

XII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS

ÍNDICE DE RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES APLICADO PARA A AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE URBANIZAÇÃO NA CIDADE DE PARATY, RJ

Bruna Peres Battemarco¹; Matheus Martins de Sousa² & Marcelo Gomes Miguez³

RESUMO – O problema das cheias urbanas é um desafio atual para as cidades. Para mitigar esse problema, a visão tradicional do projeto de drenagem vem sendo modificada, nas últimas décadas, por uma abordagem integrada de manejo sustentável das águas pluviais e planejamento do espaço urbano. Além disso, vem-se tornando mais difundida a ideia da minimização de riscos. Mais ainda, esta ideia vem ganhando novos contornos, com a introdução do conceito de cidades resilientes a inundações, utilizando técnicas que racionalizam e otimizam a relação água x edificação x espaço urbano. Através de suporte de modelagem matemática, realiza-se o diagnóstico atual das bacias dos rios Mateus Nunes e Perequê-Açu, que atravessam a cidade de Paraty, buscando visualizar e analisar os efeitos da expansão urbana, a partir de mudanças no uso do solo, em função da discussão de um novo plano diretor para a cidade. Como consequência, propõem-se intervenções de projetos que visam a redução dos impactos das cheias e o aumento da resiliência da cidade. Em particular, a avaliação da resiliência urbana a inundações será medida através da aplicação do Índice de Resiliência a Inundações (IRES).

ABSTRACT– The urban flood problem is one of the main challenges to present cities. As a way to mitigate this problem, the classical drainage design concepts have been changing, in the recent decades, to an integrated sustainable stormwater management approach within the planning of urban spaces. Besides, the idea of risk mitigation is becoming increasingly widespread. Furthermore, the flood resilient city concept has also arisen, using techniques that rationalize and optimize the relation among water, buildings, and urban spaces. Through the support of mathematical modeling, this project aims to carry out the current diagnosis of Mateus Nunes and Perequê Açu River basins, which cross the Paraty city center, seeking to analyze the effects of urban sprawl caused by land use changes, currently in discussion inside the new Urban Master Plan. Then, we will make proposals aiming at decreasing the flood impacts while increasing city resilience. Moreover, the proposed methodology intends to evaluate the urban resilience to flooding by applying the Flood Resilience Index (FResI).

Palavras-Chave – Resiliência a inundações; Risco; Modelagem Matemática.

1) PEC-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro; Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco I, 2º andar, Sala I-206 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro/RJ, CEP: 21941-909; Fone: (21) 3938-7835/ (21) 3938-7834; brunabattermarco@poli.ufrj.br.

2) AQUAFLUXUS; Rua Paulo Emídio Barbosa, 485, Quadra 1A, Prédio CE-TIC, Sala 106 – Parque Tecnológico da UFRJ – Cidade Universitária – Rio de Janeiro/RJ, CEP: 21941-907; Fone: (21) 3733-1807/ (21) 3733-1808; matheus@hidro.ufrj.br.

3) Escola Politécnica e PEC-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro; Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco I, 2º andar, Sala I-206 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro/RJ, CEP: 21941-909; Fone: (21) 3938-7835/ (21) 3938-7834; marcelomiguez@poli.ufrj.br.

INTRODUÇÃO

Os efeitos das cheias urbanas, agravados pela própria urbanização, são um dos principais desafios das cidades na atualidade. Os problemas vão desde efeitos localizados de microdrenagem, alagando ruas e afetando pedestres e o tráfego, até a inundação de grandes áreas, com grandes prejuízos materiais, danos à infraestrutura urbana, necessidade de realocação de pessoas, entre outros (CARNEIRO E MIGUEZ, 2011).

Ao longo das últimas décadas, a drenagem tradicional vem sendo complementada ou substituída por conceitos que buscam soluções sistêmicas para a bacia, com intervenções distribuídas, procurando resgatar padrões de escoamento próximos daqueles anteriores à urbanização (MIGUEZ *et al.*, 2016). Esta concepção abarca preocupações de manejo sustentável das águas pluviais urbanas, buscando criar uma relação harmoniosa entre ambiente natural e ambiente construído. Além disso, cada vez se torna mais difundida a ideia da minimização do risco. Segundo Samuels e Gouldby (2009), risco pode ser entendido a partir de dois componentes: a *probabilidade* de um evento perigoso ocorrer e o *impacto* (ou consequência) associado à ocorrência desse evento. O risco de inundações é geralmente definido como uma função do perigo, da exposição e da vulnerabilidade (KOKS *et al.*, 2015), combinando aspectos do evento natural e do sistema socioeconômico exposto a danos pela ação deste evento. A *Exposição* representa a presença de bens e pessoas, que seriam os elementos sujeitos a danos, na área afetada pelo perigo. A *Vulnerabilidade*, por sua vez, conjuga 3 aspectos (SAYERS *et al.*, 2013): *Susceptibilidade a dano*, que representa o nível de fragilidade do sistema, o quanto os elementos expostos são propensos a danos; *Valor*, que representa as perdas potenciais; e *Resiliência*, atuando no sentido contrário à materialização do risco. Resiliência é a habilidade de um sistema, comunidade ou sociedade resistir, absorver, acomodar e se recuperar dos efeitos de um evento, de forma rápida e eficiente (JHA *et al.*, 2012).

Desta forma, projetos urbanos que considerem e respondam aos riscos causados pelas cheias, sendo capazes de minimizá-los, precisam também ser avaliados quanto à resiliência, ou seja, quanto a sua capacidade de continuar resistindo, em casos extremos, e de recuperar rapidamente, com pequenas perdas, em caso de falhas. A construção de cidades mais resilientes às inundações pode ser feita a partir de técnicas que racionalizam a relação da água com as edificações e com o espaço urbano, podendo ser estruturais e não estruturais. Tendo como ponto de partida a busca por soluções mais naturais, demandam menos manutenção ao longo do tempo, criam condições de auto sustentação e dão elasticidade às respostas urbanas às inundações.

Este trabalho tem como objetivos visualizar e analisar os efeitos da expansão urbana em Paraty, sob o ponto de vista dos impactos causados por inundações, através de modelagem matemática,

simulando também uma proposta progressiva de controle de inundações, baseada em conceitos de requalificação fluvial e reordenamento do uso do solo urbano. A partir daí, visa avaliar, como produto principal, a resiliência da cidade de Paraty a inundações para os diferentes cenários de urbanização, através da aplicação do Índice de Resiliência a Inundações (IRES).

ESTUDO DE CASO: PARATY, RJ

O município de Paraty pertence à Região da Costa Verde e está localizado na microrregião da Baía da Ilha Grande, região litorânea sul do estado do Rio de Janeiro. Paraty teve, em 1958, seu núcleo urbano tombado pelo IPHAN, como Patrimônio Histórico e Artístico Nacional e, em 1966, todo o município foi classificado como Monumento Nacional. Atualmente, pleiteia pelo título de Patrimônio da Humanidade (NASCIMENTO, 2005). Desta forma, o centro histórico de Paraty se configura como fonte da principal atividade econômica desenvolvida na cidade, o turismo.

Sua rede hidrográfica é composta por cerca de 15 rios principais, com destaque para os rios Perequê Açu e Mateus Nunes, que possuem áreas de drenagem de aproximadamente 113 km² e 52 km², respectivamente. O município enfrenta problemas decorrentes de um crescimento urbano sem planejamento ineficaz, da ineficiência dos sistemas de drenagem, da degradação dos rios e das alterações de uso e cobertura do solo feitas em áreas frágeis.

Em 2010, a Prefeitura de Paraty publicou uma proposta de Plano Diretor Municipal (PREFEITURA DE PARATY, 2010), que não chegou a ser aprovado. A proposta apresentava uma generalista do planejamento municipal, favorecendo o espraiamento urbano, ocupando toda a planície fluvial a montante do centro histórico e sem dar alternativas para o manejo de águas pluviais.

METODOLOGIA

A análise das bacias dos rios Mateus Nunes e Perequê Açu, Paraty/RJ envolveu uma modelagem matemática, através da ferramenta MODCEL (MASCARENHAS E MIGUEZ, 2002; MIGUEZ *et al.*, 2017), para a simulação de diferentes cenários de urbanização, incluindo propostas para o controle de cheias e a consideração de efeitos das mudanças climáticas. A representação das bacias hidrográficas modeladas compreendeu 761 células referentes às planícies, rios e encostas; como observado na Figura 1. A chuva de projeto utilizada foi calculada para o tempo de recorrência de 25 anos. A oscilação do nível do mar na foz dos rios foi considerada como condição de contorno.

Dois cenários foram também simulados, além da modelagem da Situação Atual: Cenário Tendencial e Cenário Resiliente. Os cenários foram desenvolvidos com base nas proposições realizadas por Barbedo (2016). O Cenário Tendencial prevê a continuação da atual tendência de urbanização na planície a montante da BR-101, conforme preconizado pela proposta de Plano Diretor

de 2010. Este cenário assume a expansão urbana de toda a área definida pelo Plano Diretor (Figura 2 (a)), com a finalidade de mostrar os impactos da atual tendência de expansão urbana se a ocupação não for controlada e nenhuma ação sistêmica for definida. O Cenário Resiliente, por sua vez, direciona o crescimento urbano para os espaços abertos a jusante da BR-101, com maior incidência no Bairro de Jabaquara. Essa alternativa preferencialmente busca adensar a área de jusante, já ocupada. Além disso, são propostas medidas de conservação ambiental das áreas a montante da BR-101, permitindo ainda, porém, a ocupação controlada de parte da bacia, onde já se acham urbanizações iniciais. Este cenário utiliza medidas de requalificação fluvial, bem como restrições à ocupação de áreas a montante da BR-101, a fim de minimizar os danos causados pelas inundações, principalmente no Centro Histórico da cidade e seu entorno. As medidas propostas no Cenário Resiliente são apresentadas de maneira espacializada na Figura 2 (b).

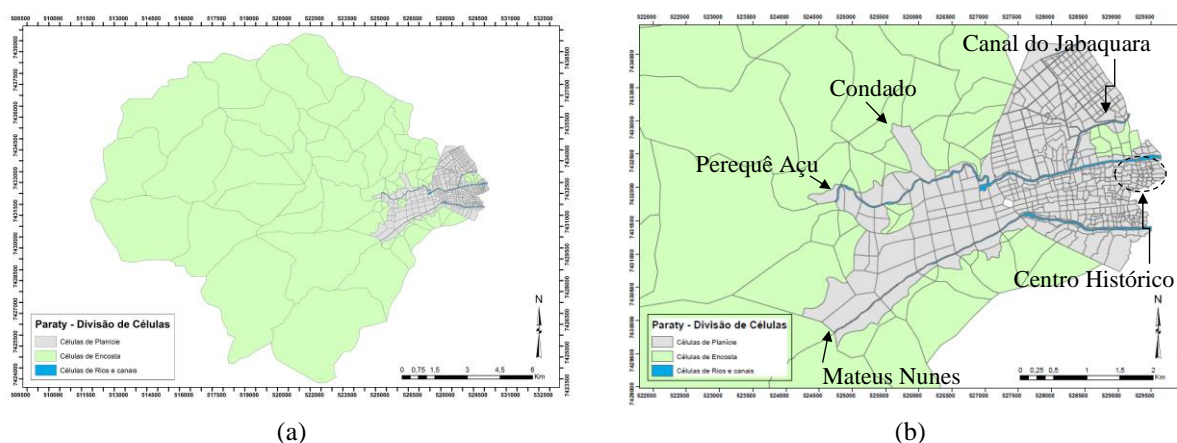


Figura 1 - (a) Divisão de células; (b) Visão detalhada na região de interesse.

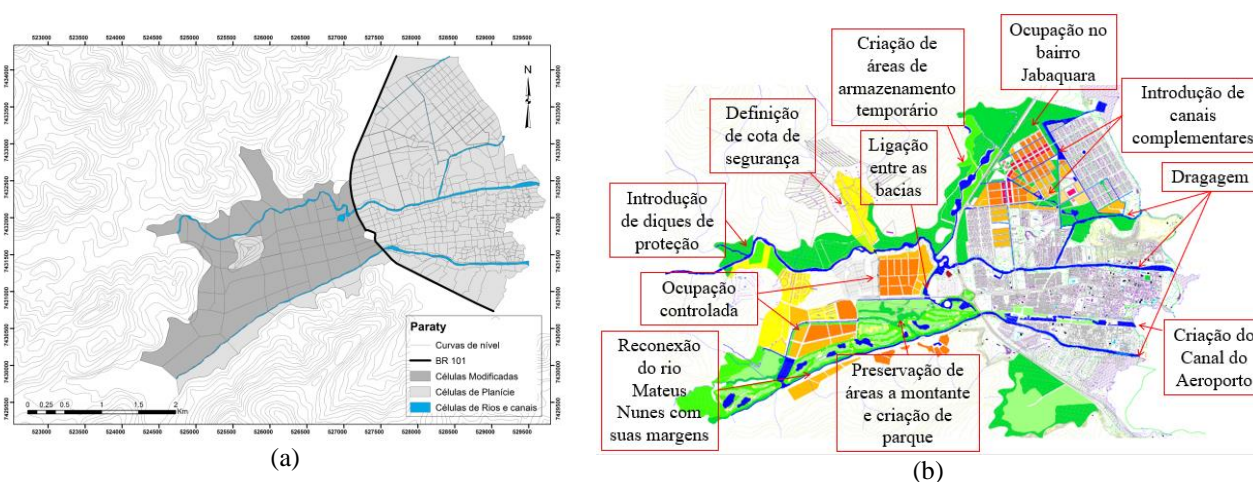


Figura 2 – (a) Região de interesse no Cenário Tendencial – Células Modificadas; (b) Espacialização do Cenário Resiliente (Barbedo, 2016).

Também foram considerados efeitos das mudanças climáticas nos dois cenários de urbanização simulados, com elevação do nível médio do mar em 15 cm para o ano de 2035 (horizonte do plano diretor) e aumento na precipitação de projeto em 10%, na mesma data futura. As alterações realizadas

possuem como base o relatório de Rosman (2015) para o ano de 2100, considerando a estimativa do IPCC de elevação de 18 a 79 cm do nível do mar.

A partir desta base de simulação montada, desenvolveu-se a metodologia de avaliação da resiliência a inundações da região, através da aplicação do Índice de Resiliência a Inundações - IRES (TEBALDI *et al.*, 2015). O IRES é um índice quantitativo multicritério, construído para variar de 0 a 1 (com escalas normalizadas). Sua metodologia baseia-se em conceitos de Risco, combinando seus componentes básicos de *perigo* e *vulnerabilidade*, mas considerando-ss no sentido contrário de sua materialização, pela ação da resiliência introduzida no sistema. Com isso, o índice conjuga indicadores referentes às características de inundação, vulnerabilidade, valor relativo e exposição, conforme formulação dada na equação (1).

$$IRES = (1 - I^{VR}).m_1 + (1 - (I^{P^{n_1}} \cdot I^{E^{n_2}} \cdot I^{S^{n_3}}).m_2) \quad (1)$$

Onde:

- IRES - Índice de Resiliência;
- I^{VR} - Indicador “Valor Relativo”, variável entre 0 e 1, relativo às perdas provocadas pela inundação, sofridas pela população local, divididas pela renda familiar, indicando a importância relativa das perdas sofridas, quando comparada a capacidade de reposição da população, indicada pela sua renda;
- I^P - Indicador “Perigo”, variável entre 0 e 1, correspondente à lâmina d’água dentro das edificações, em uma dada área, capaz de gerar danos, dependendo da altura atingida;
- I^E - Subíndice “Exposição”, variável entre 0 e 1, relativo à densidade de domicílios presente nas áreas inundáveis – essa densidade considera, de forma indireta, a população afetada, seja pelo alagamento de suas residências, seja pela dificuldade de acesso aos domicílios;
- I^S - Indicador “Susceptibilidade”, variável entre 0 e 1, relativo às edificações efetivamente afetadas pelas cheias (casas e pavimentos térreos de edifícios) nas áreas inundáveis;
- $1 - I^{VR}$ - Composição que representa o subíndice “Capacidade de Recuperação”
- $1 - (I^{P^{n_1}} \cdot I^{E^{n_2}} \cdot I^{S^{n_3}})$ - Composição que representa o subíndice “Risco Evitado” com redução de seus consequentes danos;
- n_1, n_2, n_3 - Pesos associados aos indicadores I^P, I^E, I^S ($n_1 = 0.5; n_2 = n_3 = 0.25$).
- m_1, m_2 - Pesos associados aos subíndices “Capacidade de Recuperação” e “Riscos Evitados” ($m_1 = m_2 = 0.5$);

A aplicação do Índice de Resiliência a Inundações adotou dados do IBGE (2010) sobre as características socioeconômicas da população, no que tange à renda familiar e classe social, e também das edificações. Também foi necessário realizar um estudo prospectivo em relação à distribuição da população e de domicílios nos cenários futuros de expansão urbana modelados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se, a partir da comparação entre as manchas de inundação do Cenário Tendencial e da Situação Atual (Figura 3), que a expansão urbana na região a montante da BR-101 é capaz de intensificar os impactos das inundações nas áreas de jusante, principalmente na bacia do rio Perequê Açu. Com a utilização de aterros em toda a planície a montante da BR-101 (tendência verificada efetivamente hoje nas ocupações que já existem), o rio Perequê Açu se mantém em calha nesse trecho, fazendo com que maiores vazões sejam transferidas para jusante, agravando aí o efeito de transbordamento do rio, com impactos maiores para a população residente na região, bem como para atividades econômicas do Centro Histórico. A bacia do rio Mateus Nunes não sofre tanto com a intensificação da ocupação na região de montante da BR-101.

No Cenário Resiliente, pode-se observar que a ocupação controlada em parte da região a montante da BR-101, com a preservação de áreas através da implantação de parques, além da recuperação da interligação entre as bacias, direcionando a expansão urbana para o bairro do Jabaquara, foi capaz de melhorar os impactos causados pelas cheias na cidade de Paraty como um todo. Com as proposições feitas, as lâminas de inundação remanescentes passaram pouco de 30 cm e se mantiveram na calha das ruas na maioria dos casos (conforme projeto original da própria cidade, que utiliza ruas como canais de limpeza), mostrando a eficiência destas medidas no controle de cheias.

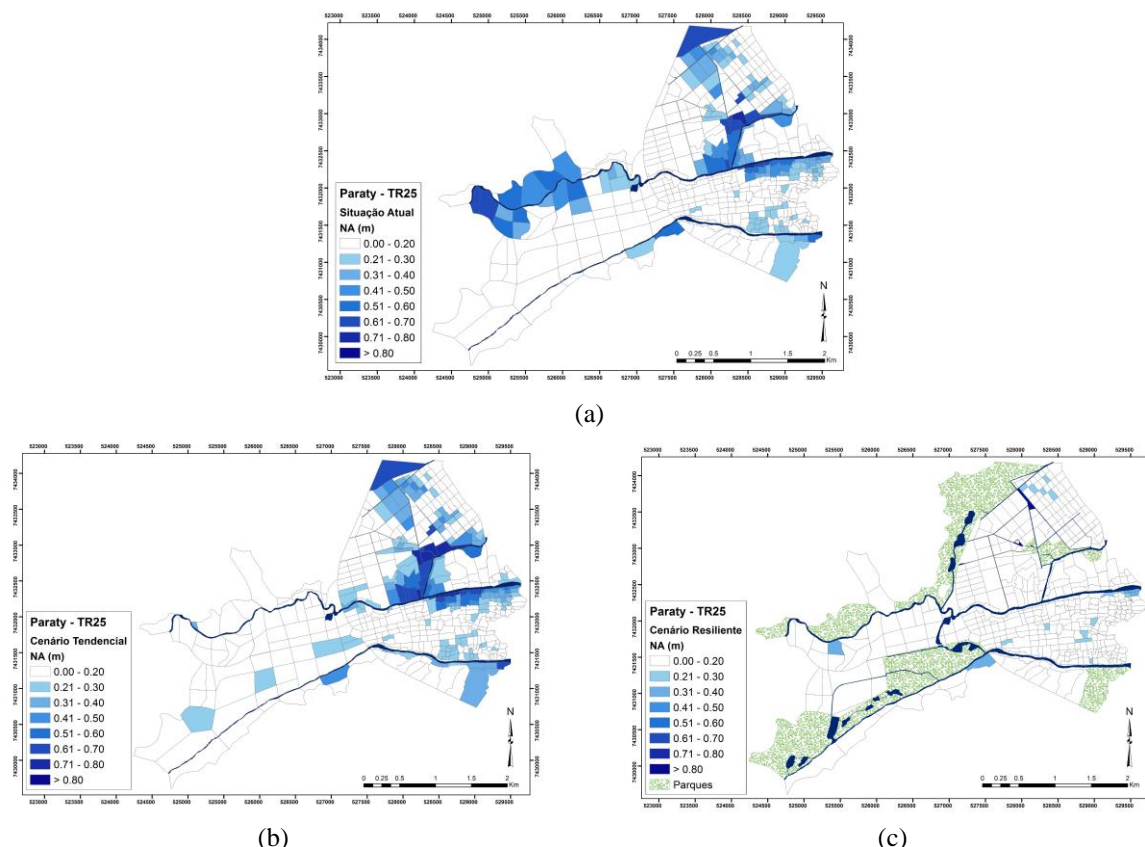


Figura 3 – (a) Situação Atual; (b) Cenário Tendencial; (c) Cenário Resiliente.

A Tabela 1 mostra que, no Cenário Tendencial, com expansões urbanas a montante, a situação do centro histórico pioraria, com alagamentos chegando a 80 cm. No entanto, o Cenário Resiliente mostrou sua eficiência reduzindo a lâmina máxima atual significativamente por toda a área de interesse. Pode ser também observado que a área total alagada sofreria um aumento de 14% no Cenário Tendencial, enquanto no Cenário Resiliente sofreria uma redução de 88%.

Tabela 1: Lâminas Máximas de Alagamento e Área Total Alagada

Cenário	Alagamento (m)	Área Total Alagada (m ²)
Situação Atual	0,71	1.342.192,50
Cenário Tendencial	0,80	1.524.970,14
Cenário Resiliente	0,36	156.745,30

A Figura 4, por sua vez, mostra efeitos de mudanças climáticas nos cenários avaliados. No Cenário Tendencial, intensificam-se ainda mais os impactos causados pelas inundações a jusante da BR-101 (alagamentos chegando a 86 cm, com aumento da área alagada). O Cenário Resiliente mostra que as medidas propostas são capazes de responder bem a este cenário, com a maior lâmina de alagamento igual a 40 cm. São pequenas as variações em relação ao cenário sem mudanças climáticas, o que mostra a tendência resiliente deste projeto.

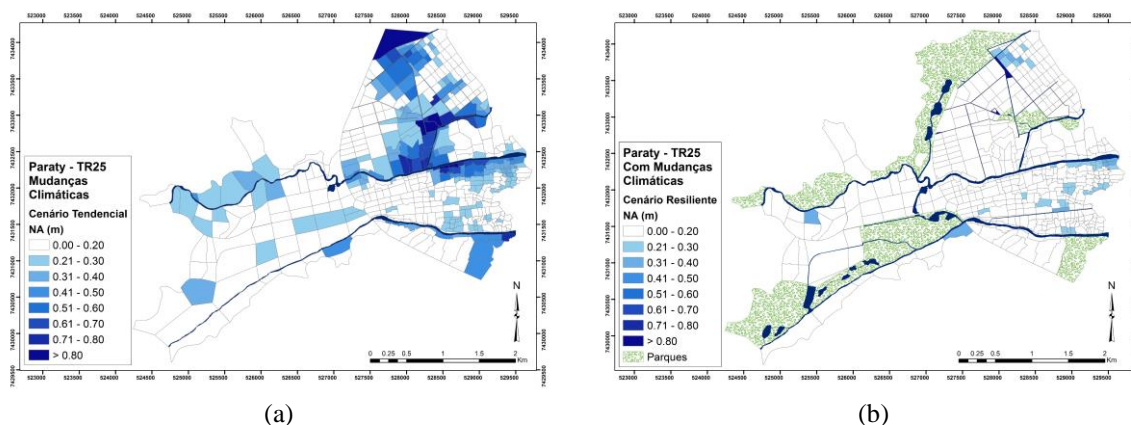


Figura 4 - Mudanças Climáticas- (a) Cenário Tendencial - TR25; (b) Cenário Resiliente - TR25.

Para avaliar quantitativamente a resiliência, entra em cena a aplicação do IRES, como pode ser visto na Figura 5. Na Situação Atual, pode-se observar maior fragilidade ao longo das margens do rio Perequê Açu e do Canal do Jabaquara, bem como nas regiões dos loteamentos mais precários nas áreas mais a montante. Definindo como baixa resiliência todos os valores abaixo de 0,50 e tomando os valores menores do que 0,30 como críticos, a situação atual de Paraty mostra uma área de resiliência baixa com 788.158 m² sendo 443.139 m² considerados críticos. No Cenário Tendencial, os valores de resiliência foram reduzidos, no geral, como apresentado na Figura 5 (b), indicando que este cenário é capaz de piorar a reação da cidade. No entanto, o valor das áreas de resiliência baixa e

crítica decaiu, respectivamente, para 639.821 m² e 137.669 m², caracterizando reduções de 19% e 69%. Como o Cenário Tendencial prevê a construção de aterros nas áreas a montante, essa região tem sua resiliência aumentada (como efeito da necessidade imediata de proteger esta nova urbanização de inundações), transferindo riscos para as regiões de jusante. Consequentemente, nessas regiões de jusante, há um incremento de áreas de resiliência baixa e crítica de 15% e de 54%, respectivamente.

No Cenário Resiliente, por sua vez, é possível notar uma melhora importante nos valores de resiliência na cidade de Paraty, como observado na Figura 5 (c). A redução de áreas de baixa resiliência chegou a 95% (39.134 m²) e as áreas críticas foram extintas. É importante ressaltar que alguns pontos mais afastados dos eixos fluviais, nas três situações analisadas, apresentaram baixos valores de resiliência, indicando uma provável falha na microdrenagem local, ou uma grande concentração de domicílios, ou ainda uma capacidade muito baixa de reposição de perdas.

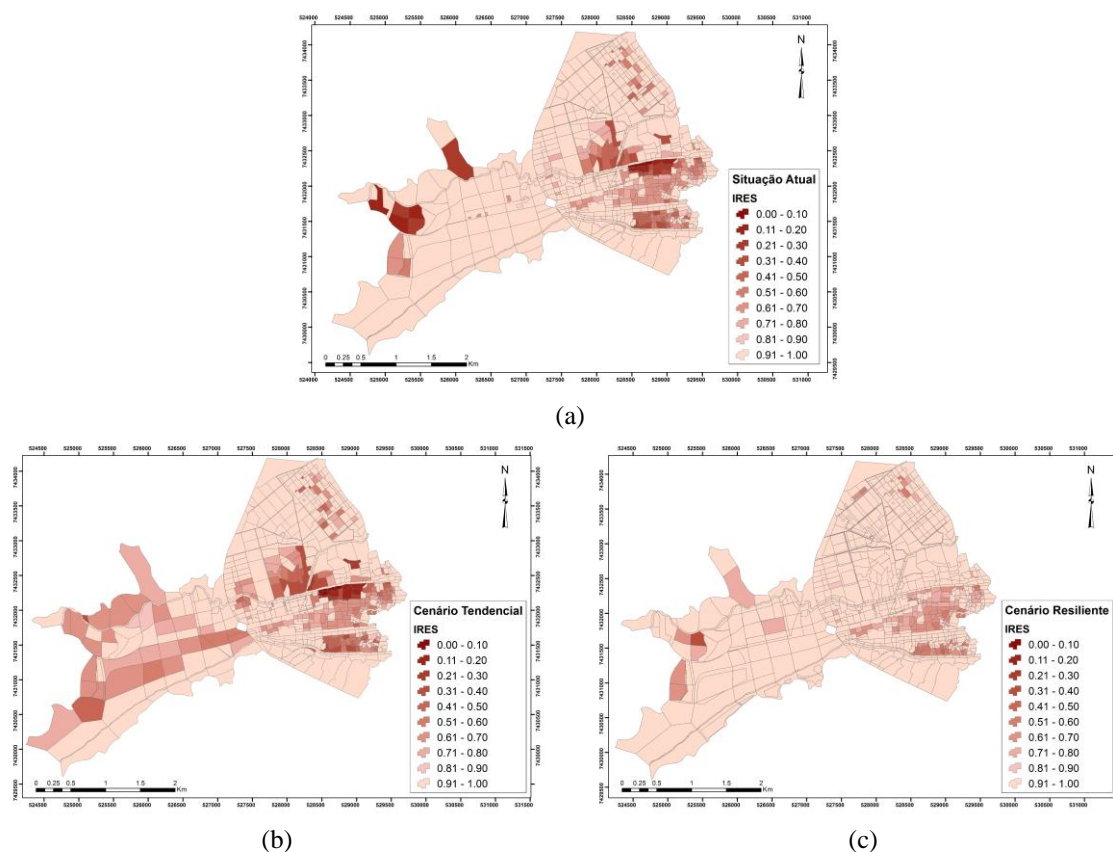


Figura 5 - IRES – (a) Situação Atual; (b) Cenário Tendencial; (c) Cenário Resiliente.

Os efeitos das mudanças climáticas fazem os valores de resiliência diminuírem, devido ao aumento das lâminas de inundação na cidade, no geral, como apresentado na Figura 6. No Cenário Tendencial, as áreas de resiliência baixa e crítica passaram de 639.821 m² para 1.522.212 m² e de 137.669 m² para 220.758 m², respectivamente. No Cenário Resiliente, a área de resiliência baixa passou de 39.134 m² para 61.574 m². O Cenário Resiliente é capaz de responder positivamente também aos desafios futuros, mostrando, efetivamente, a resiliência que era esperada.

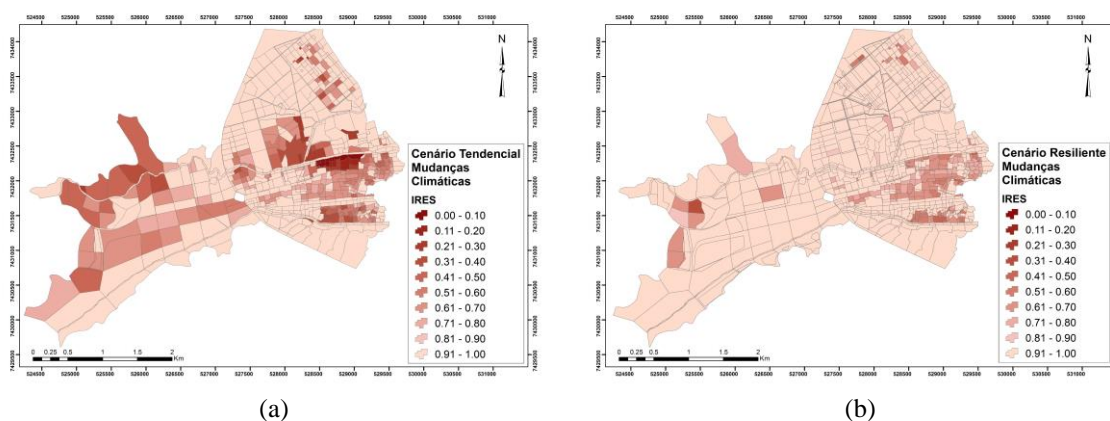


Figura 6 - IRES – Mudanças Climáticas – (a) Cenário Tendencial; (b) Cenário Resiliente.

CONCLUSÕES

A avaliação das consequências da expansão urbana nas áreas a montante da BR-101, prevista indistintamente no Plano Diretor de 2010, foi importante para comprovar, através da modelagem matemática, a hipótese de que as regiões mais a jusante teriam seus impactos agravados e que o Plano proposto deve ser revisto. Por sua vez, a introdução de medidas de preservação a montante, com a criação de parques, a reconexão de rios e uma ordenação mais racional da urbanização permitiram obter uma diminuição significativa das lâminas de inundação. Os cenários com efeitos de mudanças climáticas mostraram que as medidas propostas no *Cenário Resiliente* são capazes de responder bem não só ao padrão atual de inundações como também a padrões futuros, mais severos.

A aplicação do IRES nos três cenários mostra que é relativamente alto o valor obtido para a cidade como um todo (condizente com o estágio ainda inicial de expansão), mas a avaliação espacial mostrou regiões críticas, com baixa resiliência, principalmente na bacia do rio Perequê Açu, ao longo de suas margens. A aplicação no Cenário Tendencial ressaltou que a expansão em áreas de montante intensifica os efeitos das inundações a jusante e afeta a capacidade da cidade em se recuperar dos eventos de cheia, com diminuição geral dos valores de resiliência. Após a implantação das medidas do *Cenário Resiliente*, o índice apresentou um significativo aumento de valor, em consequência da redução das lâminas de alagamento e melhor ordenamento de uso do solo. Esse comportamento foi ratificado nos cenários com mudanças climáticas. Desta forma, técnicas que racionalizam a relação da água com o espaço urbano são capazes de construir cidades mais resilientes às inundações.

O índice demonstra um bom potencial para complementar a avaliação de medidas de controle de inundação em bacias urbanas, além de oferecer uma leitura do território quanto à capacidade do sistema de se adaptar frente a mudanças futuras no padrão de uso do solo e no padrão das inundações, configurando uma importante ferramenta para subsidiar o planejamento e projetos de soluções de drenagem urbana.

REFERÊNCIAS

- BARBEDO, J. M. R., 2016, *Urban Flood Mitigation Through Land-Use Adaptation: A Socioecological Perspective of Paraty*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- CARNEIRO, P. R. F.; MIGUEZ, M. G., 2011, *Controle de Inundações em Bacias Hidrográficas Metropolitanas*. 1ª Edição. São Paulo: Annablume, 2011.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. *Censo Demográfico 2010*.
- JHA, A. K.; MINER, T. W.; GEDDED, Z. S., 2012, *Building Urban Resilience: Principles, Tools and Practice*, Washington D. C., USA, The World Bank.
- KOKS, E. E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T. G.; BOTZEN, W. J. W., 2015, *Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management*, *Environmental Science & Policy*, v. 47, p. 42-52.
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; 2002. *Urban Flood Control through a Mathematical Flow Cell Model*. In: *Water International Resources*, Vol. 27, Nº 2, págs. 208-218, Junho 2002; Illinois, E.U.A.
- MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M., 2016, *Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O.M.; VERÓL, A.P.; GUSMAROLI, G., 2017, *Urban Flood Simulation Using MODCEL—An Alternative Quasi-2D Conceptual Model*, *Water*, Vol. 9, No. 6, pp. 445.
- NASCIMENTO, M., 2005, *Nascimento, Morte e Renascimento de Paraty-RJ: A Importância da Posição Geográfica na Sua Evolução Urbana*. X Encontro de Geógrafos da América Latina. São Paulo, 2005.
- PREFEITURA DE PARATY, 2010, *Plano Diretor do Município de Paraty*, Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente de Paraty, Brasil.
- ROSMAN, P. C. C. (Editor), 2015, *Estudo Técnico de Apoio ao Desenvolvimento do Plano de Adaptação da Cidade do Rio de Janeiro às Mudanças Climáticas – EPA/PA R1 – Modelagens para definição de níveis máximos nas embocaduras fluviais do sistema lagunar de Jacarepaguá, considerando cenários de mudanças climáticas*. Fundação COPPETEC, PPE18954, Rio de Janeiro, 2015.
- SAMUELS, P.; GOULDBY, B., 2009, *Language of Risk – Project Definitions* (Second Edition). In *FloodSite Project*, Document Number: T32-04-01.
- SAYERS, P.; LI, Y.; GALLOWAY, G.; PENNING-ROWSELL, E.; SHEN, F.; WEN, K.; CHEN, Y.; LE QUESNE, T., 2013, *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. Paris, UNESCO.
- TEBALDI, I. M.; MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P., 2015, *Índice de Resiliência a Inundações: Aplicação para a Sub-bacia do Rio Joana, Rio de Janeiro, RJ*. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, 2015.