

Modelagem da ocupação da bacia do rio Pitimbu - RN

*Modeling the occupation of Pitimbu rivers
watershed - RN*

Submetido em: 07/05/16

Revisado em: 21/05/16

Aprovado em: 07/06/16

Antonio Marozzi Righetto
Salatiel da Rocha Venâncio

RESUMO: A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP), pertencente à região metropolitana da capital Potiguar, Estado do Rio Grande do Norte (RN), é um importante sistema hídrico para o abastecimento urbano. Abastece aproximadamente 30% da população da parte sul de Natal (zonas sul, leste e oeste) e contribui para a regulação do ecossistema ao longo do rio. Neste estudo propôs-se: (i) avaliar a dinâmica do desenvolvimento urbano na BHRP, aplicando Autômatos Celulares como instrumento de modelagem; (ii) simular cenários urbanos futuros, entre 2014 e 2033, empregando o programa de simulação SLEUTH. Na fase de calibração, foram utilizadas as manchas urbanas dos anos de 1984, 1992, 2004 e 2013, com resolução de 100 metros. Com a simulação, verificou-se a predominância do crescimento orgânico a partir de centros urbanos existentes. O crescimento espontâneo ocorreu por toda extensão da Bacia, porém, a probabilidade de crescimento efetivo não ultrapassou 21%. Por outro lado, houve crescimento de 68% no período entre 2014 e 2033, correspondendo a uma área de expansão de 1.778 ha. Para o ano de 2033, tanto a área da nascente do rio Pitimbu quanto nas vizinhanças da lagoa do Jiqui prevê-se crescimento acima de 78%. Os impactos do crescimento urbano sobre os recursos hídricos são discutidos considerando-se a quantidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem urbana. Autômato celular. SLEUTH. Impacto nos recursos hídricos.

ABSTRACT: The Pitimbu River Watershed (PRW), located in the Potiguar region of the Metropolitan area of the capital of RIO Grande do Norte, is a major source of urban water supply. The PRW supplies approximately 30% of southern Natal (South, East and West Zones) and contributes to the river ecosystem regulation. This study aims (i) to evaluate the urban development dynamics in the PRW, applying Cellular Automata as a modeling instrument; (ii) to simulate future urban scenarios, between 2014 and 2033, using the SLEUTH simulation program. For calibration, urban areas from 1984, 1992, 2004 and 2013 years were used, with 100 m cell resolution. Simulations provided estimations of organic growth expansions in the PRW from existing urban centers. The spontaneous growth occurred throughout the watershed; however, the probability of effective growth should not exceed 21%. Otherwise, there was an increase of 68% for the period between 2014 and 2033, corresponding to an expansion area of 1,778 ha. For 2033, the headwaters area of Pitimbu River as well as in the Jiqui Lake surroundings will increase more than 78%. The impacts of urban growth on water resources are discussed by considering quantity and quality of superficial flow and groundwater.

KEYWORDS: Urban modeling; Cellular automata. SLEUTH. Impacts on water resources.

INTRODUÇÃO

Na busca de suprir suas necessidades, o homem transformou o ambiente natural. Nesse processo de ocupação, ocorrem também, de forma discreta, pequenas ações de proteção e preservação ambiental que levam em conta não somente as necessidades da atual qualidade de vida, mas também as das gerações futuras. Grande parte das alterações, no entanto,

podem levar a danos irreversíveis, que dificultam ou mesmo inviabilizam a sobrevivência dos ecossistemas naturais. Esse cenário de degradação, deixa o homem em uma situação de incansável busca por fontes cada vez mais distantes de recursos hídricos para manter as atividades urbanas e rurais.

Com o aumento da população e o crescente uso dos recursos naturais, a humanidade se depara com mais frequência com problemas como a escassez de

água e a preocupação com o suprimento de suas necessidades. O homem vem ocupando áreas de proteção dos recursos naturais de forma desordenada sejam através da agropecuária, indústria ou urbanização, provocando o desequilíbrio do meio ambiente e ameaçando a existência da própria espécie (BORGES, 2002).

Neste sentido, a gestão e o controle ambiental são fundamentais para promover a adequação das modificações e adaptações do ambiente natural às necessidades individuais e coletivas, de maneira a evitar ou minimizar os impactos ambientais produzidos pelas atividades humanas, (ROCHA; ALIPAZ, 2010).

A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP), pertencente à região Metropolitana da capital Potiguar, estado do Rio Grande do Norte (RN), se encaixa notadamente nesse contexto de falta de gestão dos recursos hídricos. Por contribuir para o consumo humano e dessedentação animal, entre outros fins, a bacia hidrográfica carece de um plano de ação em conjunto com os poderes públicos, de forma a implantar instrumentos eficazes para combater as mais diversas formas de degradação ambiental. Essa bacia é de grande importância, pois além de abastecer com água doce aproximadamente 30% da população da parte sul de Natal (zonas sul, leste e oeste), contribui para o equilíbrio do ecossistema ao longo do rio.

Na conjuntura atual, o rio Pitimbu tem papel relevante, pois alimenta um reservatório natural denominado Lagoa do Jiqui, localizada no baixo curso do rio Pitimbu (KOBAYASHI, 2009) por meio das águas de ressurgências subterrâneas e das precipitações ao longo do ano. O rio é perene, com vazão de base proveniente do aquífero Dunas/Barreiras, formando um sistema hidráulico único (MELO, 1995).

A ocupação desordenada do solo e a crescente disposição de esgotos por fossas e sumidouros vêm comprometendo as águas subterrâneas e, potencialmente, as águas do rio Pitimbu. Além disso, a impermeabilização das regiões habitadas compromete também a qualidade das águas e as vazões de base do rio.

Diante desses fatos, este trabalho objetivou caracterizar a BHRP no aspecto de uso e ocupação do solo e seu impacto nos recursos hídricos. A pesquisa foi estruturada em dois objetivos específicos: (i) interpretação da dinâmica do desenvolvimento urbano na BHRP, aplicando-se Autômatos Celulares (AC)

como instrumento de modelagem; (ii) simulação de cenários urbanos futuros por meio do aplicativo SLEUTH.

REVISÃO DE LITERATURA

Pela importância da BHRP ela vem sendo tomada como uma bacia representativa periurbana da região do nordeste brasileiro e assim, realizada sistematização em pesquisas hidrológicas, hidrogeológicas e de urbanismo com vistas à acumulação de informação de modo que o comitê da bacia possa vir a aplicar técnicas confiáveis de gestão e promover o desenvolvimento sustentável, além de propiciar investigações fenomenológicas e de modelagem.

Oliveira (1994) analisou a qualidade da água do rio Pitimbu através de monitoramento sistemático. O autor recomendou a construção de mapa do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica, identificando as ações poluidoras pontuais ou difusas ao longo do curso d'água, do monitoramento e gerenciamento do manancial, restringindo fortemente a ocupação nas áreas próximas às margens do rio.

Borges (2002) avaliou qualitativamente as implicações das ações antrópicas e ambientais na BHRP. Verificou que a área é ambientalmente frágil em consequência das diversas formas de uso e ocupação do solo. Constatou, ainda, que a Bacia vem passando por um processo de acentuada degradação e deterioração da qualidade de suas águas, o que pode gerar a interrupção do abastecimento na região, comprometendo a qualidade de vida da população dependente deste manancial. Sugere implantar a gestão efetiva na bacia, envolvendo a população e órgãos públicos na busca por soluções ambientalmente adequadas.

Sena (2008) verificou a ocorrência de forte pressão para a ocupação das margens do rio Pitimbu em função do crescimento urbano e valorização territorial, tornando ainda mais crítica a situação ambiental. Para o período entre 1993 e 2007 realizou a avaliação das condições da qualidade da água do rio através de levantamento físico-químico e biológico. Os resultados mostraram alto teor de ferro nas águas subterrâneas, baixos valores de oxigênio dissolvido e alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO). O parâmetro turbidez apresentou as maiores taxas em alguns pontos do rio Pitimbu devido ao carreamen-

to de substâncias pela drenagem. O teor de fósforo apresentado nos resultados, explica-se pela utilização do rio por parte da população ribeirinha para lavagem de roupas com detergentes.

Kobayashi (2009) desenvolveu estudos voltados à análise dos aspectos qualitativos e quantitativos da água e do sedimento no baixo curso do rio Pitimbu. Os resultados demonstraram a necessidade de se adotar medidas eficientes no gerenciamento, que resultem na proteção ambiental da bacia.

Águas subterrâneas

A ocupação e o uso do solo em bacias hidrográficas deveriam ocorrer com base no planejamento por meio das características e vulnerabilidades dessas áreas, de modo a garantir sustentabilidade ao abastecimento da população e ao meio ambiente. Nesse aspecto, é imprescindível a boa qualidade das águas de abastecimento, com o aproveitamento consciente dos mananciais, superficiais ou subterrâneos.

Costa (1995, apud SENA 2008) destaca a agricultura como principal atividade de ocupação da bacia do rio Pitimbu em 1979 em cerca de 35,7% da área. Em 1988, a área agrícola foi reduzida, passando a ocupar apenas 26,4%. Embora a área fosse relativamente pequena, os sítios urbanos tiveram crescimento médio de 195%, principalmente na cidade de Parnamirim, em um período de apenas nove anos.

Santos (1999) analisou as implicações em uma sub-bacia do rio Pitimbu decorrentes do processo de uso e ocupação do solo. Utilizou dados obtidos de fotografias aéreas, além das bases cartográficas dos anos de 1971 e 1996, com atualização dos dados em pesquisa de campo. Constatou que a expansão urbana no entorno do rio Pitimbu vem ocorrendo de forma a alterar o equilíbrio dinâmico do sistema. Em Parnamirim, a ocupação da margem do rio Pitimbu ocorre de forma contínua, com riscos, também, de ocupação indevida, principalmente pela inexistência de Plano Diretor.

O uso e ocupação do solo, segundo Sena (2008), são fatores determinantes qualidade das águas. As águas resultantes de drenagem urbana, juntamente com os resíduos das atividades antrópicas, são carregadas para o curso do rio, influenciando diretamente o equilíbrio ambiental da Bacia. As águas subterrâneas, por sua vez, podem ser afetadas pela disposição ina-

dequada de efluentes líquidos e sólidos no solo, que, conectados ao manancial superficial, comprometem a qualidade de suas águas.

Devido à crescente ocupação desordenada na bacia do rio Pitimbu, com desmatamentos, queimadas, atividades extrativistas, impermeabilização do solo, barramentos conflitos de uso da água e ocupação do solo dessa bacia, resultou em uma paisagem sem a preocupação de preservar as condições naturais pré-existent ou um novo cenário atraente ao urbanismo regional.

A atuação do comitê da BHRP pode levar a um dinamismo quanto à gestão da ocupação, com destaque ao saneamento básico, paisagismo. A modelagem de sistemas complexos é uma iniciativa perfeitamente adequada para estimular o desenvolvimento de pesquisas na BHRP.

Autômatos Celulares

Em 1970, o matemático britânico John Holton Conway desenvolveu o “jogo da vida”, um autômato celular (AC) que simulava alterações em populações de seres vivos baseados em regras locais. Neste autômato, a regra era simples: cada célula nasce ou morre de acordo com as células vizinhas e há uma tendência de morte de todas as células ou a geração de padrões estáveis.

Wolfram (1984) estudou sistematicamente a mecânica estatística do funcionamento dos ACs e a formação de padrões particularmente similares. Os resultados o levaram a concluir que o AC poderia ser utilizado como modelo matemático de sistemas físicos, biológicos e computacionais.

Clarke et al. (1997) estudaram os modelos tradicionais de urbanização, com suas várias características particulares. Alguns modelos procuravam prever tanto as relações econômicas, quanto os padrões sociais e econômicos internos, dentro dos limites da cidade. Entretanto, outros modelos dependiam menos da geometria e da economia e mais dos padrões sociais e raciais como determinantes da estrutura da cidade. Um terceiro grupo previa a estrutura e as formas das cidades, com base na diferença entre as interações dos indivíduos e seu comportamento. Os autores constataram que todos os grupos de modelos urbanos foram desenvolvidos para uma determinada região. Clarke e seus colaboradores entenderam que

o desenvolvimento de um modelo de AC envolvia a definição de regras, calibração com dados históricos e também a análise do passado e presente para prever cenários futuros.

Com as experiências passadas, foi então desenvolvido o software chamado SLEUTH, um modelo para simular o crescimento urbano influenciado pela urbanização, através de regras simples de crescimento para qualquer região.

Os Autômatos Celulares têm sido utilizados em todo o mundo, inclusive no Brasil. As pesquisas realizadas com modelagem estão praticamente em todos os segmentos: engenharia, computação, economia e no desenvolvimento urbano (CHAUDHURI; CLARKE, 2013; FURTADO; DELDEN, 2011; COSTA, 2010; SILVA; CLARKE, 2003; CASTRO; CATRO, 2008).

No Brasil, Grigio (2008) buscou conhecer a dinâmica do uso e ocupação do solo do baixo curso do rio Piranhas-Assu. Para tanto, fez uma análise multitemporal entre o passado e presente, e desenvolveu projeções futuras através de simulações. Mostrou que os fatores determinantes para a mobilidade espacial das atividades antrópicas estavam relacionados à pré-existência de comunidades com vocação agropecuária e à existência de vias de acesso e escoamento.

Peres e Polidori (2009) desenvolveram um estudo integrando fatores urbanos, naturais e institucionais por meio de modelos baseados em Autômatos Celulares. Foram feitas simulações em ambiente computacional através do modelo SACI (Simulador do Ambiente da Cidade), capaz de capturar morfologias e processos de mudança no solo, expansões urbanas e modificações ambientais associadas. Concluíram a integração de fatores urbanos, naturais e institucionais poderia auxiliar de modo privilegiado a compreensão do desenvolvimento urbano.

Segundo Batty (1997), os ACs são modelos que utilizam malha de células retangulares, de forma que as células contíguas ou adjacentes alteram o seu estado (os seus atributos ou características), através da aplicação repetitiva de regras simples. Entretanto, para uma situação real, as condições geográficas de uma área nunca poderão ser uniformes, como a morfologia da paisagem.

O autor destaca que as células podem ser definidas em várias dimensões, no entanto, para aplicações urbanas o formato padrão utilizado são de duas

dimensões. Os resultados das regras de transição são interpretados como um aumento ou diminuição do crescimento urbano. Esta mudança é realizada em função do que está acontecendo na vizinhança da célula. Um excelente exemplo disso é o crescimento urbano ou declínio de um bairro em uma cidade.

O AC contém pelo menos cinco características:

Célula: é a unidade básica do AC e normalmente é formada pela interseção de linhas e colunas formando uma grade (grid);

Estado: Cada célula pode ter apenas um estado a partir de um conjunto de estados em um tempo t . Nos modelos baseados em AC, os estados das células representam os tipos de uso e ocupação do solo – urbano ou rural;

Vizinhança: É o conjunto de células que está interagindo diretamente com a célula selecionada. Num espaço bidimensional, existem dois tipos de vizinhanças

Regras de transição: É a mudança de um estado de uma célula em resposta ao estado atual e também em relação aos estados das células vizinhas. As regras são essenciais para o desenvolvimento celular e não há limite em termos de quantidade. Além das regras serem extremamente simples, elas podem gerar padrões complexos de desenvolvimento e também ser determinísticas ou aleatórias no comportamento;

Tempo t : É a dimensão temporal que existe num sistema de AC, pois todas as células são atualizadas simultaneamente nas iterações com o tempo;

O SLEUTH é um software de modelagem urbana que utiliza como ferramenta o Autômato Celular para simular cenários futuros do desenvolvimento urbano em uma determinada área. O nome dado ao programa é um acrônimo como esclarece Silva et al. (2002): Slope (relevo); Land use (uso do solo); Exclusion (áreas não urbanizáveis); Urban Extent (manchas urbanas); Transportation (infraestrutura viária); Hillshade (exposição solar).

Sua criação e manutenção são de responsabilidade do Departamento de Geografia da Universidade da Califórnia, Santa Barbara – UCSB, através da equipe do professor de Geografia Keith C. Clarke (CLARKE et al., 2007; CLARKE; GAYDOS, 1998).

O software é gratuito e faz parte do Projeto Giga-lópolis: (www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig).

Neste presente estudo, o modelo SLEUTH foi utilizado para simular a modelagem da expansão urba-

na na BHRP por ser amplamente utilizado em escala regional e ter a capacidade de se ajustar a diferentes tipos de terreno, bem como pela relativa facilidade de implementação e de cálculo (JANTZ et al. 2003; BIHAMTA et al., 2014; CHAUDHURI; CLARKE, 2013). Está bem documentado, com boa orientação em relação aos dados de entrada, calibração dos parâmetros e simulações de cenários futuros.

As simulações realizadas com o modelo calibrado tiveram como objetivo a determinação de áreas densamente ocupadas em futuro próximo e impactos que poderão causar sobre os recursos hídricos atualmente disponíveis.

Considerando a BHRP como bacia representativa e, portanto, um sistema apropriado para pesquisas em diversas áreas, a utilização de autômatos celulares, numa programação particular, em que possam estar envolvidas variáveis de ocupação e uso do solo, transporte, abastecimento de água, esgotamento sanitário, contaminação, drenagem etc. abre um leque de pos-

sibilidades de modelagem e, consequentemente, do entendimento complexo de uma bacia hidrográfica periurbana.

ÁREA DE ESTUDO

A BHRP (Figura 1) está localizada na zona costeira oriental do estado do Rio Grande do Norte, com cerca de 132,1 km², distribuídas ao longo dos municípios de Macaíba (46%), Natal (5%) e Parnamirim (49%). O rio Pitimbu tem extensão total de 37 km, nasce no município de Macaíba, especificamente na comunidade de Lagoa Seca, sendo os 2 km iniciais não perenes. Deságua na Lagoa do Jiqui, município de Parnamirim. Essa bacia é parte integrante do sistema Pirangi, tornando-se um dos tributários.

A disponibilidade hídrica da bacia, de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH), é quantificada pelo volume afluente médio anual estimado em 50 milhões de m³/ano, correspondendo

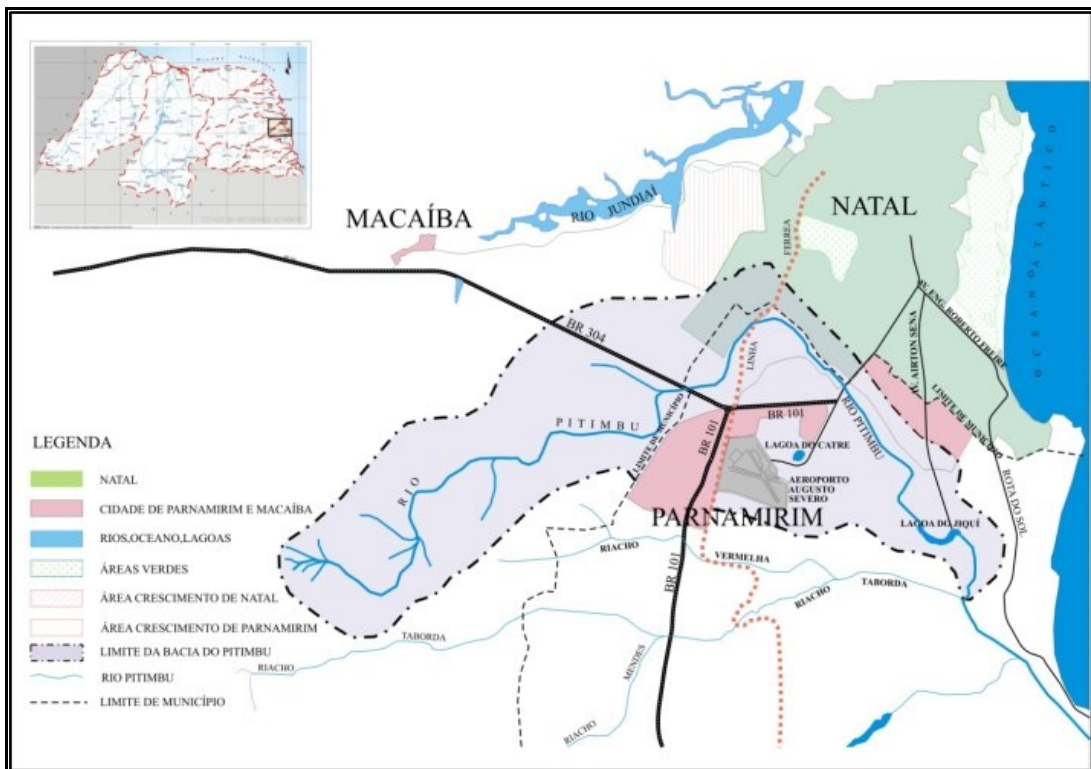


FIGURA 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP), RN

a uma vazão média de $3,20\text{m}^3/\text{s}$. Ainda, de acordo com o Plano, a vazão afluyente média à lagoa é da ordem de $3,10\text{m}^3/\text{s}$

O regime pluviométrico da região caracteriza-se por apresentar concentração das chuvas no primeiro semestre do ano. O trimestre mais chuvoso é o de março/maio, respondendo por 44,8% da precipitação anual. Nos totais anuais de precipitação, a bacia apresenta maiores valores na sua porção Leste (1800 mm), reduzindo ao afastar-se do litoral, em direção ao Oeste (1200 mm). O período úmido engloba os meses de março a julho e o período seco de agosto a fevereiro.

A geologia da BHRP é constituída por depósitos aluvionares e sedimentos argilosos, arenosos e cascalhos.

As águas subterrâneas da Bacia do rio Pitimbu são essencialmente do armazenamento por formações sedimentares do Aquífero Dunas/Barreiras (ADB). O aquífero Dunas se forma nas áreas mais próximas ao litoral, e o Barreiras é predominante nas regiões de alto e médio curso da bacia.

O ADB compõe um sistema hidráulico único, livre, no qual as dunas exercem a função de transferência das águas de infiltração em direção aos estratos inferiores do Barreiras. Pode apresentar semiconfinamentos e seu nível potenciométrico flutua com as variações sazonais. Mostra-se vulnerável à poluição elevada a muito elevada, dada a excessiva permeabilidade dos solos arenosos.

Melo (1995) elaborou um mapa potenciométrico e constatou que o fluxo subterrâneo em direção ao rio Pitimbu tem gradiente médio de 0,66%, com descarga anual da ordem de $23,50 \times 10^6 \text{ m}^3$, considerando uma frente de escoamento de 10 km. A zona principal do aquífero está situada nos setores sul e sudeste do município de Natal, incluindo a faixa do Planalto, San Vale e Ponta Negra, onde se localizam importantes lagoas como Jiqui, Pirangi e Ponta Negra.

Em termos qualitativos, as águas do aquífero Dunas/Barreiras apresentam excelente potabilidade, com níveis de salinidade inferiores a 150 mg/l, não apresentando restrições para o consumo humano. Entretanto, há crescente contaminação por nitrato das águas subterrâneas da bacia do Pitimbu, provocada pelo aporte de efluentes sanitários nas áreas urbanizadas aí existentes. Estudos desenvolvidos (CABRAL; RIGHETTO; QUEIROZ. 2009) regis-

traram teores elevados de nitrato nas imediações dos bairros Planalto, Cidade Satélite e Nova Parnamirim. A contaminação encontra-se diretamente associada ao avanço das áreas urbanizadas, sendo sua expansão facilitada pelo fluxo subterrâneo/hidrodinâmico do aquífero em direção ao mar e ao vale do rio Pitimbu.

O rio Pitimbu nasce na comunidade de Lagoa Seca, município de Macaíba, e desemboca à jusante da lagoa do Jiqui no riacho Taborda. Constitui-se numa sub-bacia do rio Pirangi (corresponde a 27,62% dessa bacia) e abrange os municípios de Macaíba, Parnamirim e Natal, estando posicionadas nestes dois últimos as áreas urbanizadas.

A Bacia do rio apresenta o formato de um polígono irregular. O rio principal possui 37,0 km de extensão desde sua nascente, desenvolvendo-se no sentido sudoeste/nordeste por longo trecho do seu percurso, até o ponto onde deságua, no rio Taborda, com uma acentuada curva de sudoeste para leste. O rio Pitimbu é perene e alimentado por ressurgências de águas subterrâneas do aquífero Barreiras.

Nos 13 km iniciais, o rio corta áreas rurais pertencentes ao município de Macaíba. No segundo trecho, próximo à periferia de Natal e Parnamirim, há uma maior ocupação da bacia, percebendo-se a presença de parques industriais e conjuntos habitacionais em direção às suas margens.

O rio apresenta profundidades de até 1,5 m em seu leito maior e ao longo de seu desenvolvimento não é difícil encontrar pequenos barramentos que, em geral, são voltadas para o uso em irrigação.

A ocupação e o uso do solo na BHRP vêm acontecendo de forma desordenada, sem critérios e sem planejamento que considerem as características e vulnerabilidades da área, de modo a garantir a sua sustentabilidade.

Em 2005 foi realizado um estudo que se baseou no número da população residente em cada município da Bacia, com valores de crescimento demográfico projetados até o ano de 2025. Para Parnamirim a população de 165 mil habitantes deverá chegar a 250 mil em 2025.

A Figura 2 mostra a distribuição do uso e ocupação do solo na área da bacia, incluindo as Áreas de Preservação Permanente (APP).

Na bacia do rio Pitimbu, o sistema de drenagem urbana é bastante deficiente, quando não inexistente.

No município de Parnamirim constata-se, pelo seu alto grau de urbanização, redução drástica das áreas de infiltração, além do sub dimensionamento e diminuição de volume de suas bacias de acumulação.

Nessa região, a espessura saturada do ADB aumenta de oeste para leste, variando de 15,47 a 56,5 m (com média de 32,45 m). O sentido do fluxo subterrâneo é em geral de oeste para leste, sendo possível identificar as correspondentes zonas de recarga e de descarga das águas subterrâneas. A Recarga foi estimada em 253 mm/ano, que corresponde à uma taxa de infiltração de 16,4% da precipitação (ALVES et al., 2016).

Recentemente, Righetto e Dias (2016) modelaram a hidrogeologia da BHRP, considerando 5 camadas no modelo MODFLOW-PRO e obtiveram a potencialidade para vários cenários de exploração. A malha de discretização é a mesma empregada neste trabalho, de modo a permitir em trabalhos futuros, a integração do uso e ocupação com a hidrogeologia da bacia.

METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido em quatro tópicos. O primeiro concentrou-se no processo de modelagem do SLEUTH. O segundo deteve-se à obtenção de dados históricos necessários à entrada do modelo. O terceiro envolve o processo de calibração. E o quarto, a simulação dos cenários futuros.

Modelagem

A modelagem ocorre em duas etapas gerais: a primeira é a etapa de calibração, onde os padrões históricos de crescimento são utilizados a fim de ajustar os parâmetros do modelo. A segunda é a simulação dos cenários projetados para o futuro.

Essas etapas foram desenvolvidas por meio do software SLEUTH, utilizando AC como ferramenta de modelagem. A área de estudo do SLEUTH é representada por uma grade regular de células (pixels) homogêneas, onde cada célula tem apenas um dos

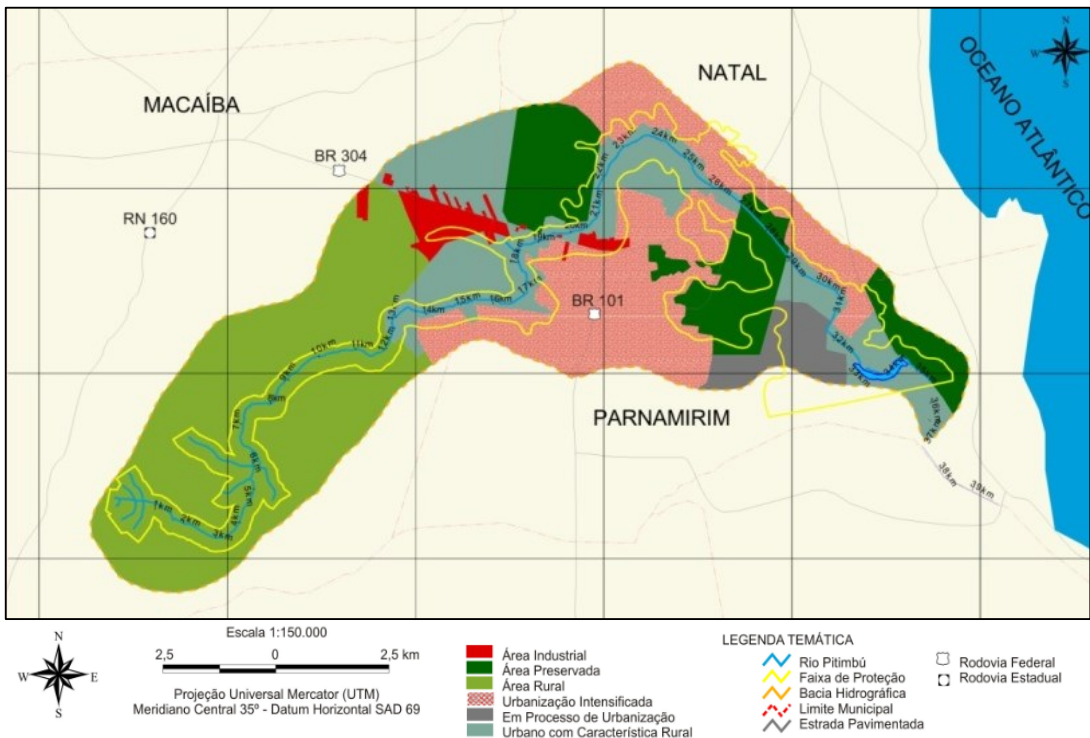


FIGURA 2 – Caracterização do tipo de ocupação do solo da BHRP, RN (SERHID, 2005)

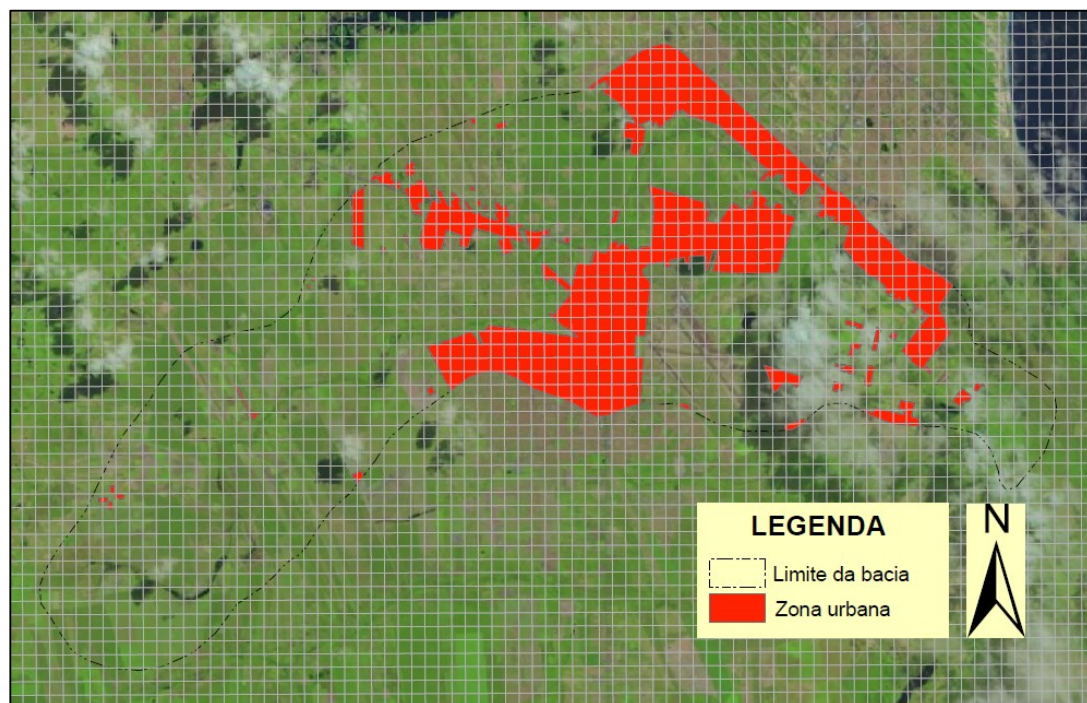


FIGURA 3 – Discretização ou células consideradas na BHRP.

dois estados: urbano ou rural. As células fora da bacia são consideradas inativas (Figura 3).

Para a modelagem, utilizam-se cinco regras, cada uma associada a algum tipo de crescimento. São elas: crescimento espontâneo, crescimento difuso e origem de novos centros, crescimento orgânico, crescimento influenciado pela malha viária de transporte e crescimento influenciado pela topografia, ou slope (JANTZ et al., 2010).

Crescimento espontâneo - ocorre de forma aleatória. Isto significa que qualquer célula rural é uma candidata a se tornar urbanizada em qualquer espaço de tempo. O comportamento dessa regra é controlado pelo coeficiente dispersion do modelo.

Crescimento difuso e origem de novos centros urbanos - é aplicada espontaneamente nas células urbanizadas. O coeficiente breed define a probabilidade do surgimento de um novo centro de expansão. Estes novos centros são criados a partir das células urbanizadas pela regra anterior.

Crescimento orgânico - nasce a partir dos centros em expansão. Caso uma célula rural tenha pelo menos três células vizinhas urbanizadas, há possibilidade desta

célula ser urbanizada. O coeficiente spread controla esta regra.

Crescimento influenciado pela malha viária de transporte - se desenvolve da seguinte forma: (1) as células recém-urbanizadas (da regra anterior) são selecionadas aleatoriamente (a partir do coeficiente breed); (2) para cada célula selecionada é feita uma varredura, à procura de estradas num determinado raio de distância; (3) se existir estrada dentro desse raio (determinada pelo coeficiente road gravity), uma célula é selecionada temporariamente e percorre aleatoriamente essa via (determinada pelo coeficiente dispersion), até encontrar uma célula favorável ao crescimento; (4) a localização desta célula é finalmente considerada como um novo núcleo de expansão urbana.

Crescimento Slope - Este coeficiente representa a influência da topografia sobre o desenvolvimento urbano, e é aplicado como um teste antes de qualquer célula ser urbanizada. Caso o valor deste coeficiente seja alto, a probabilidade da célula se tornar urbanizada diminuirá, por se situar em encostas íngremes.

Para este estudo, os valores dos coeficientes foram atribuídos por meio da calibração e por padrão que variam entre 0 e 100 (CLARKE; DIETZEL; GOLDSTEIN, 2008).

Além das cinco regras de crescimento, o modelo conta com um segundo nível de regras de comportamento, chamadas “self-modification”. São regras requisitadas pelo sistema quando há uma taxa de crescimento excepcionalmente alta ou baixa.

Métricas - Após cada fase de calibração, o SLEUTH calcula 14 medidas estatísticas para a análise e acompanhamento do desenvolvimento urbano que são chamadas de métricas. O valor de cada métrica varia entre 0 e 1 sendo 1 o ajuste perfeito. As seguintes métricas foram utilizadas:

Compare: relação da população modelada e a população real para os anos de controle (em pixels);

Pop (r2): relação entre a modelagem urbana e a urbanização real para os anos de controle, em pixels (regressão pelo método dos mínimos quadrados);

Edges (r2): relação entre a modelagem do crescimento urbano periférico e o crescimento urbano periférico real para os anos de controle, em pixels (regressão pelo método dos mínimos quadrados);

Clusters (r2): relação entre a modelagem do crescimento de agrupamentos urbanos e do crescimento de agrupamento urbano real para os anos de controle, em pixels (regressão pelo método dos mínimos quadrados);

Slope: Inclinação média das células urbanizadas;

X-Mean: A média dos pixels urbanos da coluna x;

Y-Mean: A média dos pixels urbanos da coluna y.

Dados Históricos

Para a etapa de calibração são necessárias informações históricas com o objetivo de ajustar o modelo o mais próximo possível da realidade observada. Os dados requeridos são os seguintes: quatro arquivos da mancha urbana; dois arquivos da malha de rodovias; um arquivo das áreas não urbanizáveis; um arquivo da topografia; um arquivo do relevo.

As imagens adquiridas foram obtidas a partir do satélite Landsat e cedidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O Sistema de Coordenadas utilizado para o tratamento dos arquivos foi o

DATUM WGS84, WGS_1984_UTM Zone_25S.

Estas imagens foram importadas para o ambiente SIG (ArcGis v10), vetorizadas, georreferenciadas, convertidas em arquivos raster e exportadas para o formato GIF-8 bits. O resultado desse procedimento são arquivos “gif” em tons de cinza com dimensões 233 x 143 (colunas x linhas) e resolução de 100 metros. É importante lembrar que os pixels do arquivo tipo raster devem variar entre 0 e 100 e todos os arquivos devem ter as mesmas dimensões. Os mapas resultantes dessa exportação são arquivos binários.

Manchas urbanas. As manchas urbanas selecionadas para este estudo foram as de 1984, 1992, 2004 e 2013. O primeiro ano é usado como semente (seed) e os demais anos definidos como “anos de controle”, para medir os valores estatísticos. Para o modelo, os pixels brancos são considerados áreas urbanizadas enquanto que os pretos, áreas desprovidas de urbanização ou limitadas ao crescimento.

Malhas viárias de transporte. As malhas viárias dos anos 2004 e 2013, foram escolhidas as principais rodovias que cortam a BHRP e a estrada próxima da nascente do rio Pitimbu. São elas: BR 101, BR 304, prolongamento da Avenida Prudente de Moraes, rua Dr. Francisco de Sá, Avenida Olavo Lacerda Montenegro, estrada de Pium e estrada do Lamarão.

Declividade (topografia). O raster da topografia foi selecionado a partir de imagem de satélite da base cartográfica da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), por meio do projeto Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (MIRANDA, 2005). Os pixels são em tons de cinza e variam entre 0 e 100, em percentual.

Áreas não urbanizáveis. A camada de exclusão é usada para restringir o crescimento urbano. As áreas como Zonas de Proteção Ambiental (ZPAs), Áreas de Preservação Permanente (APPs), parques nacionais ou lagos fazem parte desta restrição. Nesse estudo foram excluídos o rio Pitimbu com suas margens, áreas militares, aeroporto, ZPA 3, distritos industriais e a mata de Emaús.

Relevo sombreado (hillshade). O raster requerido pelo modelo serve apenas para fins de visualização, como uma imagem de fundo, e não desempenha papel na determinação do comportamento dos resultados. O modelo exige que a imagem seja em tons de cinza.

Calibração do modelo

O objetivo da calibração é o de encontrar um conjunto de valores para os parâmetros de crescimento (dispersion, breed, spread, slope e roads-gravity) a serem aplicados na simulação de cenários futuros.

A calibração do modelo é a etapa mais importante para o sucesso da simulação. Ela determina os parâmetros iniciais que serão executados na modelagem. Esses valores foram calculados a partir dos anos históricos (1984 – 2013) através do método Monte Carlo. Esse método consiste em percorrer o período desses anos fazendo combinações para os valores dos coeficientes de crescimento, comparando sempre com o padrão de crescimento histórico, (JANTZ et al., 2010)

O processo de calibração se constitui de três fases sucessivas: a fase grosseira, a média e a final e é complementada com a etapa chamada forecast, que consiste em selecionar os parâmetros que serão usados na simulação dos cenários.

Na etapa de calibração são estudadas as seguintes métricas: compare, population (pop), edges e clusters. A análise da variação dos valores ao longo das três fases de calibração permite verificar a relação entre as populações modelada e real, o comportamento dos diversos elementos, como progridem, seu grau de variação e qual a importância para o sistema como um todo etc. Essa análise deve ser feita para se conhecer a verdadeira correlação entre a calibração e os dados históricos. As métricas supracitadas servem para verificar o quanto a modelagem é fiel aos dados históricos. Quanto mais a estatística se aproxima de 1, mais próximo é da realidade.

Simulação dos Cenários

O processo de simulação consiste em utilizar os coeficientes finais da etapa anterior e configurá-los para a execução do modelo. Por intermédio dessa simulação, o SLEUTH faz a previsão do crescimento urbano para os cenários futuros, entre os anos de 2014 e 2033.

Após a simulação, o SLEUTH gera 22 arquivos em formato “gif” e 6 em formato “log” contendo os resultados da modelagem.

Para a simulação, foram criados dois cenários de previsão futura, respeitando os planos diretores vigentes em Natal, Macaíba e Parnamirim, além da legislação municipal, estadual e federal.

Cenário 1: O primeiro cenário representa a situação atual da BHRP. Seu propósito é investigar por onde se dará o crescimento urbano nos próximos 20 anos (2014 e 2033).

Cenário 2: Há muitos núcleos urbanizados que fazem fronteira com a BHRP, mas que não estão encravados na área de estudo e que poderiam contribuir para o crescimento urbano (crescimento exógeno) da bacia do rio Pitimbu. Diante desta realidade, criou-se este segundo cenário, propondo verificar a influência holística no crescimento interno da BHRP.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Calibração

De posse dos arquivos de entrada, foram executados os procedimentos de calibração, seguindo as três fases requeridas pelo SLEUTH.

Métrica compare: A métrica compare apresentou em sua calibração final, o valor de 82%, que corresponde à correlação entre o número de células urbanas modeladas e existentes, o que demonstra que o modelo tende a simular a realidade.

Métrica population (r2): Para esse índice houve variação entre as três fases, (0,95; 0,83 e 0,96). Essa métrica compara a extensão urbana modelada com o desenvolvimento real e é sensível à alteração do coeficiente dispersion. O valor final de 0,95 demonstra uma estreita relação entre a calibração e a realidade.

Métrica edges (r2): Essa métrica oscilou um pouco. Isto ocorreu principalmente pela sensibilidade às mudanças do coeficiente spread. O valor 0,99 da métrica edges atesta que a calibragem é confiável perante os dados históricos.

Métrica clusters (r2): O índice clusters (r2) representa a quantidade (em pixels) de aglomerados urbanos modelados em comparação com o número real de aglomerados urbanos para os anos de controle. O índice 0,90 é uma representação de que há uma forte relação entre esses aglomerados urbanos.

Com os resultados obtidos nesta etapa de calibração do modelo, verificou-se que realmente há forte correlação entre o crescimento real e o simulado, dado que 82 % da modelagem refletem os dados históricos. Após a calibração, os coeficientes finais para a previsão de cenários futuros. Foram os seguintes utilizados

por calibração do modelo: Dispersion:67; Breed: 1; Spread: 13; Road Gravity: 7.

Para o coeficiente dispersão/difusão, o valor 67 se traduz em elevado crescimento espontâneo para os dois cenários da bacia hidrográfica do rio Pitimbu. O crescimento difuso e de novos centros não terá grande influência nesses cenários, dados que o valor de breed estagnou no patamar 1. Diferentemente do spread, com valor 99, acarretando um alto crescimento periférico a partir de centros urbanos, o parâmetro road gravity com valor igual a 7 é considerado pequeno e, portanto, com pouca influência das malhas viárias nas simulações. O papel do coeficiente slope é o de limitar o crescimento em áreas íngremes e esse parâmetro influencia todas as regras de crescimento. Entretanto, para valores baixos, como o calculado, há probabilidade relativamente alta de crescimento urbano.

Simulação de Cenários

A simulações foram realizadas com o modelo calibrado, que permite produzir cenários futuros para a BHRP. Dois cenários foram considerados. No primeiro, procurou-se compreender o comportamento urbano para os anos 2014, 2023 e 2033. No segundo,

considerou-se a influência externa no crescimento interno da BHRP, sendo que as fronteiras da bacia foram ampliadas em 500 metros.

Cenário 1

Pela Figura 4, verifica-se para 2014 um crescimento urbano lento, esparsos e sem novos centros. Há, porém, desenvolvimento acelerado para o espontâneo e orgânico, sendo esse último com 51 pixels de crescimento.

Para 2023 (Figura 5), a expansão urbana se desenvolve em função do crescimento espontâneo e, principalmente, pelo orgânico, totalizando 741 pixels. Observou-se pelos valores de novos centros e rede viária que há pouco crescimento urbano envolvendo essas duas regras. Verifica-se a consolidação dos trechos nos locais “B” que correspondem aos bairros Parque do Jiqui e Parque das Nações em Parnamirim/RN. E em “E”, com mais intensidade nessas áreas adensadas.

Para o ano de 2033 (Figura 6), o cenário do crescimento se desencadeia como já vinha sendo “desenhado”. Essa expansão urbana envolveu os dois tipos de crescimento que mais se sobressaíram: o espontâneo e orgânico, com aproximadamente 1012 pixels gerados entre 2024 e 2033.

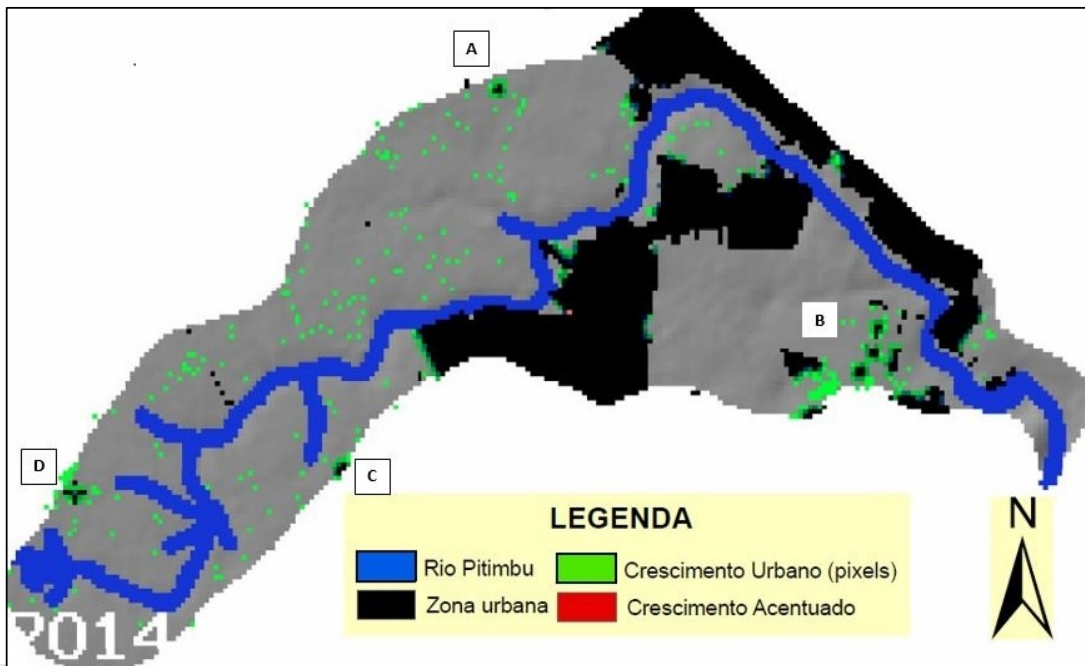


FIGURA 4 – Cenário 1: Crescimento urbano em 2014 na BHRP, RN

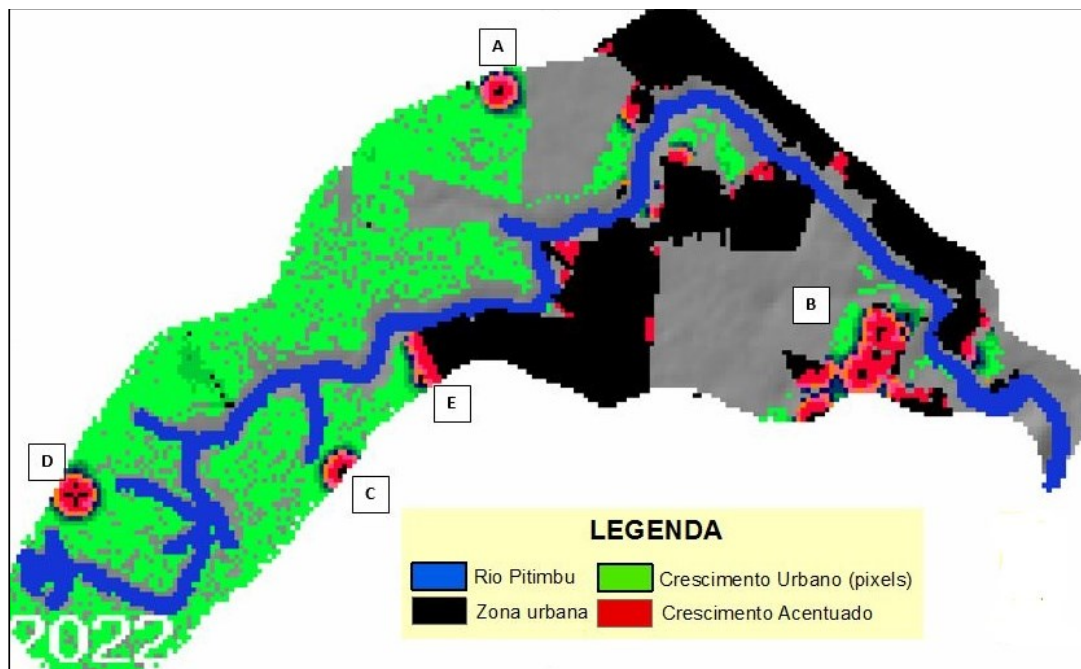


FIGURA 5 – Cenário 1: Crescimento urbano previsto para 2022 na BHRP, RN

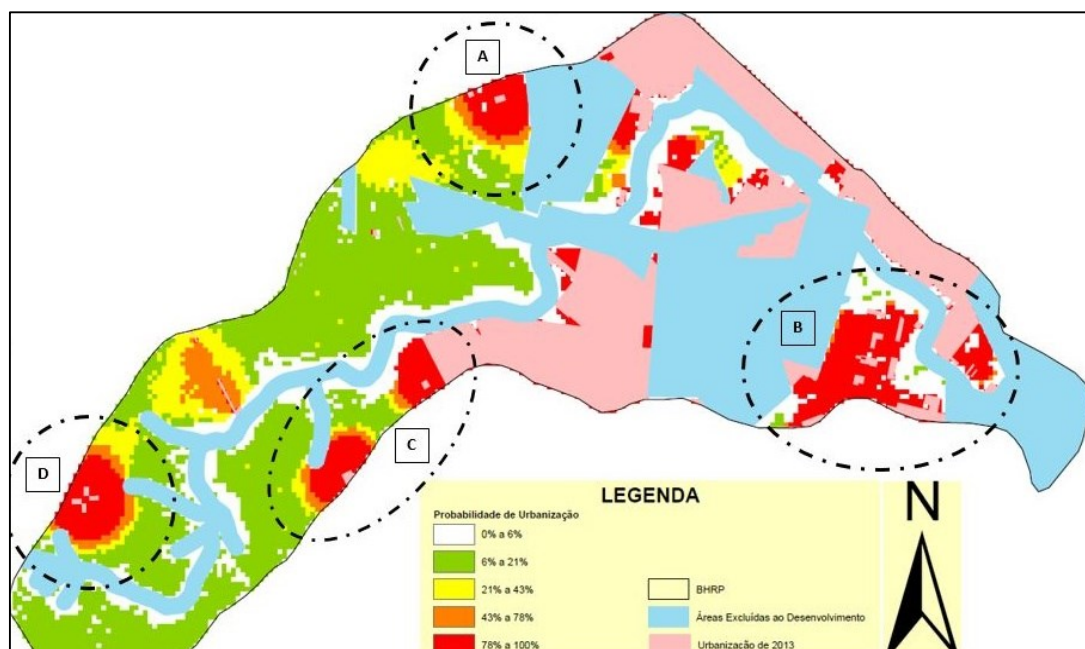


FIGURA 6 – Cenário 1: Crescimento urbano previsto em 2033 na BHRP

Ademais, observa-se que nas áreas selecionadas das Figuras 5 e 6, existem aglomerados urbanos, confirmando a tendência de adensamento observada em relação aos resultados da modelagem.

O crescimento urbano entre 2014 e 2023 foi de aproximadamente 28,9% (756 pixels), enquanto que entre 2024 e 2033 essa taxa subiu para 30,3% (1023 pixels).

A expansão urbana total superou os 68% com

1779 pixels ou 1779 hectares (célula de 100x100). Entre os anos 2014 e 2023 a taxa de crescimento anual se acentuou até chegar a 2,70%. A partir desse ano houve retração do crescimento, com tendência de queda, possivelmente pela diminuição espacial disponível na região, além da elevação de custos. A taxa média anual de crescimento ficou em torno de 2,68%.

A Tabela 1 sintetiza o resultado do crescimento urbano para os 20 anos simulados.

TABELA 1
Novos pixels gerados por tipo de crescimento

Período	Crescimento				No. de novos pixels
	Espontâneo	Novos centros	Orgânico	Rede viária	
2014	14	0	51	2	67
2015-2023	128	3	613	12	755
2024-2033	128	3	884	8	1023

Cenário 2

Neste cenário, a expansão urbana se deu em sua grande maioria através do crescimento orgânico precedido pelo espontâneo.

Ao visualizar a Figura 7, percebe-se detalhes considerados importantes do estudo, a partir do crescimento orgânico que se desenvolveu de fora para dentro na fronteira da BHRP. Houve expansão urbana no ponto (B), fazendo com que os dois núcleos se fundissem numa só mancha. Essa ação também afeta o crescimento urbano interno da bacia. Foram verificados três núcleos a partir de aglomerados urbanos. Um dos núcleos se desenvolveu no sentido da bacia hidrográfica do rio Pitimbu, corroborando o crescimento interno da área. É importante ressaltar que nos pontos assinalados, a probabilidade de crescimento urbano é superior a 85%.

Para este cenário, o crescimento urbano foi de aproximadamente 93%, com 3372 pixels (3372 hectares) urbanizados entre os anos de 2014 e 2033.

A taxa de crescimento para esse cenário começou em 3,85% com tendência de queda para 2,90% em 2033. Esse resultado denota certa acomodação do crescimento urbano para o período. A taxa média anual foi de 3,43%.

A Tabela 2 sintetiza o resultado do crescimento urbano para os 20 anos considerando pressões externas à área da BHRP no sentido de incrementar o uso e a ocupação do solo.

Evidentemente, fatores sociais e econômicos podem sofrer modificações atípicas não observadas nos registros históricos e, portanto, os resultados devem considerar com prudência os valores obtidos. Entretanto, o aprimoramento do modelo pode considerar componentes estocásticas que considerem esses fatores mencionados.

Detalhes sobre valores detalhados obtidos pelas simulações assim como de parâmetros levantados e utilizados podem ser encontrados em Venâncio (2014).

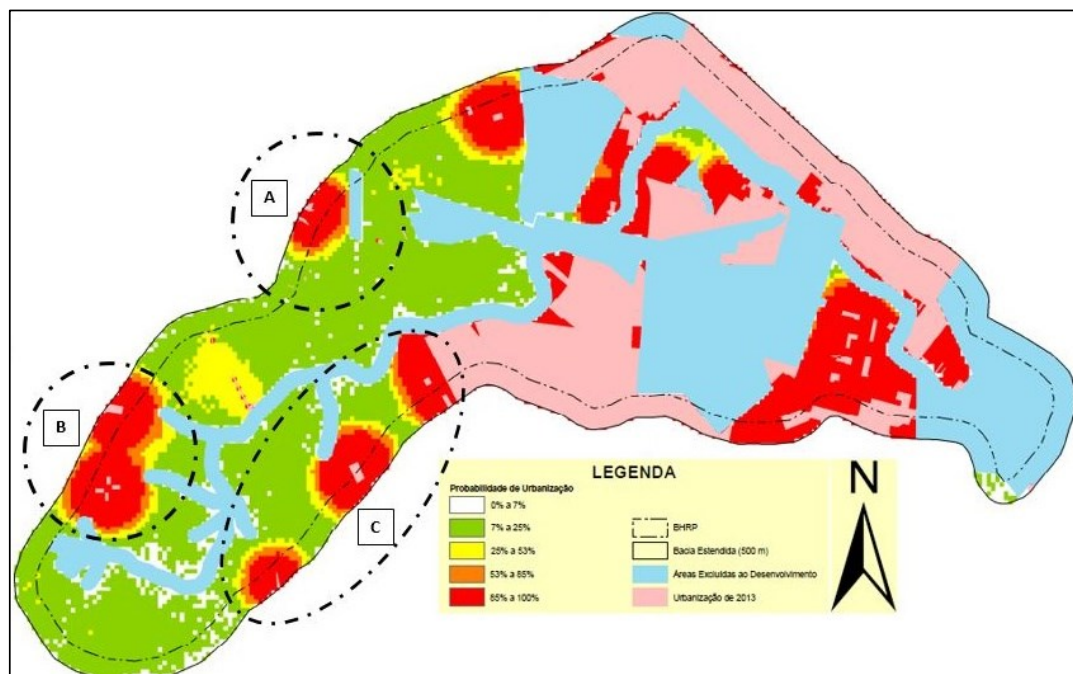


FIGURA 7 – Cenário 2: Crescimento urbano previsto em 2033 na BHRP

TABELA 2
Novos pixels gerados por tipo de crescimento

Período	Crescimento				No. de novos pixels
	Espontâneo	Novos centros	Orgânico	Rede viária	
2014	21	0	116	2	139
2015-2023	178	3	1298	16	1495
2024-2033	166	3	1699	8	1877

Discussão dos cenários e impactos

Os dois cenários apresentaram resultados bastante parecidos. O crescimento orgânico foi o que mais contribuiu para a expansão urbana, em seguida, o espontâneo. Os novos centros e a influência das redes de transportes não obtiveram os mesmos desempenhos.

Em consequência da expansão urbana, a bacia hidrográfica do rio Pitimbu apresentou possíveis pontos críticos. Para essas áreas configuram-se que a probabilidade de se desenvolver é superior a 70%.

Entretanto, a bacia do rio Pitimbu carece de alguns cuidados, devido sua importância para a região. Abaixo são destacadas algumas observações em relação aos resultados dos cenários.

a). Observou-se um crescimento próximo à nascente do rio como, também, nas vizinhanças da lagoa do Jiqui formando grandes aglomerados urbanos.

b). A ocupação dessas regiões deve ser administrada com planejamento, no sentido de se considerar as características e vulnerabilidades das áreas, sobretudo, para garantir o abastecimento de água à população. Em décadas passadas entendia-se a bacia como autossuficiente em ofertar água potável; hoje grande parte da bacia está comprometida pela baixa qualidade das águas superficiais e subterrâneas. A priorização de esgotamento sanitário nas áreas mais adensadas e planejamento e realocação de poços de exploração são fundamentais para manter a vitalidade socioeconômica da BHRP.

c). O uso e a ocupação do solo atual têm potencial de intensificar o processo erosivo e de rejeitos, carreando sedimentos e contaminantes para a calha do rio. Em consequência disso, as águas superficiais poderão ser contaminadas com partículas poluidoras, comprometendo assim a quantidade e a qualidade da água superficial.

d). O processo de adensamento urbano e sem infraestrutura sanitária adequada, trarão reflexos importantes sobre a disponibilidade hídrica, seja em quantidade como na qualidade dos recursos hídricos. Atualmente, verifica-se em áreas adensadas a deterioração da qualidade da água subterrânea por nitrato e em trechos do rio Pitimbu, assoreamentos e depósitos de resíduos sólidos incompatíveis com o nível de qualidade ambiental da bacia.

Até a década de 1980, a BHRP era rural, com disponibilidade hídrica e manancial prioritário para a cidade de Natal e Parnamirim, tanto pela abundância quanto pela qualidade de suas águas, superficial e subterrânea.

Já na década de 1980, a bacia foi sendo urbanizada e a potabilidade dessas águas aos poucos foi se deteriorando, principalmente por se concluir naquela ocasião que o aquífero Dunas-Barreiras não sofreria contaminação pelo sistema residencial de fossas e sumidouros adotado como esgotamento sanitário, (RIGHETTO; ROCHA, 2005).

Somente a partir da virada do século concluiu-se que íons de nitrato vinham se acumulando nas águas subterrâneas, com elevação da concentração acima do máximo permitido de 10mgN. Assim, A BHRP passou a restringir o Nitrato na água de abasteci-

mento; no entanto, com tendência de aumentarem progressivamente, levando à paralização de poços de exploração em regiões de adensamento populacional.

Além do aspecto de qualidade, tem-se problemas de quantidade, uma vez que a recarga da bacia se dá dentro da própria BHRP. Atualmente, as explorações são teoricamente ilimitadas pela prática de retorno das águas servidas. No entanto, com o esgotamento sanitário a ser implementado na bacia, a disponibilidade hídrica será reduzida drasticamente, tanto pela redução das vazões de base do rio Pitimbu quanto pelo rebaixamento da potenciométrica do aquífero e, consequentemente, da capacidade de exploração do aquífero.

A modelagem do uso e ocupação da bacia, associada a outros modelos urbanísticos, de drenagem, de distribuição de água, de classificação por categorias profissionais pode se tornar um instrumento de grande valia para a gestão da BHRP tanto para a simulação de cenários quanto a de se desenvolver modelagem complexa de ocupação da bacia de usos múltiplos e de equipamentos estruturais

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo demonstraram a validade do uso dos Autômatos Celulares (AC) no planejamento urbano. Deste estudo, pode-se chegar às conclusões apresentadas a seguir.

Autômato Celular: É plenamente viável a utilização dos ACs para desenvolver planejamento urbano; pode-se entender a dinâmica do uso e ocupação do solo e compreender a sua evolução por meio da história urbana para simular cenários futuros. É suficientemente robusto para incorporar múltiplos fatores que influenciam o desenvolvimento urbano, inclusive os de alta incerteza como os sociais e econômicos que podem acelerar ou congelar o crescimento de uma área urbana em função de políticas e da economia. A elaboração de um modelo próprio para uma bacia traria a vantagem de incorporar aspectos particulares relevantes, tais como o crescimento por categorias habitacionais, verticalização de edificações, facilidades introduzidas tais como loja, hipermercados, shopping, clínicas etc. São fatores que podem ser introduzidos com facilidade no algoritmo AC.

SLEUTH: A modelagem a partir do aplicativo SLEUTH é interessante e adequada para os estudos de

desenvolvimento urbano, encampando a multidisciplinaridade e interatividade de subsistemas e processos envolvidos na dinâmica da vida urbana. A evolução temporal e espacial do espaço urbano pode ser estimada para a tomada de decisão do planejamento urbano. A introdução de ferramentas de modelagem possibilita a discussão ampla da complexidade do espaço urbano, com decisões socioeconômicas e ambientais importantes tais como infraestrutura, atividades comerciais, urbanismo e paisagismo, segurança pública, serviços públicos e privados etc.

Com relação ao SLEUTH, este tem algumas limitações. A primeira é a incapacidade de envolver nos resultados as decisões políticas, como o zoneamento e fatores socioeconômicos. No entanto, abre perspectiva para a produção de aplicativos gerais, complexos e eficientes para planejar múltiplas atividades dentro de um espaço urbano. Este aplicativo pode ser utilizado através do seguinte site: (<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>).

Simulações: As simulações permitiram desenhar quadros da expansão urbana na BHRP, relacionando principalmente infraestrutura com o crescimento demográfico e, portanto, com o uso e ocupação do solo. Pela concepção do modelo utilizado, o SLEUTH, tão somente simula a ocupação de uma célula da bacia, baseando-se em informações de ocupação na vizinhança e tendências regionais de crescimento. Em bacias periurbanas como a BHRP, a ocupação de áreas livres é uma informação importante. Entretanto, o grau de ocupação, a verticalização das edificações e outros aspectos passam a ser mais importantes em regiões ocupadas e, neste caso, algoritmos baseados em autômatos celulares podem ser desenvolvidos para considerar variações no uso e ocupação do espaço físico.

Nesse aspecto, a alternativa 0 (célula não ocupada) ou 1 (célula ocupada) pode ser modificada em um número maior de alternativas de forma a permitir simulações mais complexas do espaço físico. Nessa abordagem, aspectos ambientais, sanitários e outros podem ser investigados.

Como relação aos resultados principais das simulações realizadas com o SLEUTH, destacam-se:

a) O crescimento urbano mais significativo apresentado pelas simulações foi o orgânico, que se expandiu a partir de centros ocupacionais existentes. Os resultados das simulações dos dois cenários analisados convergiram para esse tipo de crescimento.

b) O crescimento espontâneo ocorreu ao longo da Bacia, porém a probabilidade efetiva de urbanização não ultrapassou 21%.

c) Para o período entre 2014 e 2033, verificou-se um crescimento de 68%, o que corresponde a uma área de expansão urbana em torno de 1.778 hectares.

d) Pela a simulação do cenário 1, em 2033 a área da nascente do rio Pitimbu e nas proximidades da lagoa do Jiqui teM probabilidade de crescimento acima dos 78%.

e) O cenário 2 simulou a tendência do crescimento exógeno (de fora para dentro) ao longo da Bacia e se constatou a existência de interferências externas importantes dentro dessa área.

Vale ressaltar que o acoplamento de um modelo como o utilizado com modelagem das águas subterrâneas e superficiais, incluindo explorações, captações e distribuição pode propiciar um instrumento importante de gestão das águas de abastecimento da BHRP, com previsões confiáveis quanto às demandas espaço-temporais na bacia hidrográfica. Vislumbra-se a possibilidade da modelagem por AC ter potencial para ser utilizada em estudos das águas subterrâneas envolvendo recargas e contaminação do aquífero, como também aspectos ambientais importantes para controlar o desenvolvimento urbano sustentável da BHRP.

Por ser o primeiro trabalho de modelagem do desenvolvimento urbano na BHRP utilizando o Autômato Celular como ferramenta de modelagem, espera-se que este estudo sirva de base para a criação e aprofundamento de novas investigações usando o AC, enriquecendo o acervo de pesquisas da bacia do rio Pitimbu.

Referências

ALVES R. S.; MELO J. G.; SILVA C.T. X. L.; OLIVEIRA C. C. C. Recursos Hídricos Subterrâneos da Região de Parnamirim, RN: Uso das Águas e Potencialidades. *Águas Subterrâneas* v.30, n.1, p. 37-52, 2016.

- BATTY M., Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American Planning Association*, v. 63, n. 2, p. 266-274, 1997.
- BIHAMTA N.; SOFFIANIAN A.; FAKHERAN S.; GHOLAMALIFARD M.. Using the SLEUTH Urban Growth Model to Simulate Future Urban Expansion of the Isfahan Metropolitan Area, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 43, n. 2, p. 407-414, 2015.
- BORGES, A. N. Implicações Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (RN) Decorrentes das Diversas Formas de Uso e Ocupação do Solo. 2002. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2002.
- CABRAL, N. M. T.; RIGHETTO, A. M.; QUEIROZ, M. A. Comportamento do nitrato em poços do aquífero Dunas/Barreiras em Natal/RN. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v 14, n 3, p. 299-306, 2009.
- CASTRO, M. L. A.; CASTRO, R. O. Autômatos celulares: implementações de von Neumann, Conway e Wolfram. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia* v. 3, n, 3, p. 89-106, 2008.
- CHAUDHURI G.; CLARKE K. C. The SLEUTH and Use Change Model: A Review. *The International Journal of Environmental Resources Research*, v. 1, n.. 1, p. 88-104, 2013.
- CLARKE, K. C., GAYDOS, L., and HOPPEN, S., A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B* v. 24, p. 247-261, 1997.
- CLARKE, K. C.; GAZULIS, N.; DIETZEL, C. K.; GOLDSTEIN, N. C. A decade of SLEUTHing: Lessons learned from applications of a cellular automation land use change model. *International Journal of Geographical Information Systems and Science*. n. 12, p. 413-425, 2007.
- CLARKE, K. C.; GAYDOS, L. J., Loose coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 12 n. 7, 699-714, 1998.
- CLARKE, K. C.; DIETZEL, C.; GOLDSTEIN, N. C. A., Decade of Cellular Urban Modeling with SLEUTH. *Unresolved Issues and Problems*, Ch. 3 in *Planning Support Systems for Cities and Regions* (Ed. Brail, R. K., Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, MA, Ch. 3, p. 47-60, 2008.
- COSTA, J. P. O. H. Criação de cenários de expansão urbana com recurso a autômatos celulares no apoio ao planeamento e gestão territorial: Cabeceiras de Basto (Norte de Portugal). 126p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Faculdade de Letras da Universidade do Porto. Departamento de Geografia. Porto, 2010.
- COSTA, S. M. D. Alteração da cobertura vegetal natural da microbacia do rio Pitimbu – RN devido à ocupação antrópica. Relatório final de pesquisa – Conselho Nacional de desenvolvimento científico e tecnológico –Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 1995
- FURTADO, B. A.; DELDEN, H., Modelagem urbana e regional com autômatos celulares e agentes: panorama teórico, aplicações e política pública. Brasília: IPEA. 42 p. Texto para Discussão / IPEA, n 1576, 2011.
- GRIGIO, A. M. Evolução da paisagem do baixo curso do Rio Piranhas-ASSU 1988-2024: uso de autômatos celulares em modelo dinâmico espacial para simulação de cenários futuros. Natal, RN, 2008, 214 p. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra. UFRN, 2008.
- JANTZ, C. A.; GOETZ, S. J.; SHELLEY, M. K. Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore/Washington metropolitan area. *Environment and Planning B* v.31, p.251–71, 2003.
- JANTZ, C. A. C.; GOETZ, S. J.; DONATO, D.; CLAGGETT, P. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, v.34, p. 1-16, 2010.
- KOBAYASHI, R. T. Estudo dos aspectos qualitativos e quantitativos da água e do sedimento no baixo curso do Rio Pitimbu RN. Dissertação (Mestrado) – UFRN, Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, 2009.
- MELO, J. G. de. Impacto do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal/ RN. 1995. 196p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- MIRANDA, E. E. Brasil em Relevô. Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 27 abril. 2013.
- OLIVEIRA, F. G. Autodepuração e monitoramento do rio Pitimbu/RN. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, (UFRN), Natal/RN 1994.
- PERES, O. M.; POLIDORI, M. C. Modelos Urbanos baseados em Autômatos Celulares: integrando ambiente natural e o crescimento urbano. In: *Anais do WCAMA - I Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais*, Bento Gonçalves, RS 2009.
- RIGHETTO A. M.; DIAS D. F., Balanço Hídrico do Sistema Aquífero Barreiras Na Bacia Hidrográfica Do Rio Pitimbu-RN. *Revista de Águas Subterrâneas*, ABAS (submetido) 14 p. 2016.

- RIGHETTO, A. M.; ROCHA, M. A. Exploração Sustentada do Aquífero Dunas/Barreiras na Cidade de Natal/RN. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos v. 10, n. 2, p. 27-38, 2005.
- ROCHA, S. C.S.; ALIPAZ S., Manual Ambiental, Obras de Saneamento: Construção, Brasília: Caesb, 2010
- SANTOS, A. C. V. Influência da expansão urbana na paisagem da sub-bacia do rio Pitimbu entre Natal e Pamamirim/RN. 83p. 1999. Monografia (Especialização em Geografia) – UFRN. 1999.
- SECRETARIA DE ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS – SERHID/RN. Plano de Gestão Integrado da Bacia do Rio Pitimbu. Projeto Pró-água/Semiárido. SDP Nº 005/2003. VBA-TECNOSOLO. 2005.
- SENA, D. S. Avaliação da qualidade da água do Rio Pitimbu-RN. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil, (UFRN), Natal, 2008.
- SILVA, E. A.; CLARKE, K. C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. Computer, Environment and Urban Systems, v. 26, n. 6, p.525-552, 2002.
- SILVA, E. A. Cenários da expansão urbana na área Metropolitana de Lisboa. Revista de Estudos Regionais – Região Lisboa e Vale do Tejo, n.5, p. 23 – 41, 2002.
- VENÂNCIO, S. R. Avaliação do Crescimento de ocupação da Bacia do Rio Pitimbu como Subsídios para Estudos de Possíveis Impactos Sobre os Recursos Hídricos, 121p. 2014 Dissertação Mestrado em Engenharia Sanitária, UFRN, 2014.
- WOLFRAM, S. Cellular Automata as models of complexity. Reprinted from Nature v. 311, n.. 5985, p. 419-424, 1984.

Antonio Marozzi Righetto

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. Email: righetto@ct.ufrn.br

Contribuição do autor:

Concepção inicial da pesquisa, definição do modelo conceitual, variáveis relevantes, análise de resultados e produção do artigo.

Salatiel da Rocha Venâncio

Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, email: salatielvenancio@hotmail.com

Contribuição do autor:

Levantamento de dados, implantação e simulação do modelo, obtenção de resultados da modelagem, análise de resultados.