os conceitos de falha/sucesso do sistema natural com respeito aos padrões da dinâmica hidrológica.

Os resultados obtidos para o case de estudo, demonstraram o impacto da operação regularizadora do sistema Lago Ontário-rio St. Lawrence nas condições hidrológicas para o estabelecimento da fauna (e certamente de outros aspectos) caracterizadora da área úmida, várzea de inundação (*marsh*), do rio Irondequoit.

Possíveis impactos relacionados à qualidade das águas não foram considerados nos estudos, o que pode ser de importância se certas políticas para o desenvolvimento e uso do solo forem implementadas.

O padrão hidrológico verificado anteriormente à operação nos níveis e fluxos do Lago Ontário apresentaram maior habilidade, em termos da flutuação dos níveis d'água, para a ocorrência de ecótonos mais diversos e dinâmicos, incluindo as várzeas (*marshes*), as quais consistem habitat essencial para diversas espécies daquela comunidade.

AGRADECIMENTOS

Este artigo trata de parte da tese de doutorado desenvolvida na Cornell University, EUA, sob orientação do Dr. Daniel Peter Loucks, e com o suporte financeiro do CNPq e UFBA.

REFERÊNCIAS

- Bain, M. B., and D. P. Loucks. 1999. Linking Hydrology and Ecology in Simulations for Impact Assessments. in ASCE, editor. 26th Water Resources Planning and Management Conference. American Society of Civil Engineers, Phoenix, Arizona.
- Bayley, P. B. 1995. Understanding large River-Floodplain Ecosystems. *Bioscience* 45:153-158.
- Chow-Fraser, P., Lougheed, V., Le Thiec, V., Crosbie, B., Simser, L., and Lord, J. 1998. Long-term response of the biotic community to fluctuating water levels and changes in water quality in Cootes Paradise marsh, a degraded coastal wetland of Lake Ontario. *Wetlands Ecology and Management* 6:19-42.
- Coon, W. F., J.M. Bernard, and F.K. Seischab. 2000. Effects of a Cattail wetland on Water Quality of Irondequoit Creek near Rochester, New York. Water-Resources Investigations Report 00-4032, U.S. Geological Survey, Ithaca, NY.

- Duckstein, L., and E. J. Plate, editors. 1987. *Engineering Reliability and Risk in Water resources*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Engel, D. W., G. W. Thayer, and D. W. Evans. 1999. Linkages between fishery habitat quality, stressors, and fishery populations. *Environmental Science & Policy* 2:465-475.
- Ganoulis, J. G. 1994. *Engineering Risk Analysis of Water Pollution*. VCH Publishers Inc., New York.
- Junk, W. J., P.B. Bayley, and R.E. Sparks. 1989. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. Pages 110-127 in D. P. Dodge, editor. *Proceedings of the International Large River Symposium*.
- Knapp, R. A., K. R. Matthews, and O. Sarnele. 2000. Resistance and Resilience of Alpine Lake Fauna to Fish Introductions. *Ecological Monographs* 71:401-421.
- Loucks, D. P. 1997. Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences* 42:513-530.
- Luz, L. 2002. *Hydrology and habitat suitability assessment of a freshwater wetland*. PhD dissertation, Cornell University, Ithaca, NY, August/2002.
- Luz, Lafayette D.; Loucks, Daniel Peter. 2002. Composite effects of Lake Ontario levels and inland flows on habitat suitability of a coastal wetland. In: 2002 First Annual Symposium on Environmental & Water Resources Systems Analysis. *Proceedings of the 2002 Conference on Water Resources Planning & Management*. ASCE / EWRI / Virginia Tech, Roanoke, Va, USA.
- Mays, L. W., and Y.-K. Tung. 1992. *Hydrosystems Engineering & Management*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Odum, E. P. 1985. Trends Expected in Stressed Ecosystems. *Bioscience* 35:419-422.
- Rand, G. M., and J. R. Newman. 1998. The applicability of Habitat Evaluation Methodologies in Ecological Risk Assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*. 4:905-929.
- Willard, D. E., and A.K. Hiller. 1989. Wetland dynamics: considerations for restored and created wetlands. Pages 47-53 in J. A. Kusler, and M.E. Kentula, editor. *Wetland Creation and Restoration: The Status of the Science*. USEPA.
- Yen, B. C. 1987. Engineering approaches to risk and reliability analysis. Pages 22-49 in Y. Y. Haines and E. Z. Stakhiv, editors. *Risk Analysis and Management of Natural and Man-Made Hazards - 3rd Conference*. ASCE, Santa Barbara, CA.

ANEXO - FIGURAS

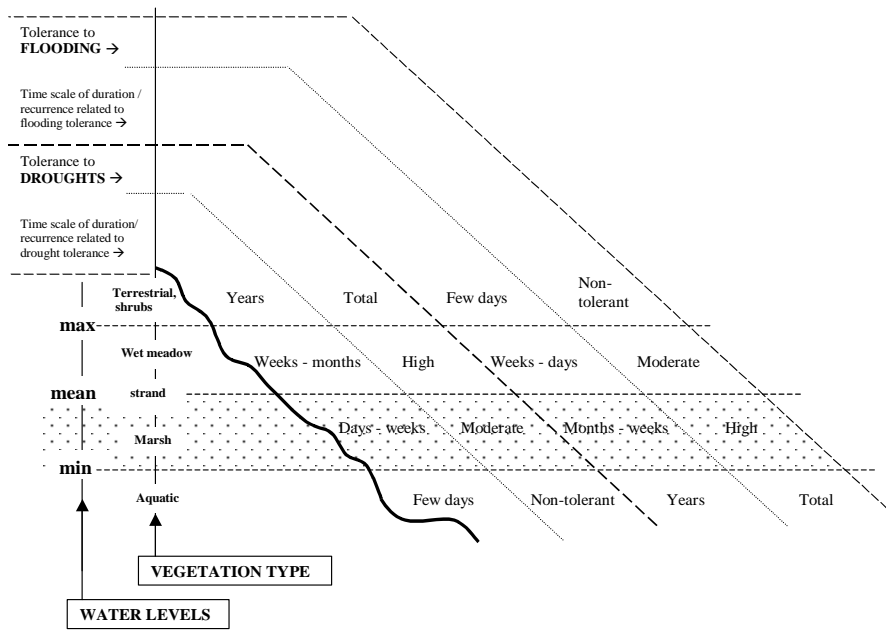


Figura 1 - Relações esquemáticas entre níveis das águas, vegetação, tolerância e escalas de tempo relacionadas a enchentes e estiagens (adaptado de Keddy, 2000)

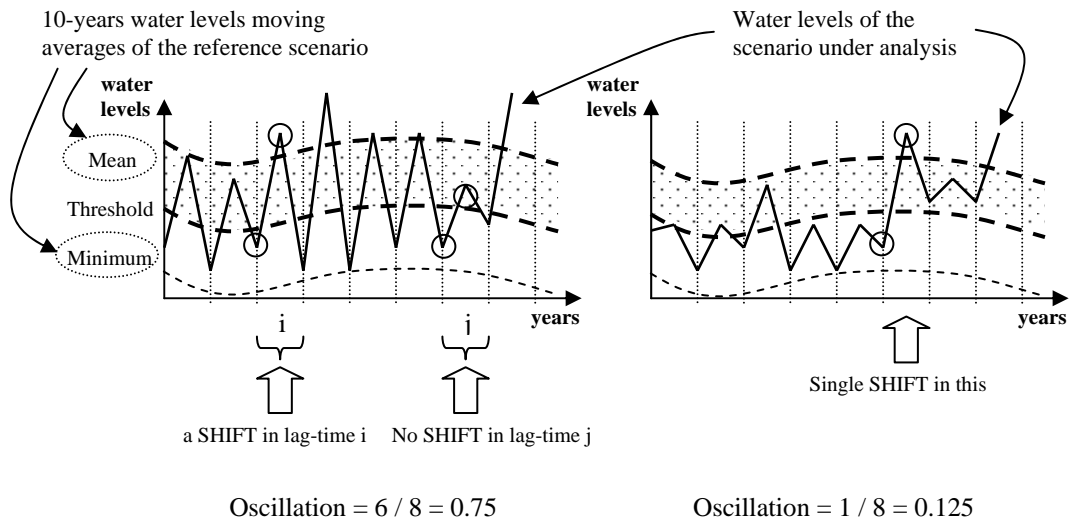


Figura 2 - Oscilações: exemplos de cálculo

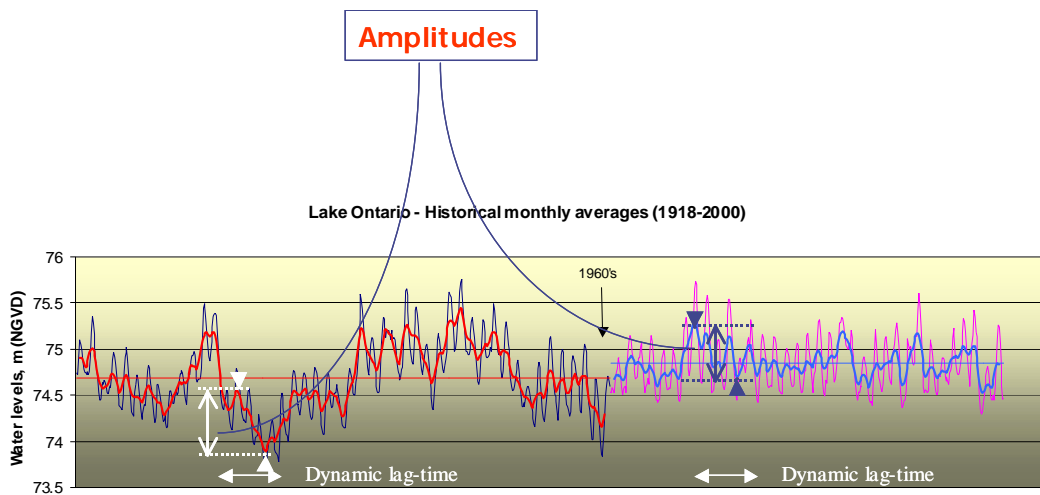


Figura 3 – Amplitudes absolutas - exemplos

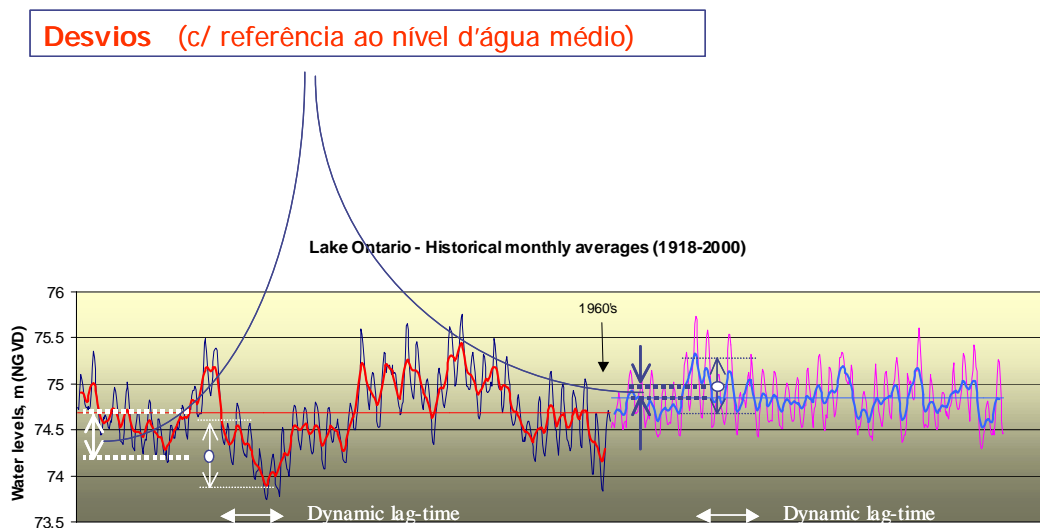


Figura 4 – Desvios absolutos com relação à media - exemplos

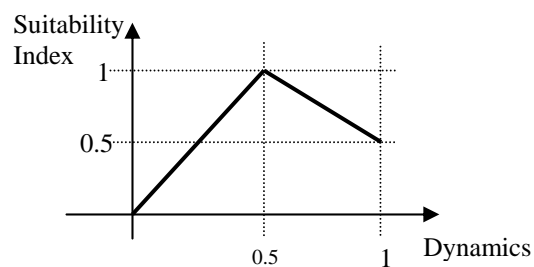


Figura 5 – Função assumida para o Índice de Adequabilidade relacionado à dinâmica hidrológica

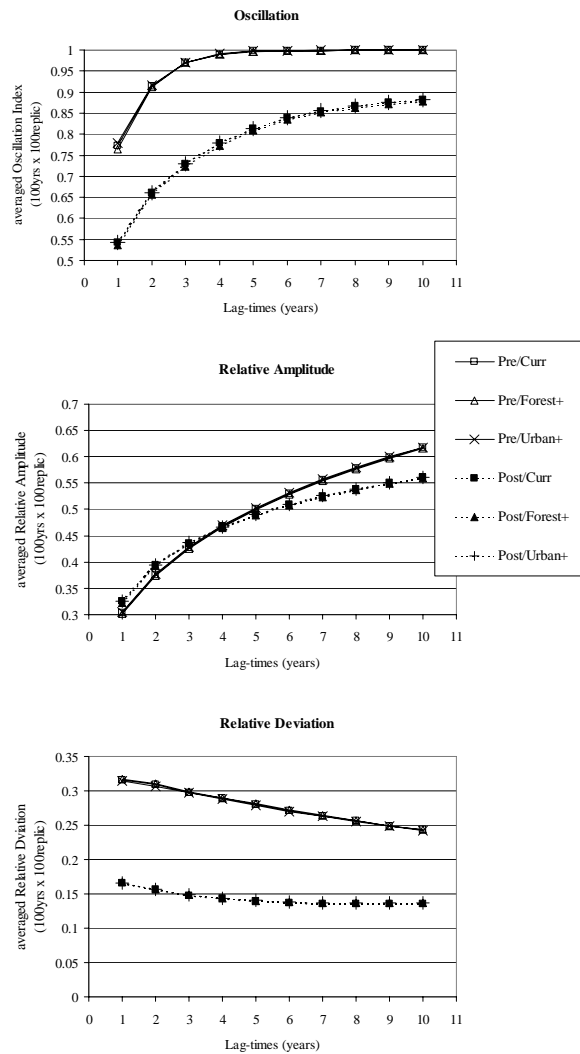


Figura 6 – Aspectos parciais da dinâmica hidrológica dos níveis d’água na área úmida (Cenários: Pre & Post = pré- e pós-regulação do Lago Ontário; Curr = atual uso do solo, Forest+ = acréscimo floresta, Urban+ = acréscimo urbanização na bacia)

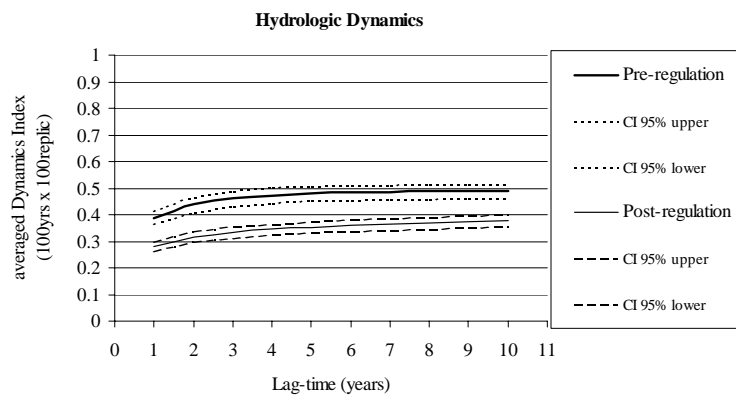


Figura 7 - Dinâmica Hidrológica (ênfase na operação do Lago Ontário)

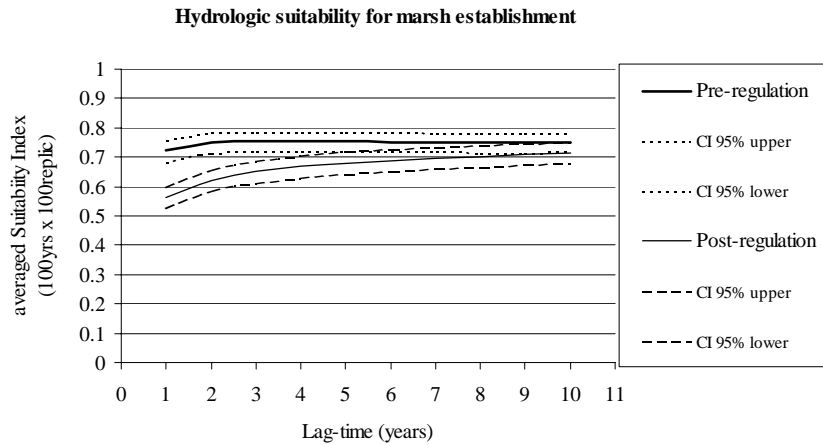


Figura 8 – Índice de Adequabilidade: dinâmica hidrológica e condição para o estabelecimento da flora de várzea (ênfase na operação do Lago Ontário)

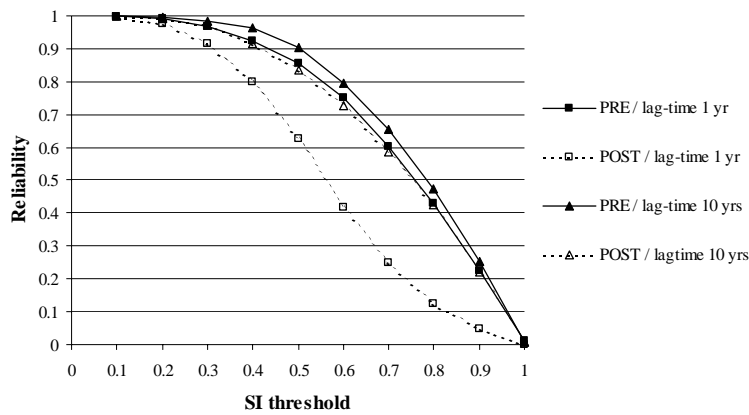


Figura 9 – Confiabilidade (reliability) da adequabilidade hidrológica para o estabelecimento da flora de várzea (ênfase na operação do Lago Ontário)

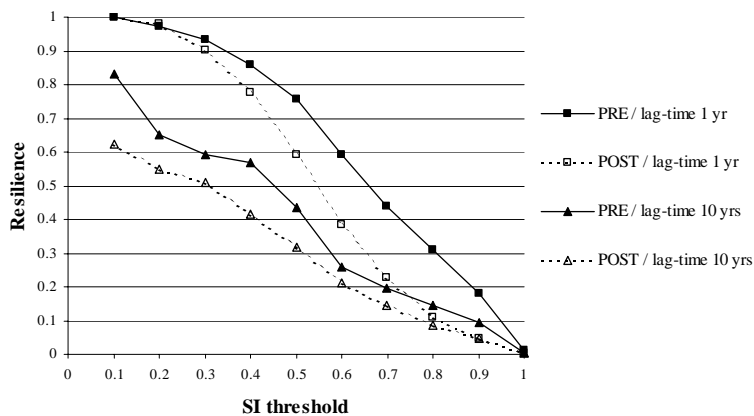


Figura 10 – Resiliência da adequabilidade hidrológica para o estabelecimento da flora de várzea (ênfase na operação do Lago Ontário)

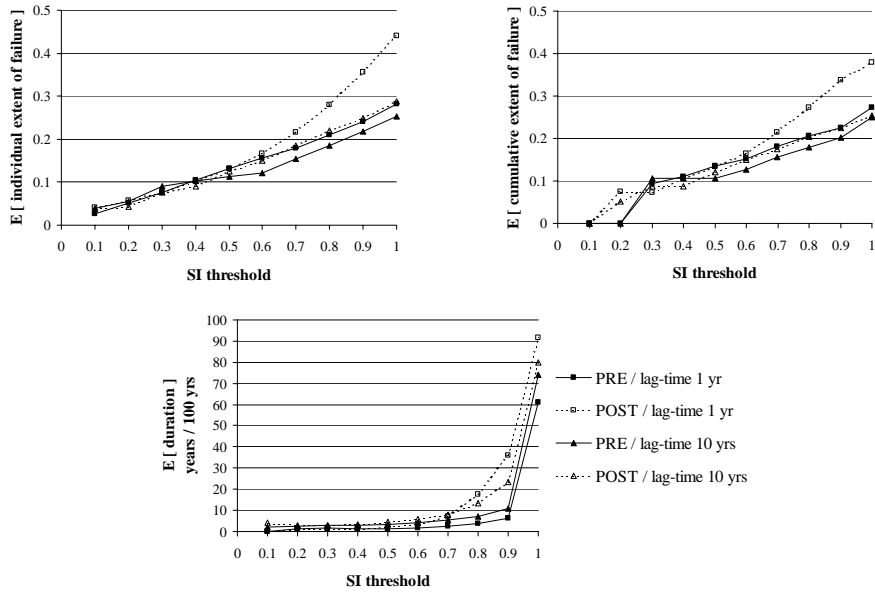


Figura 11 - Valores esperados de magnitude (individual e contínua) e duração das falhas. Ciclos-de-tempo 1 e 10 anos.

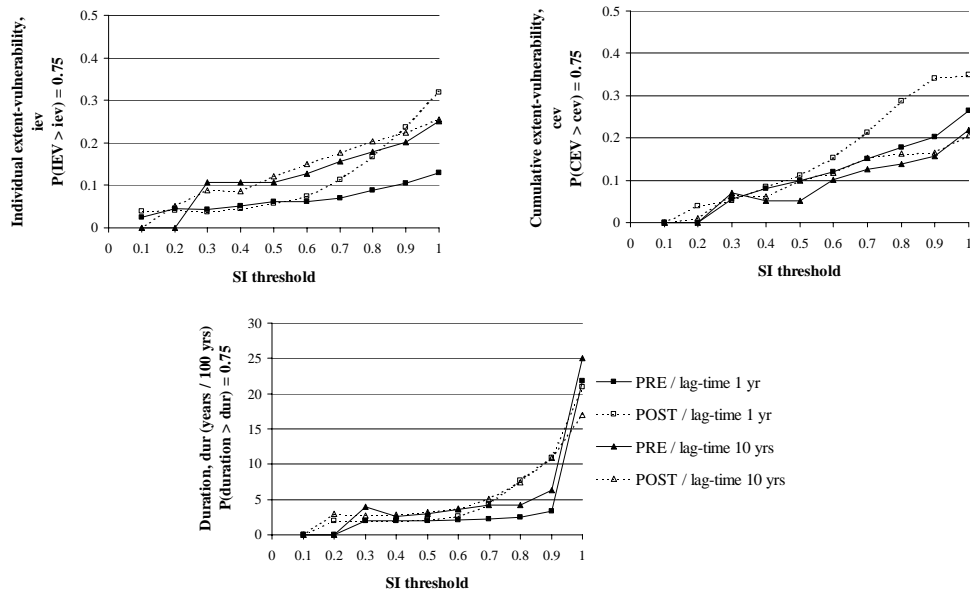


Figura 12 – Magnitude da vulnerabilidade (individual e contínua) e duração da vulnerabilidade associada à probabilidade de excedência 0,75. Ciclos-de-tempo 1 e 10 anos.