

Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras – Araras, SP.

Environmental Fragility and water scarcity in catchment basins: Headwaters of Araras River – Araras, SP

**Carlos Wilmer Costa, Fabiola Geovanna Piga, Mayra Cristina Prado de Moraes,
Mariana Dorici, Evandro de Castro Sanguinetto, José Augusto de Lollo, Luiz Eduardo Moschini,
Reinaldo Lorandi e Leandro José Oliveira**

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

carloswilmercosta@gmail.com, na_moraesrp@hotmail.com, evandro@gaiaterranova.com.br; fabipiga@gmail.com,
marianadorici@gmail.com, leandropolmil@gmail.com; lolloja@dec.feis.unesp.br; lemoschini@ufscar.br, dvlorandir@ufscar.br

Recebido: 30/06/15 - Revisado: 07/08/15 - Aceito: 21/08/15

RESUMO

Estudos envolvendo bacias hidrográficas raramente abordam os impactos gerados pelas atividades humanas em bacias utilizadas como mananciais de abastecimento. As ações humanas relacionadas à urbanização, industrialização e agropecuária, sem o planejamento adequado, são as que mais comprometem os serviços ambientais em tais bacias. No município de Araras (SP), assim como ocorrem para todo o Estado de São Paulo, foi constatada importante escassez hídrica no ano de 2014 com a redução das principais fontes de captação superficiais. A área estudada abrange 352,77 km², está delimitada pelas coordenadas geográficas 47°29'2,4" W; 22°13'52,7" S e 47°12'32,4" W; 22°26'42" S e pertence à UGRHI do Rio Mogi Guaçu - Alto Mogi. O presente trabalho analisou a fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio das Araras (BHRA), no intervalo de 15 anos (1999 - 2014), envolvendo cinco classes de fragilidade (Muito Fraca, Fraca, Média, Forte e Muito Forte) e sua relação com o cenário de escassez hídrica. As parcelas dessa bacia, que apresentaram fragilidade Forte e Muito Forte, e que tem como principal uso o plantio de cana de açúcar, correspondem às áreas de nascentes dos principais mananciais superficiais de abastecimento. Tal situação tem contribuído para a redução da disponibilidade hídrica, como consequência da combinação entre os atributos do meio físico e as atividades humanas.

Palavras Chave: Recursos hídricos. Planejamento territorial. Bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. Formas de relevo. Geoprocessamento.

ABSTRACT

Studies of river basins rarely address the impacts of human activities in basins used for water supply. Human activities involving urbanization, industrialization and agriculture, without proper planning, are those that most compromise the environmental services in these basins. In the municipality of Araras (SP), as well as throughout the state of São Paulo, there was major water scarcity in 2014 due to the reduction of the main surface water sources. The study area covers 352.77 km², and its geographical coordinates are 47°29'2,4" W; 22°13'52,7" S and 47°12'32,4" W; 22°26'42" S, and it belongs to the Mogi Guaçu River Water Resources Management Unit (UGRHI) - Alto Mogi. This study analyzed the environmental fragility in the Araras River Catchment Basin (BHRA), for a 15-year period (1999 - 2014). Environmental fragility was classified according to five ratings (Very Low, Low, Medium, High and Very High) and its relation to the water scarcity scenario. The areas of this basin, which showed high and very high environmental fragility, and which are mainly used for sugarcane cultivation, correspond to the headwater areas of the main surface water supply sources. This situation has contributed to the reduction of water availability resulting from the combination of the physical environment attributes and human activities.

Keywords: Water resources. territorial planning. Catchment basin of the Mogi Guaçu River. Relief forms. Geoprocessing.

INTRODUÇÃO

As economias do mundo são baseadas nos produtos e serviços derivados dos ecossistemas, tais como alimentos, energia, recursos minerais, regulação do clima e água (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005). Por muito tempo, tanto nos países ricos como nos pobres, as prioridades de desenvolvimento têm-se centrado sobre o quanto a humanidade pode usufruir dos recursos naturais (RAVENGA, 2005), porém muito pouca atenção tem sido dada ao impacto de tais ações.

Esta visão tradicional nos levou a um declínio do estado do ecossistema (VITOUSEK et al., 1997; RAPPORT; MAFFI, 2010), e principalmente, em termos de escassez de água (SCHEWE et al., 2014). Como agravante, estima-se que em 2050 a demanda global por água aumentará em 55% evidenciando um acirramento entre a produção de alimentos, geração de energia e abastecimento urbano. Com relação às águas subterrâneas, globalmente estima-se que 20% dos aquíferos são sobre-explorados (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME – WWAP, 2015).

Aliada à deterioração generalizada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, os solos também se mostram degradados dos pontos de vista físico, químico e biológico. Segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (2011) em todo o mundo nenhuma região está imune. Globalmente, 25% dos solos estão altamente degradados, 8% moderadamente degradados e 36% levemente degradados.

Estudos envolvendo bacias hidrográficas como unidades de planejamento têm crescido nas últimas décadas, porém, poucos trabalhos abordam os impactos gerados pelas atividades humanas em bacias que são utilizadas como mananciais de abastecimento. Segundo a Lei nº 9.866/1997, os mananciais representam as bacias hidrográficas de interesse regional para o abastecimento público (SÃO PAULO, 1997). Estas bacias desempenham importantes serviços ecossistêmicos (QIU; TURNER, 2013), principalmente na reservação de água (MONTES; RUIZ, 2008; MACHADO; DUPAS, 2013), sendo susceptíveis a ocupações inadequadas. Dentre as atividades humanas, a urbanização, a industrialização e a agropecuária, quando efetuadas sem planejamento integrado, são as que mais comprometem os serviços ambientais proporcionados por estas bacias.

O Estado de São Paulo experimentou no ano de 2014 um cenário até então atípico. A sua população viu os níveis de água dos principais rios e reservatórios diminuir drasticamente, levando os tomadores de decisão a adotarem medidas extremas como o racionamento compulsório. O município de Araras (SP) vive semelhante problema com o esvaziamento das principais fontes de captação superficiais e a perda de resiliência, após um período de estiagem. Não obstante, São Paulo – SMA/CRH (2009) alertava que nesta região já eram utilizados acima de 50% da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, se consideradas as vazões superficiais mínimas de referência ($Q_{7,10}$) e a subterrânea explotável. Neste relatório, os dados apresentados para demanda foram levantados do banco de outorgas do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), ou seja, são os dados de vazão total outorgada.

Frente a esta situação hidrológica e de uso do solo

desfavorável, um dos principais desafios enfrentados por administradores públicos, comunidade científica e população é a manutenção da quantidade e qualidade da água disponível para o uso e consumo. De acordo Kawakubo et al. (2005), o mapa de fragilidade ambiental constitui uma das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial, permitindo avaliar as potencialidades e vulnerabilidades do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando suas características naturais.

Desta forma, em bacias hidrográficas que são utilizadas como mananciais de abastecimento, o mapeamento da fragilidade ambiental torna-se uma importante ferramenta para tomada de decisão em termos de ocupação e de problemas ambientais.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo verificar a dinâmica do grau de fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio das Araras (BHRA), no intervalo de 15 anos (1999 - 2014) e quanto o índice de fragilidade, associado ao entendimento da interrelação entre os demais atributos do meio físico e antrópico, pode explicar o atual cenário de escassez hídrica.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A BHRA possui uma área 352,77 km² e localiza-se integralmente no município de Araras (SP). Tal bacia enquadra-se na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (UGRH) do Rio Mogi Guaçu - Alto Mogi e dista aproximadamente 155 km da capital do Estado. O município de Araras faz divisa com os municípios de Leme, Conchal, Cordeirópolis, Rio Claro, Engenheiro Coelho, Santa Gertrudes, Limeira e Mogi Guaçu. (Figura 1).

Segundo o último levantamento demográfico do IBGE realizado em 2010, Araras possui um total de 118.843 habitantes, em sua maioria residentes em área urbana (112.444 habitantes). Entre os anos de 2000 e 2010 houve um aumento de 1,25% da população rural e aproximadamente 15% da população urbana. Estima-se que a população total em 2014 corresponderia a 127.661 habitantes (IBGE, 2015).

A economia baseia-se na área de Serviços contribuindo com 76% do PIB do município seguido da Indústria (21%) e Agropecuária (3%) (IBGE, 2015).

De acordo com a classificação dada por Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o tipo climático da região é Clima tropical do Brasil central sem seca. As chuvas ocorrem mais frequentemente no verão, porém a área apresenta clima úmido o ano todo. Os meses mais chuvosos estão entre outubro e março, destacando-se o período de dezembro a março com pluviosidade anual média de 1450 mm.

A BHRA tem sua formação florestal composta por dois hotspots globais: a Mata Atlântica e o Cerrado, com predomínio da formação atlântica da Floresta Estacional Semidecidual (SÃO PAULO, 2009).

No caso da Geomorfologia, em escala continental, a região está inserida no Domínio Morfoclimático Tropical, com savanas ou cerrados (AB'SÁBER, 2003). Regionalmente, a BHRA está situada na Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar

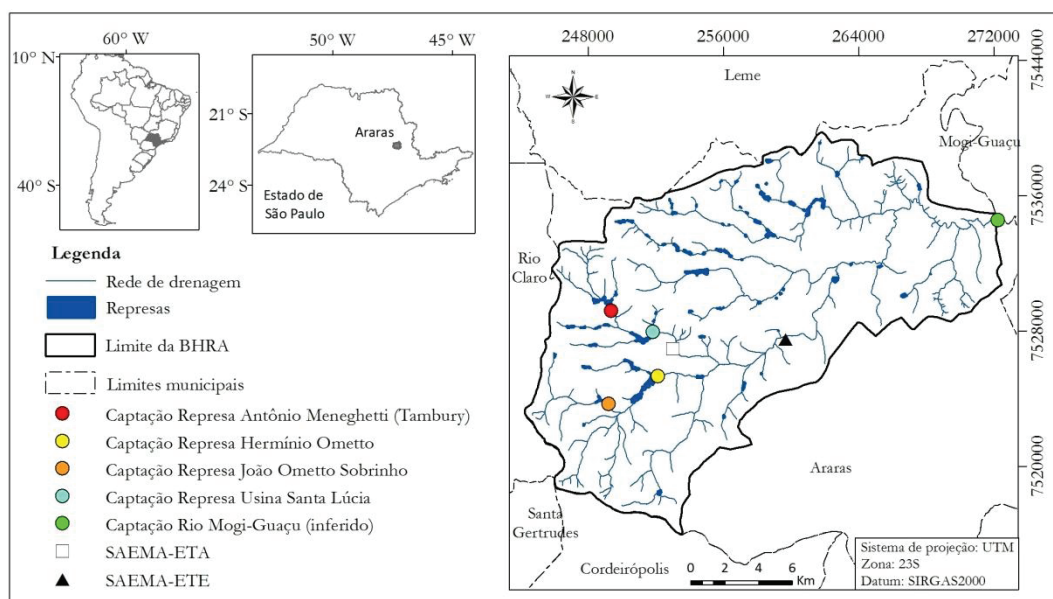


Figura 1 - Área de estudo com as captações de água superficial da BHRA

do Paraná, Unidade Morfoescultural da Depressão Periférica Paulista – Depressão Mogi-Guaçu. As formas do relevo, que constituem o modelado dominante são o resultado do processo denudacional, formando colinas com topos amplos e topos tabulares. O grau de entalhamento dos vales médio é “Muito Fraco” (< 20m) e a dimensão interfluvial média é “Grande” (de 1750 a 3750m). A altimetria varia de 584 a 785m, com declividades predominantes de 10 a 20% (ROSS; MOROZ, 1997).

Tendo por base os trabalhos de Brollo (1991), Lollo (1991) e Aguiar (1995), caracterizou-se a geologia da bacia. Hora descreve-se brevemente os Grupos Tubarão, Passa Dois e São Bento, encimados por coberturas quaternárias indiferenciadas.

Grupo Tubarão – formado pelas formações Itararé e Tatuí, apresenta idade entre o Carbonífero Superior e o Permiano Médio (359 a 245 Ma), com deposição glacial continental em ambiente predominantemente terrestre com ingressões marinhas e apresentam as seguintes características:

Formação Itararé – (119,44km²) apresenta complexa associação litológica, composta por siltitos, siltitos argilosos, argilitos, argilitos siltosos, arenitos finos a muito finos, arenitos micáceos e migmatitos;

Formação Tatuí – (46,50km²) constituída por siltitos arenosos, siltitos argilosos, arenitos siltosos, argilitos e argilitos siltosos.

Grupo Passa Dois – formado no Permiano Superior (~299 Ma), sendo composto por:

Formação Irati – (16,16km²) possui em sua composição argilitos, siltitos, siltitos arenosos, siltitos argilosos e argilitos siltosos, com calcário silicificado e calcário dolomítico em sua porção superior.

Formação Corumbataí – (73,10km²) composta por argilitos, argilitos siltosos, siltitos argilosos, siltitos arenosos e arenitos finos a muito finos.

Grupo São Bento – rochas do Mesozóico (245 a 65,5 Ma), sedimentares ou ígneas intrusivas e extrusivas basálticas da Bacia do Paraná.

Formação Pirambóia – (16,73km²) aflora a sudoeste da bacia, nessa formação estão as nascentes do ribeirão das Furnas que, ao juntar-se ao ribeirão das Araras formam o rio das Araras. Predominam argilitos, folhelhos arenosos, siltitos, argilitos siltosos

Formação Serra Geral – (74,58km²) de ocorrência mais distribuída na bacia, a Formação Serra Geral apresenta áreas mais significativas ao sul e norte da mesma.

Coberturas Indiferenciadas do Cenozóico – (6,26km²) sedimentos continentais, marinhos ou ambos, transportados ou não, oriundos de intemperismo físico e/ou químico de origem recente, do Quaternário (1,8 Ma). Distribuídos ao longo de fundos de vale nas porções norte e sudoeste da bacia, são formados por areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas, aluvião argiloso e aluvião arenoso.

A ocorrência de solos, com base no mapeamento efetuado por São Paulo - IAC (1981) e atualizadas a partir das informações disponibilizadas por IBGE (2007), são espacializadas na área em sub-ordens: ARGISSOLOS VERMELHOS (Terra Roxa Estruturada, eutrófica ou distrófica de textura argilosa – 4km²), ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS (Podzólico Vermelho Amarelo de textura arenosa/média, argilosa ou média argilosa, média/muito argilosa – 54,06km²), GLEISSOLOS HÁPLICOS (Hidromórfico de textura indiscriminada – 6,26km²), LATOSSOLOS VERMELHOS (Latossoilo Vermelho-Escuro de textura argilosa, Latossoilo Roxo eutrófico ou distrófico, de textura muito argilosa ou argilosa – 206,68km²), LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS (Latossoilo Vermelho-Amarelo, álico de textura média ou argilosa – 69,71km²), NEOSSOLOS LITÓLICOS (Solos litólicos eutróficos, de textura argilosa e indiscriminada – 4,23km²). Cabe ressaltar que, na época da elaboração do mapa, 6,83km² foram classificados como área urbanizada e 1km² como represas e lagoas.

A rede hidrográfica possui padrão de drenagem den- drítica (CHRISTOFOLETTI, 1974) e cursos d’água de até 5ª ordem, segundo método de Strahler (1952). O ribeirão das

Araras tem suas nascentes a noroeste (Formação Corumbataí), enquanto o ribeirão das Furnas apresenta nascentes a sudoeste da área urbana do município (Formação Pirambóia), onde se encontram para formar o rio das Araras que, atravessando a Formação Itararé, corre em sentido nordeste, cambiando para leste em sua porção final quando deságua no rio Mogi-Guaçu.

O município de Araras capta 936 L/s de água de mananciais superficiais e subterrâneos, com perdas na distribuição entre 40% e 60% (SÃO PAULO. SSRH-CSAN, 2014). As Represas João Ometto Sobrinho e Hermínio Ometto, localizadas respectivamente no Córrego Água Boa e Ribeirão das Furnas, são responsáveis por 50% do abastecimento da cidade. O rio Ribeirão das Araras, onde estão localizadas as Represas Antônio Meneghetti e Usina Santa Lúcia, é responsável pelo fornecimento de 20% da água, outros 30% são provenientes do Rio Mogi-Guaçu, cuja captação localiza-se fora da BHRA (ARARAS, 2014). Cabe ressaltar que todos os mananciais de superfície, enquadrados na Classe 2 (Resolução CONAMA n.º 357/05, Art. 4º), não contam com mecanismos de proteção quanto a contaminações difusas ou por acidentes (ARARAS. SAEMA, 2005).

Em se tratando da exploração de água subterrânea, de acordo com a Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais (CPRM), existem 63 poços em operação no município, os usos predominantes são para o setor industrial, comercial e agrícola (CPRM, 2015).

MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da fragilidade se deu com base na metodologia proposta por Ross (1994, 2012), oriunda das unidades ecodinâmicas de Tricart (1977). Tal metodologia considera o equilíbrio dinâmico das paisagens de acordo com os componentes físicos, bióticos e abióticos de cada ambiente. Os procedimentos para esta avaliação incluem os estudos interdependentes da geologia, pedologia, geomorfologia, declividade, pluviosidade e uso e cobertura do solo (Figura 2).

Neste caso foram considerados aspectos específicos tais como a heterogeneidade, o grau de consolidação e tipo de litologia dos materiais geológicos, as características texturais das classes pedológicas, as formas das encostas e o grau de inclinação dos terrenos, índices de chuva e interferências humanas em função dos diferentes tipos de usos da terra.

Figura 2 - Fluxograma do método utilizado para a análise de fragilidade ambiental

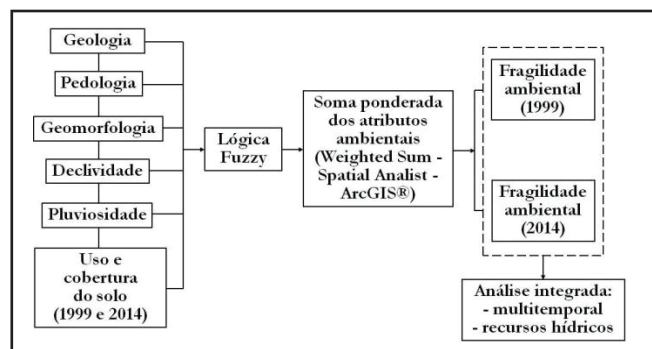


Tabela 1 - Atributos ambientais utilizados para as análises

| Material | Descrição | Fonte | Escala |
|--------------------------------|---|---|------------|
| Hidrografia | Rede hidrográfica atualizada | Cartas Topográficas (IBGE, 1971) Imagem LANDSAT 8 de 2014 | |
| Altimetria | Curvas de Nível, Declividade, Classes Hipsométricas | Cartas Topográficas (IBGE, 1971): Araras - SF-23-Y-A-II-3 Conchal - SF-23-Y-A-II-4 Leme - SF-23-Y-A-II-1 | 1:50.000 |
| Geomorfologia | Formas de Terreno | INPE (2015) Valeriano (2008) | |
| Substrato Rochoso | Mapas do Substrato Rochoso | Araras - Brollo (1991) Leme - Lollo (1991) Conchal – Aguiar (1995) | |
| Pedologia | Tipos de Solo | Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo (IAC, 1981): Folha de Araras - SF-23-Y-A-II | 1:100.000* |
| Clima | Pluviosidade | INMET (2015) | - |
| Uso e Cobertura do solo - 1999 | Classes de Usos | Imagem LandSat 7, órbita/ponto 220/75 de 12/10/1999. Composição colorida – bandas: 6, 5 e 4 com fusão com a pancromática (Pixel 15m) | - |
| Uso e Cobertura do solo 2014 | Classes de Usos | Imagem LandSat 8, órbita/ponto 220/75 de 16/12/2014. Composição colorida – bandas: 6, 5 e 4 com fusão com a pancromática (Pixel 15m) | - |

*Embora impresso na escala de 1:100.000, a base geográfica utilizada para elaboração do mapa pedológico foi a escala 1:50.000 (IAC, 1981), sendo portanto, compatível com a escala adotada neste trabalho



Figura 3 - Planos de informação dos atributos do meio físico, biótico e abiótico

Para o presente trabalho, os atributos ambientais ou planos de informação (Tabela 1 e Figura 3) foram georreferenciados, reescalados e manipulados no software ArcGIS® 10.2 (ESRI, 2013). Foi adotado o sistema geodésico de referência SIRGAS2000 (IBGE, 2005), projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e Zona 23S.

Os ecossistemas não possuem limites estáticos, portanto para a análise ambiental, são necessárias técnicas que representam de maneira mais complexa os fenômenos naturais.

Neste estudo foi utilizada a análise multicritério aliada ao modelo da lógica Fuzzy. Essa análise integrada foi baseada no conhecimento e discussão entre os especialistas envolvidos e análise estatística (EASTMAN, 2006).

A introdução deste método se mostrou adequada para lidar com conceitos subjetivos, representando gradual transição entre as ocorrências espaciais, por meio de decisões numéricas de superfície (CEREDA JUNIOR, 2011).

A determinação dos graus ou classes de fragilidade foram agrupadas em cinco categorias: Muito Fraca (1), Fraca (2), Média (3), Forte (4) e Muito Forte (5) (Tabelas 2 a 7). A classificação dos pesos apresentada nas tabelas de 4 a 7 foi estabelecida por ponderação hierarquizada de acordo com Ross (1994, 2012), enquanto que os pesos atribuídos às tabelas 2 e 3 são oriundos do conhecimento entre a equipe interdisciplinar.

Após essa etapa, foi aplicada aos atributos a lógica

fuzzy, de tipo linear [$y=f(x)$], com valores de zero a um, a fim de equalizá-los (CEREDA JUNIOR, 2011). Posteriormente foi realizada a soma dos atributos ambientais utilizando o módulo Weighted Sum do software ArcGIS®.

A análise integrada e multitemporal dessas variáveis permitiu um diagnóstico da paisagem que expressa os diferentes graus de sua fragilidade ambiental e na disponibilidade hídrica.

Tabela 2 - Pesos atribuídos às Formações geológicas

| Classes de Fragilidade | Formações Geológicas | Pesos | $Fu_{\lambda\lambda\lambda}^{xyz}$ |
|------------------------|--|-------|------------------------------------|
| Muito Fraca | Serra Geral | 1 | 0,0-0,2 |
| Fraca | Corumbataí, Irati, Itararé (matriz argilosa) | 2 | 0,2-0,4 |
| Média | Itararé (matriz arenosa) | 3 | 0,4-0,6 |
| Forte | Tatuí, Pirambóia | 4 | 0,6-0,8 |
| Muito Forte | Quaternário | 5 | 0,8-1,0 |

Tabela 3 - Pesos atribuídos às classes de geomorfologia

| Classes de Fragilidade | Formas de terreno | Pesos | $Fuzzy$ |
|------------------------|--|-------|---------|
| Muito Fraca | Convergente Côncava | 1 | 0,0-0,2 |
| Fraca | Planar Côncava, Divergente Côncava | 2 | 0,2-0,4 |
| Média | Planar Retilínea, Convergente Retilínea, Divergente Retilínea | 3 | 0,4-0,6 |
| Forte | Convergente Convexa, Planar Convexa | 4 | 0,6-0,8 |
| Muito Forte | Divergente Convexa | 5 | 0,8-1,0 |

Tabela 4 - Pesos atribuídos às classes pedológicas

| Classes de Fragilidade | Tipos de solo/textura | Pesos | $Fuzzy$ |
|------------------------|---|-------|---------|
| Muito Fraca | LATOSSOLO VERMELHO (Muito argilosa ou argilosa) | 1 | 0,0-0,2 |
| Fraca | LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (Argilosa), ARGISSOLO VERMELHO (Argilosa) | 2 | 0,2-0,4 |
| Média | ARGISSOLO VERMELHO AMARELO (Argilosa ou média/argilosa) | 3 | 0,4-0,6 |
| Forte | ARGISSOLO VERMELHO AMARELO (Arenosa/média), LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (Média) | 4 | 0,6-0,8 |
| Muito Forte | GLEISSOLO HÁPLICO, NEOSSOLO LÍTOLICO (Argilosa substrato basalto ou diabásico) | 5 | 0,8-1,0 |

Tabela 5 - Pesos atribuídos às classes pluviométricas*

| Classes de Fragilidade | Pluviosidade | Peso | $Fuzzy$ |
|------------------------|--|------|---------|
| Média | Situação com precipitação anual distribuída de forma desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno; no verão, com alta intensidade de chuvas de dezembro a março, com volumes 1300-1600mm/ano. | 3 | 0,4-0,6 |

* A proposta original para avaliação da fragilidade considerava a possibilidade de mapear grandes áreas, em diferentes domínios morfoclimáticos. Segundo os dados climáticos obtidos, a pluviosidade não varia na bacia

Tabela 6 - Pesos atribuídos às classes de declividade

| Classes de Fragilidade | Declividade (%) | Pesos | $Fuzzy$ |
|------------------------|-----------------|-------|---------|
| Muito Fraca | Até 6 | 1 | 0,0-0,2 |
| Fraca | De 6 a 12 | 2 | 0,2-0,4 |
| Média | De 12 a 20 | 3 | 0,4-0,6 |
| Forte | De 20 a 30 | 4 | 0,6-0,8 |
| Muito Forte | Acima de 30 | 5 | 0,8-1,0 |

Tabela 7. Pesos atribuídos às classes de uso do solo*

| Classes de Fragilidade | Classes de uso do solo | Pesos | $Fuzzy$ |
|------------------------|--|-------|---------|
| Muito Fraca | Vegetação nativa | 1 | 0,0-0,2 |
| Fraca | - | 2 | 0,2-0,4 |
| Média | Pastagem, Faixa de servidão, Silvicultura e Culturas permanentes | 3 | 0,4-0,6 |
| Forte | Cana de açúcar | 4 | 0,6-0,8 |
| Muito Forte | Solo exposto e Área de mineração | 5 | 0,8-1,0 |

* A metodologia de Ross (1994; 2012) não indica grau de fragilidade para a área urbana, tendo em vista que a fragilidade está condicionada à relação pedogênese x morfogênese. Essa análise é inviável em áreas urbanas dadas as dificuldades em identificar tais processos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de atingir os objetivos propostos, os resultados e discussão do presente estudo foram divididos por tópicos. Num primeiro momento, foi realizada uma análise multitemporal dos cenários da fragilidade ambiental considerando os dois anos analisados (1999 e 2014). Na etapa seguinte, foi discutido o quanto as especificidades dos atributos ambientais foram determinantes para a classificação da fragilidade. Por fim, foram feitas análises em termos de ocupação, fragilidade e atributos do meio físico nas áreas dos mananciais de captação de água superficial da BHRA, com a intenção de explicar o atual cenário de escassez hídrica vivenciado pela cidade de Araras, com proposições de alternativas futuras.

Análise multitemporal da fragilidade ambiental

Quando analisado o período entre 1999 e 2014, verificou-se que nas áreas à montante das captações há a presença de consideráveis áreas com classes de fragilidade média, forte e muito forte, que requerem atenção com relação ao manejo do uso do solo, a fim de se evitar a degradação do solo e da água. Nos dias atuais, a cultura canavieira e o solo exposto abrangem expressivas porções destas áreas (Figura 4).

As classes de fragilidade muito fraca e fraca, que abrangem a maior parte da BHRA, não tiveram alterações significativas (Tabela 8). A classe de fragilidade média teve uma redução de 8% na sua área, enquanto que as áreas de classes de fragilidade forte e muito forte tiveram redução de 26,11% e 13,25% respectivamente, correspondendo, no entanto, a um percentual pequeno em relação à área da bacia.

Tabela 8 - Variação das classes de fragilidade

| Classes de Fragilidade | 1999 (km ²) | 2014 (km ²) | Variação (%) |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|
| Muito Fraca | 48,88 | 48,60 | -0,57 |
| Fraca | 189,03 | 190,83 | 0,95 |
| Média | 77,35 | 70,73 | -8,55 |
| Forte | 13,98 | 10,33 | -26,11 |
| Muito Forte | 0,85 | 0,74 | -13,25 |
| Área Urbanizada | 22,68 | 31,54 | 39,09 |
| Área da BHRA | 352,77 | 352,77 | |

Parte dos resultados obtidos referente à diminuição das classes de fragilidade forte e muito forte foi devido à modificação do uso e cobertura do solo, principalmente relacionadas ao solo exposto (peso 5), que diminuiu em 45,42% no período estudado, em virtude das épocas de pousio e a entressafra do cultivo de cana de açúcar (Tabela 9).

No período estudado (1999 a 2014), a cultura da cana de açúcar teve uma ampliação de 85,59% em sua área de plantio, época em que houve a conversão das áreas de culturas permanentes, principalmente da citricultura, em canavieira. A safra 2012-2013 da citricultura foi uma das piores da história da agricultura, devido à ausência de compradores e aos baixos preços, no Estado de São Paulo houve uma redução da área de citros em 115.000 ha. A queda na área plantada já indicava a

Tabela 9 - Variação das classes de uso e cobertura do solo

| Usos | 1999 (km ²) | 2014 (km ²) | Variação (%) |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| Área de Mineração | 0,66 | 0,68 | 2,72 |
| Área Urbanizada | 22,68 | 31,54 | 39,09 |
| Cana de Açúcar | 78,13 | 145,00 | 85,59 |
| Corpos D'Água | 3,88 | 3,48 | -10,33 |
| Culturas Permanentes | 50,65 | 26,94 | -46,81 |
| Faixa de Servidão | 1,55 | 1,65 | 6,24 |
| Infraestruturas Rurais | 24,49 | 16,00 | -34,65 |
| Pastagem | 1,80 | 2,95 | 63,65 |
| Silvicultura | 0,29 | 0,32 | 12,00 |
| Solo Exposto | 112,23 | 61,26 | -45,42 |
| Vegetação Nativa | 56,42 | 62,95 | 11,58 |
| Área da BHRA | 352,77 | 352,77 | |

tendência da expansão canavieira (SÃO PAULO, 2013).

Embora com incremento de 63,65% (1,15 km²), a área total de pastagem não é considerada representativa em relação à área da bacia.

Entre os anos de 1999 e 2014, a área urbanizada teve um acréscimo de 39,09%. Aproximadamente metade deste valor deve-se ao avanço em direção às regiões outrora compostas por infraestruturas rurais (propriedades rurais) e classes de fragilidade muito fraca e fraca à Sul (S) e Sudeste (SE) da BHRA. No entanto, verificou-se que neste período a área urbanizada também avançou sobre classes de fragilidade forte e muito forte, desfavoráveis para tal uso, pois abrangem áreas próximas a corpos d'água e com declividades superiores a 12%, formas de encostas divergentes, e solos de textura arenosa ou média, consideradas restritas segundo o Plano Diretor do Município de Araras (ARARAS, 2006).

O crescimento da área urbanizada altera o padrão natural de cobertura do solo e causa impactos ambientais negativos como a redução da vegetação natural (LEE; CHOE, 2011), diminuição da infiltração da água pluvial (TUCCI, 2008), acréscimo no escoamento superficial (SCHUELER; FRALEY-MCNEAL; CAPPIELLA, 2009) e aumento da poluição difusa (SCHOONOVER; LOCKABY; PAN, 2005). Quanto às águas subterrâneas, áreas urbanizadas geralmente dão origem à poluição causada pela infiltração de contaminantes provenientes de fossas sépticas e vazamentos em tubulações de esgotamento sanitário (LERNER; HARRIS, 2009).

Pôde-se constatar que cada classe de fragilidade possui suas especificidades em virtude das interrelações entre os diversos atributos dos meios físico, biótico e abiótico, abordados no presente estudo, como a seguir descritas:

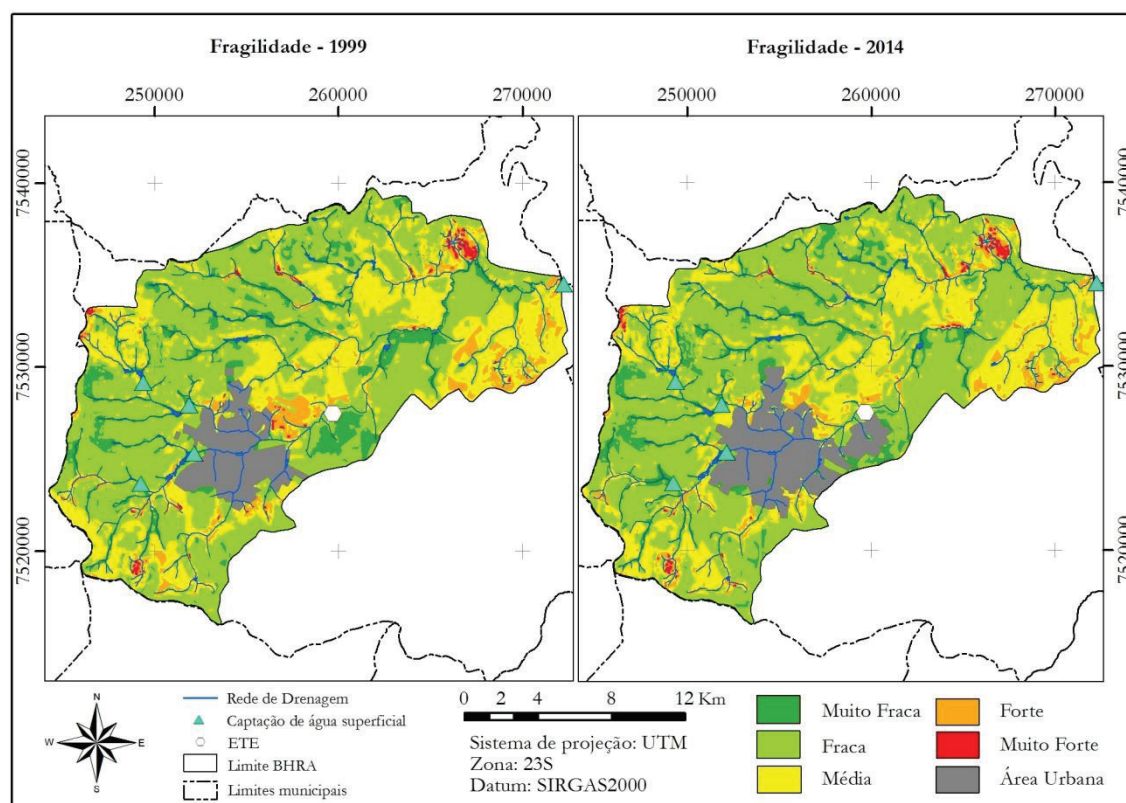


Figura 4 - Evolução das classes de fragilidades

Fragilidade muito fraca

A classe de fragilidade ambiental muito fraca encontra-se distribuída por toda bacia, notadamente ao longo dos cursos d'água e áreas de fundo de vale. Estas áreas caracterizam-se por apresentar baixa velocidade de escoamento superficial da água e estão associadas à forma da encosta convergente côncava. Tais encostas, por serem coletoras hídricas, favorecem a diminuição da velocidade do fluxo de água que chega ao sopé da encosta. Neste caso, a pedogênese predomina sobre os processos morfogenéticos, favorecendo a estabilidade do ambiente.

Esta classe de fragilidade ambiental está intimamente relacionada aos fragmentos de vegetação nativa, inclusive os que se apresentam nas margens dos corpos d'água ao longo de toda paisagem da BHRA e em áreas com declividades maiores que 20%. Observa-se que tal classe encontra-se sobre solos com texturas muito argilosa ou argilosa e distribuída em todos os tipos litológicos.

Fragilidade fraca

A classe de fragilidade fraca predomina perante as demais classes. Nestas áreas a pedologia é composta por LATOSSOLO VERMELHO (textura muito argilosa ou argilosa) originadas das formações geológicas Corumbataí (argilitos, siltitos argilosos e arenosos, bancos e lentes de arenito fino a muito fino, K_{20} entre 10^{-5} e 10^{-4} cm/s), Itararé (diamictito com matriz argilosa e/ou siltosa, K_{20} entre 10^{-5} e 10^{-4} cm/s) e Serra Geral (diques e sills de diabásio, K_{20} entre 10^{-4} e 10^{-3} cm/s). A classe de declividade de 0 a 6%, equivalendo a terrenos planos e suavemente ondulados (EMBRAPA, 1979), distribui-se com maior expressão nessa área, associada às formas de encostas retilíneas (Convergente

Retilínea, Planar Retilínea e Divergente Retilínea).

O uso e cobertura do solo é representado, de forma marcante, pela cultura da cana de açúcar. Apesar de ter sido atribuído um peso forte (4) a esta cultura na aplicação metodológica, não foi esta prática agrícola que determinou a fragilidade fraca deste ambiente, e sim a configuração dos atributos do meio físico.

Fragilidade média

Analisando os resultados que caracterizam a classe de fragilidade média, constatou-se que essas áreas estão distribuídas num eixo centro-nordeste e nas regiões leste, oeste e sudoeste da BHRA. Com relação à pedologia, esta é composta por GLEISSOLOS HÁPLICOS (textura indiscriminada), ARGISSOLOS VERMELHO AMARELOS (textura arenosa/média), LATOSSOLOS VERMELHO AMARELOS (textura predominantemente média) e NEOSSOLOS LITÓLICOS (textura indiscriminada).

Os solos desta área são oriundos do intemperismo químico das seguintes formações geológicas/rochas: Corumbataí (argilitos, siltitos argilosos e arenosos, bancos e lentes de arenito fino a muito fino, K_{20} entre 10^{-5} e 10^{-4} cm/s), Itararé (diamictito com matriz arenosa, K_{20} entre 10^{-3} e 10^{-2} cm/s), Pirambóia (arenitos puros a arcossianos e arenitos argilosos, K_{20} 10^{-3} cm/s) e Tatuí (siltitos arenosos e argilosos, bancos de arenitos finos a muito finos e lentes de argilito, K_{20} 10^{-4} cm/s). Foram espacializadas na classe de fragilidade média os seguintes intervalos de declividade: de 0 a 6% (terrenos planos e suavemente ondulados) e de 6 a 12% (terrenos de suavemente ondulados a ondulados) (EMBRAPA, 1979).

Nas regiões à montante das captações de água, tal grau

de fragilidade compreende faixas de cabeceiras do Córrego Água Boa e Ribeirão das Furnas, que são os principais formadores das represas João Ometto Sobrinho e Hermínio Ometto respectivamente, e são responsáveis por 50% do abastecimento da cidade. No Córrego Água Boa, o grau de fragilidade forte esteve presente em áreas ambientalmente sensíveis, como as úmidas em GLEISSOLOS HÁPLICOS. No Ribeirão das Furnas, ocorreu associado a solos de textura arenosa em declividades acima de 6%; mesmas características das cabeceiras do Ribeirão das Araras, que alimenta os reservatórios Antônio Meneghetti e Usina Santa Lúcia, responsáveis pelo fornecimento de 20% da água consumida no município. Estas áreas desempenham importantes funções com relação à formação e conservação dos corpos hídricos sendo recomendado manejo adequado solo, incluindo o uso de práticas conservacionistas.

Em se tratando do uso e cobertura do solo, constatou-se a cultura da cana de açúcar, áreas com solos expostos bem como fragmentos de vegetação nativa. Tais tipos de usos de solo quando associados às texturas arenosa/média e média das classes pedológicas, conduziram ao resultado obtido. Cabe ressaltar que grande parte dessas áreas de solos expostos está em pousio ou em preparação para o cultivo da próxima safra de cana de açúcar. Essa prática, principalmente em períodos chuvosos, favorece os processos erosivos e o carreamento de sedimentos e insumos agrícolas para os corpos hídricos, ocasionando inclusive a eutrofização.

Fragilidade forte

A fragilidade forte está associada a diferentes condições em regiões distintas da bacia: presença de solo exposto, com declividade de 6 a 12% (terrenos de suavemente ondulados a ondulados) (EMBRAPA, 1979) na região nordeste; NEOSSOLOS LITÓLICOS, Formação Pirambóia (arenitos puros a arcossianos e arenitos argilosos, K_{20} 10^{-3} cm/s), com declividade acima de 20% (forte ondulado) (EMBRAPA, 1979) na região oeste; solo exposto em ARGISSOLOS VERMELHO AMARELOS (textura arenosa/média) sobrejacente à Formação Pirambóia na região sudoeste; cana de açúcar e solo exposto em terrenos com declividades predominantes de 12 a 20% (ondulados) (EMBRAPA, 1979), em ARGISSOLOS VERMELHO AMARELOS associado à Formação Tatuí (siltitos arenosos e argilosos, bancos de arenitos finos a muitos e lentes de argilito, K_{20} 10^{-4} cm/s) na região sul; cana de açúcar, pastagem e solo exposto em declividade de 12 a 30% (terrenos ondulados a forte ondulado) (EMBRAPA, 1979), em LATOSSOLOS VERMELHO AMARELOS (textura predominantemente média) sobre Formação Itararé (diamictito com matriz arenosa, K_{20} entre 10^{-3} e 10^{-2} cm/s), na região leste.

Tal índice de fragilidade abrangeu as nascentes do Ribeirão das Furnas e Ribeirão das Araras as quais são consideradas áreas de preservação permanente sendo indispensável à adoção de práticas conservacionistas. Em conjunto, foram determinantes a presença de solo exposto (1999 e 2014), solos de textura arenosa, provenientes da Formação Pirambóia e declividades acima de 12%.

Cabe ressaltar, que em áreas específicas do Quaternário, devido à presença de cana de açúcar e solo exposto, ocorreu uma alteração da vocação natural (áreas úmidas naturais) desse

espaço, incluindo-o na classe de fragilidade forte.

Fragilidade muito forte

A fragilidade muito forte foi constatada em algumas regiões da bacia: com presença de solo exposto e cana de açúcar em NEOSSOLOS LITÓLICOS (textura argilosa) e declividade acentuada, principalmente acima de 20% (terrenos forte ondulado) (EMBRAPA, 1979) associado à Formação Tatuí (siltitos arenosos e argilosos, bancos de arenitos finos a muitos e lentes de argilito, K_{20} 10^{-4} cm/s) na região nordeste; presença de culturas permanentes, cana de açúcar, solo exposto e vegetação nativa em NEOSSOLOS LITÓLICOS e ARGISSOLOS VERMELHO AMARELOS (textura arenosa/média) com declividade acentuada acima de 20% (terrenos forte ondulado) (EMBRAPA, 1979) em Formação Pirambóia (arenitos puros a arcossianos e arenitos argilosos, K_{20} 10^{-3} cm/s) no extremo oeste da bacia.

Na área de manancial, a fragilidade muito forte abrange as nascentes do Ribeirão das Furnas e o Ribeirão das Araras. No Ribeirão das Furnas, verificou-se a presença de solo exposto (1999 e 2014) associado a solos arenosos em declividade acima de 12%. No Ribeirão das Araras, contribuíram para esse índice de fragilidade, a presença de solos de textura arenosa em declividades acima de 20%. Diante disto, recomenda-se a adoção de manejo adequado do solo nessas áreas.

Influência da fragilidade ambiental na disponibilidade hídrica

A questão da água e do seu uso, em prol da sociedade, vem se firmando ao longo das últimas décadas como uma necessidade em termos de preservação dos serviços ambientais. Tal afirmação tem alcançado cada vez mais destaque, à medida que os atuais mananciais provedores de água para o consumo urbano estão atingindo seus limites máximos de fornecimento (BARRETO, 2015).

É sabido que os aquíferos são formados por rochas porosas ou não, pelas quais infiltram as águas das chuvas e que depois é liberada lentamente para os corpos d'água. Muitas vezes, essa diferença de tempo entre a entrada da água e a descarga, devido à lentidão do fluxo subsuperficial, é o que sustenta os corpos hídricos perenes, mesmo em épocas de estiagem. Nas áreas à montante das captações de água, o processo natural de infiltração da água da chuva e recarga estaria comprometido, em face dos impactos advindos das atividades humanas associados a formações geológicas e classes pedológicas.

Estas áreas são abrangidas pelas formações Corumbataí (argilitos, siltitos argilosos e arenosos, bancos e lentes de arenito fino a muito fino, K_{20} entre 10^{-5} e 10^{-4} cm/s), Tatuí (siltitos arenosos e argilosos, bancos de arenitos finos a muitos e lentes de argilito, K_{20} 10^{-4} cm/s), Serra Geral (diques e sills de diabásio, K_{20} entre 10^{-4} e 10^{-3} cm/s), Irati (argilitos e siltitos) e Pirambóia (arenitos puros a arcossianos e arenitos argilosos, K_{20} 10^{-3} cm/s) inclusive com cobertura sobrejacente de solos com textura predominantemente argilosa. A interação destes atributos do meio físico, combinado à cultura canavieira, eleva o escoamento superficial, diminuindo a infiltração e o abastecimento dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos.

Tal fato se deve, principalmente, a utilização de máqui-

nas agrícolas em larga escala que compactam os solos (SEVERIANO et al., 2010), e da vinhaça para fertirrigação, levando à colmatagem dos poros do solo e consequente diminuição da permeabilidade (ALVES, 2007). Corroborando, Paulino et al. (2011) avaliaram o grau de compactação dos solos em áreas de aplicação de vinhaça e encontraram maior resistência mecânica do solo em áreas com 12 a 20 anos de aplicação, situação na qual se enquadra a área em estudo.

Zuquette, Palma e Pejon (2006) mostram que, ao invés de homogeneidade em termos de textura dos solos, a infiltração e a taxa de escoamento superficial dependem do tipo de uso do solo associados às práticas de gestão. No caso do cultivo de cana de açúcar, a taxa de infiltração diminui devido à influência das condições de compactação e à utilização de máquinas pesadas para aplicação de fertilizantes e para colheita.

Apesar da existência da Lei Estadual nº 9.866/97 (SÃO PAULO, 1997), que estabelece diretrizes e normas para a proteção e a recuperação da qualidade ambiental dos mananciais de interesse regional, a CETESB, por meio da Norma Técnica P4.231 (CETESB, 2014), que institui critérios e procedimentos para aplicação da vinhaça no solo agrícola, não proíbe essa aplicação em áreas de mananciais. Inclusive tal norma permite a aplicação de vinhaça em aquíferos livres (mais suscetíveis à contaminação) com profundidade do nível d'água de no mínimo 1,5m.

Quando comparados os índices pluviométricos nos últimos 8 anos (2007 a 2014) (ARARAS - SAEMA, 2015) com a média pluviométrica para a região, verifica-se que choveu menos do que o esperado somente no último ano, o que, em parte, não justificaria o atual cenário de escassez hídrica vivida pelo município (Figura 5).

Esse cenário de escassez se deve, além dos fatores descritos, à pequena porcentagem de vegetação nativa remanescente na BHRA. Apesar do incremento de 11,58% dessa classe na paisagem ao longo dos anos, a cobertura vegetal está longe de ser a ideal para assegurar os serviços ecossistêmicos providos por ela. Pinheiro et al. (2009) constataram que diante dos tipos de uso e cobertura do solo os maiores valores de capacidade de infiltração da água se localizaram nas matas nativas, já Donadio et al. (2005), analisaram também em áreas com diversificados tipos de uso do solo, a qualidade da água de nascentes e chegaram a conclusão que aquelas que possuíam vegetação natural, mostraram-se com melhor qualidade hídrica quando comparadas àquelas localizadas sob domínio agrícola.

O comprometimento da vegetação nativa de uma bacia

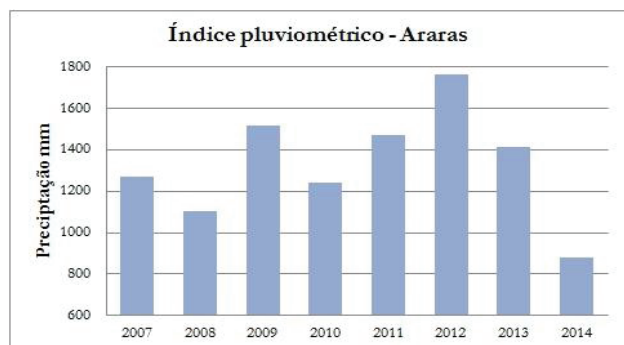


Figura 5 - Variação pluviométrica

hidrográfica aumenta significativamente os custos do tratamento da água para abastecimento público. Segundo Tundisi e Matsu-mura-Tundisi (2010) os custos do tratamento variam entre R\$ 2,00 e R\$ 3,00 por 1.000 m³ de água tratada em mananciais com boa cobertura vegetal, já aqueles mais degradados, o custo do tratamento pode chegar a R\$ 250,00 ou R\$ 300,00 por 1.000 m³.

Dentro dessa perspectiva, uma alternativa viável para o município de Araras seria o tratamento e reaproveitamento da água residuária proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos, que trata 278 L/s do volume coletado na área urbana do município. Esse volume, se considerada uma revegetação dessa bacia, quando retornado às cabeceiras dos mananciais contribuiria consideravelmente para a recarga frente à grave escassez desse recurso nos últimos anos.

CONCLUSÕES

A BHRA não apresentou elevado índice de fragilidade (13,78% da área foi considerada Muito Fraca; 54,09% como Fraca, somando 67,87%). No entanto, 23,19% da área demonstraram acentuados graus de fragilidade (20,05 Média; 2,93% Forte e 0,21% Muito Forte), as quais foram representativas nas áreas de mananciais.

Nessas áreas, o plantio de cana de açúcar, com o uso de práticas agrícolas que reduzem o potencial de infiltração do solo, pode ser responsável pela diminuição de vazão nos mananciais superficiais. Alternativas viáveis seria a adoção de práticas conservacionistas a fim de aumentar a vegetação nativa nas áreas de preservação permanente, bem como a averbação de reservas legais, com o objetivo de evitar degradação dos recursos solo e água.

Na tentativa de amenizar o atual cenário local de escassez hídrica, é preciso que no Plano Diretor do município sejam determinadas adequações do uso do solo nas áreas de mananciais, inclusive em escala mais refinada do que a municipal. No entanto, somente a restrição aos usos do solo que potencializam as condições de impermeabilização, não significa que o manancial esteja protegido. Seriam imprescindíveis estudos locais para verificação das áreas com maiores potenciais de infiltração e direções predominantes do fluxo subterrâneo da água, a fim de que as políticas de conservação sejam direcionadas para as áreas que mais contribuem para a recarga dos reservatórios superficiais e subterrâneos.

A metodologia utilizada neste trabalho mostra-se satisfatória para a realização do planejamento da expansão urbana e de práticas agrícolas, pois possibilita uma análise integrada dos diversos atributos do meio físico. A presença de cobertura vegetal, ainda que proveniente de monoculturas, geralmente ameniza o grau de fragilidade com relação à estabilidade ou não do terreno.

AGRADECIMENTOS

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. *Domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. São Paulo, Ateliê Editorial, 159 p., 2003.
- AGUIAR, A. D. C. *Mapeamento geotécnico da folha de Conchal, SP.*: Escala 1:50.000. 1995. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- ALVES, A. C. *Estudo da interação de vinhoto com uma argila de baixa plasticidade da região do município de Campos dos Goytacazes – RJ*. 2007. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciência e Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Estadual Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2007.
- BARRETO, D. Água de abastecimento urbano: por que economizar? *Revista AEASC*, nº 14, ano VI, 2015.
- BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos*. Rio de Janeiro, 83p., 1979.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Resolução Nº 1/2005*. Estabelece o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS). Brasília, 2005.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Cidades*. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=350330&search=sao-paulo|araras>. Acesso em: 01 de junho de 2015.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Cartas topográficas. Folhas Topográficas: Leme* (SF-23-Y-A-II-1), Araras (SF-23-Y-A-II-3) e Conchal - SF-23- Y-A-II-4. Escala 1:50.000, 1971.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Manual Técnico de Pedologia*. 2 ed. Rio de Janeiro, 2007.
- BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). *Dados Meteorológicos das Estações Convencionais*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>. Acesso em: 05/06/2015.
- BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). TOPODATA, *banco de dados geomorfométricos do Brasil*. Disponível em <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso em: 18/05/2015.
- BRASIL. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). *Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)*. Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php2015. Acesso em: 10 de junho de 2015.
- BROLLO, M. J. *Mapeamento geotécnico da quadricula de Araras, SP*. Escala 1:50.000. 1991. 88 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.
- CEREDA JUNIOR, A. *Análise de Fragilidade Ambiental com Métodos Multicritério - críticas e proposta metodológica*. 2011. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, p. 149, 1974.
- DONADIO, N. M. M.; GALBIATTI, J. A.; DE PAULA, R. C. Qualidade da água de nascentes com diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do Córrego Rico. *Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 1, p. 115-125, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v25n1/24877.pdf>. Acesso em 20 ago. 2015.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS for the desktop 10.2, 2013.
- EASTMAN, J.R. Decision Support: *Decision Strategy Analysis*. In: CLARK UNIVERSITY (Ed.). *IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing*. Worcester: Clark Labs, 2006.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Managing systems at risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London, 2011. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/015/i1688e/i1688e00.pdf>. Acesso em 24 jun. 2015.
- KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI A.; ROSS, J. L. S. *Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XII, 2005, Goiânia, Brasil, INPE, p. 2203-2210, 2005. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/tlid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.16.10/doc/2203.pdf>. Acesso em 14 jul. 2015.
- LEE, D.; CHOE, H. Estimating the Impacts of Urban Expansion on Landscape Ecology: Forestland Perspective in the Greater Seoul Metropolitan Area. *J. Urban Plann. Dev. (ASCE)*, v. 137, p. 425-437, 2011. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29UP.1943-5444.0000090>. Acesso em 14 jul. 2015.
- LERNER, D. N.; HARRIS, B. The relationship between land use and groundwater resources and quality. *Land Use Policy*, v. 26, n. 1, p. 265–273, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837709001306>. Acesso em 20 ago. 2015.
- LOLLO, J. A. *Mapeamento geotécnico da folha de Leme, SP: utilização da geomorfologia para a caracterização preliminar de Unidades Geotécnicas*. 1991. 87 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento

de Geotecnia Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 1991.

MACHADO, F. H.; DUPAS, F. A. Valoração de recursos hídricos como subsídio na gestão do manancial urbano do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP. *Geossp (USP)*, v. 33, p. 111-126, 2013. Disponível em: [file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/Meus%20documentos/Downloads/74305-99861-1-PB%20\(2\).pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/Meus%20documentos/Downloads/74305-99861-1-PB%20(2).pdf). Acesso em: 20 ago. 2015.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 206 p. 2007.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis* (Island Press, Washington, DC), 2005. Disponível em: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2015.

MONTES, L. M. V.; RUIZ, A. M. Environmental indicators to evaluate spatial and water planning in the coast of Granada (Spain). *Land Use Policy*, v. 25, n. 1, p. 95-105, 2008. Disponível em: http://observatorioambiental.iff.edu.br/publicacoes/publicacoes-cientificas/indicadores_espanha.pdf. Acesso em: 11 jul. 2015.

MUNICÍPIO DE ARARAS. *Lei nº 3901/06 - Plano Diretor e Normas Disciplinadoras*, 2006. Disponível em: <http://consulta.siscam.com.br/camaraararas/arquivo?id=50289>. Acesso em: 11 jul. 2015.

MUNICÍPIO DE ARARAS. *Saema volta a captar água do Rio Mogi Guaçu*. Disponível em: <http://www.araras.sp.gov.br/e/?c=noticias&i=12544>. Acesso em: 03 de jun. 2015.

MUNICÍPIO DE ARARAS. Serviço de Água, Esgoto e Meio Ambiente do Município de Araras (Saema). *Índice Pluviométrico*. Disponível em: http://www.saema.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=97&Itemid=66. Acesso em 11 jun. de 2015.

MUNICÍPIO DE ARARAS. Serviço de Água, Esgoto e Meio Ambiente do Município de Araras (Saema). *Decreto nº 5.440, de 04 de maio de 2005 – Decreto da Água*. Disponível em: http://www.saema.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=16&Itemid=25. Acesso em: 11 jun. 2015.

PAULINO, J.; ZOLIN, C. A.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo: II. Características da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 244-249, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011000300004. Acesso em 11 jun. 2015.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade

de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. *Ambi-Água*, v. n. 2, p. 188-199, 2009. Disponível em: <file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/Meus%20documentos/Downloads/211-2708-1-PB.pdf>. Acesso em 11 jun. 2015.

QIU, J.; TURNER, M. G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *PNAS*, v. 110, n. 29, p. 12149 - 12154, 2013. Disponível em: <http://www.pnas.org/content/110/29/12149.full>. Acesso em 12 jun. 2015.

RAPPORT, D. J.; MAFFI, L. Eco-cultural health, global health, and sustainability. *Ecological Research*, v. 26, n. 6, p. 1039-1049, 2010. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11284-010-0703-5/fulltext.html>. Acesso em 12 jun. 2015.

RAVENGA, C. Developing indicators of ecosystem condition using geographic information systems and remote sensing. *Regional Environmental Change*, v. 5, n. 4, p. 205-214, 2005. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10113-004-0085-8/fulltext.html>. Acesso em 12 jun. 2015.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Revista do Departamento de Geografia – DG-FFLCH-USP*. São Paulo, v. 8, p. 63-74, 1994. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/viewFile/47327/51063>. Acesso em: 20 ago. 2015.

ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. *Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume Especial 30 Anos*, p. 38-51, 2012. Disponível em: <file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/Meus%20documentos/Downloads/53841-67582-1-PB.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2015.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: FFLCH-USP/IPT/FAPESP, 1997.

SÃO PAULO (Estado). Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). *Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo. Quadricula de Araras* (SF-23-Y-A-II). Escala 1:100.000, 1981.

SÃO PAULO (Estado). *Inventário Florestal da Vegetação Natural do Estado de São Paulo*, Instituto Florestal do Estado de São Paulo, 2009.

SÃO PAULO (Estado). *Lei nº 9.866/1997*. Disponível em: http://www.comitepcj.sp.gov.br/gapb/LeiEstadualSP9866_97.pdf. Acesso em: 20 ago. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos de São Paulo (SSRH-CSAN). Produto 5 (P5): *Plano Regional Integrado de Saneamento Básico*. Planos Integrados Regionais e Municipais de Saneamento Básico para UGRHI 9. Consórcio Engecorps-Maubertec, 2014. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7513/1222-sse-00-sa-rt-0005-r1.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2015.

SÃO PAULO (Estado). *Situação dos recursos hídricos no Estado de São Paulo*: ano base 2007. Secretaria do Meio Ambiente; Coordenadoria de Recursos Hídricos. São Paulo: SMA/CRH, 2009.

SÃO PAULO. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). *Norma Técnica P4.231*: Vinhaça - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 3 ed., 15 p. 2014. Disponível em: http://www.ibra.com.br/wp-content/uploads/2015/02/p4_231_vinhaca_revisada.pdf. Acesso em: 12 jun. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Banco de dados do Instituto de Economia Agrícola, 2013. Disponível: <http://www.iea.sp.gov.br/out/bancodedados.html>. Acesso em: 11 mai. 2015.

SCHEWE, J.; HEINKE, J.; GERTEN, D. HADDELAND, I.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; DANKERS, R.; EISNER, S.; FEKETE, B. M.; COLÓN-GONZÁLEZ, F. J.; GOSLING, S. N.; KIM, H.; LIU, X.; MASAKI, Y.; PORTMANN, F. T.; SATOH, Y.; STACHE, T.; TANG, Q.; WADA, Y.; WISSER, D.; ALBRECHT, T. FRIELER, K.; PIONTEK, F.; WARSZAWSKI, L.; KABAT, P. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, v. 111, n. 9, p. 3245-3250, 2014. Disponível em: <http://www.pnas.org/content/111/9/3245.full>. Acesso em 12 mai. 2015.

SCHOONOVER, J. E.; LOCKABY, B. G.; PAN, S. Changes in chemical and physical properties of stream water across an urban-rural gradient in Western Georgia. *Urban Ecosystems*, 8(1): 107–124, 2005. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11252-005-1422-5>. Acesso em 12 jun. 2015.

SCHUELER, T.; FRALEY-MCNEAL, L.; CAPPIELLA, K. Is Impervious Cover Still Important? Review of Recent Research. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 14, n. 4, p. 309-315, 2009. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0699%282009%2914%3A4%28309%29>. Acesso em 13 ago. 2015.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. *Engenharia Agrícola*, v. 30, n. 3, p. 404-413, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162010000300005&script=sci_arttext. Acesso em: 13 ago. 2015.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11): 1117-1142, 1952. Disponível em: http://www.unc.edu/courses/2010spring/geog/591/001/students/nmey13/GEOL483/Lab5/pdfs/Strahler_1952_hypsometry.pdf. Acesso em 20 ago. 2015.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. Recursos naturais e meio ambiente.

Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 91 p., 1977. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ecodinamica.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2015.

TUCCI, C. E. M. Gestão integrada das águas urbanas. *Revista de Gestão de Águas da América Latina* - REGA, v. 5, n. 2, p. 71–81, 2008. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/>

Contribuição dos autores:

Carlos Wilmer Costa: Contribuiu com a digitalização da base de dados (geologia e formas de terreno), escolha da revista e da metodologia adotada, bem como na discussão dos resultados e conclusão. Elaborou o título, introdução, objetivos e figuras.

Fabiola Geovanna Piga ; Contribuiu com a digitalização da base de dados (topografia, declividades e uso e cobertura do solo do ano de 2014), escolha da revista, elaboração da metodologia, figuras, discussão dos resultados e conclusão.

Mayra Cristina Prado de Moraes: Contribuiu com a digitalização da base de dados (uso e cobertura do solo dos anos de 1999 e 2014), escolha da revista, tabulação dos materiais e métodos, elaboração da metodologia, discussão dos resultados e conclusão.

Mariana Dorici: Contribuiu com a digitalização da base de dados (atualização da rede hidrográfica e represas), escolha da revista, elaboração da metodologia, discussão dos resultados, conclusão e diagramação final do artigo.

Evandro de Castro Sanguineto: Contribuiu com a digitalização da base de dados (geologia e pedologia), escolha da revista, levantamento do uso e demanda dos recursos hídricos pela cidade de Araras, elaboração da metodologia, discussão dos resultados e conclusão.

José Augusto de Lollo: Contribuiu com a digitalização da base de dados (geologia), na elaboração do resumo e da metodologia, discussão dos resultados, conclusão e revisão final do artigo.

Luis Eduardo Moschini: Contribuiu na orientação quanto ao uso do aplicativo ArcGis 10.2.2 utilizado na digitalização da base de dados e na soma ponderada dos atributos geoambientais, na escolha da revista, elaboração da metodologia e discussão dos resultados.

Reinaldo Lorandi: Pesquisador sênior. Foi responsável pela escolha da área de estudo e levantamento dos dados geográficos utilizados em fontes bibliográficas. Participou da elaboração da metodologia, discussão dos resultados e elaboração do resumo.

Leandro José Oliveira: Colaborou na redação do artigo, na elaboração da introdução e discussão dos resultados.