

DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS PROPENSAS À SATURAÇÃO HÍDRICA E IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE POLUIÇÃO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Viviane Capoane¹

Resumo: O presente trabalho objetivou determinar a distribuição espacial das áreas propensas à saturação hídrica utilizando o índice topográfico de umidade (ITU) e, identificar as fontes de poluição em uma bacia hidrográfica do noroeste do Rio Grande do Sul, no intuito de gerar informações que subsidiem os gestores na tomada de decisão. A partir de um modelo digital de elevação de 20 metros de resolução, em ambiente do sistema de informação geográfica, foi determinado o ITU. Os resultados indicaram uma boa relação entre o ITU e as áreas de maior saturação, que naturalmente encontram-se associadas aos canais de drenagem. Os menores valores foram obtidos nas áreas mais íngremes. As fontes pontuais de poluição localizam-se, na maior parte, em áreas propensas a saturação hídrica, com isso os riscos de transferência de poluentes para cursos d'água aumentam significativamente. As fontes difusas de poluição como lavouras e pastagens onde o dejetos líquido de suíno é aplicado como fertilizante, também apresentam grande potencial de transferência de poluentes para os sistemas aquáticos. Os mapas gerados poderão auxiliar os gestores na definição das áreas prioritárias para a gestão ambiental.

Palavras-chave: Índice Topográfico de Umidade; Modelo Digital de Elevação; Análise de Terreno; Poluição.

DETERMINATION OF AREAS PRONE TO WATER SATURATION AND IDENTIFICATION OF SOURCES OF POLLUTION IN A WATERSHED OF NORTHWESTERN OF RIO GRANDE DO SUL

Abstract: This research aimed to determine the spatial distribution of areas prone to water saturation using the topographic wetness index (TWI), and identify the sources of pollution in a watershed of northwestern of Rio Grande do Sul, the purpose of generate information that support the administrators in decision making. From a digital elevation model of 20-meter resolution, in environmental geographic information system it was determined the TWI. Results indicate a good relationship between TWI and the areas of higher saturation that naturally are associated with the drainage channels. The lowest values were obtained in the steepest areas. Point sources pollution are located mostly in areas prone to water saturation with this pollutant transfer of risk to the watercourses increase significantly. Nonpoint source pollution such as crops and grasslands where the swine liquid waste is used as fertilizer, also have major pollutants transfer potential for aquatic systems. The

¹ Doutora em Geografia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). capoane@gmail.com.

generated maps can support management in defining priority areas for environmental management.

Keywords: Topographic Wetness Index; Digital Elevation Model; Terrain Analysis; Pollution.

INTRODUÇÃO

O escoamento superficial devido ao excesso de precipitação constitui uma parte importante do ciclo hidrológico e uma via dominante de poluição por fontes não pontuais. Portanto, a identificação de áreas geradoras de escoamento é muito importante para a aplicação de melhores práticas de manejo em área agrícolas (SINGH e WOOLHISER, 2002; HOOVER, 1990).

Na hidrologia as áreas geradoras de escoamento superficial não estão uniformemente distribuídas na paisagem, mas estão concentradas em áreas saturadas específicas (GAREN e MOORE, 2005). Muitos pesquisadores sugeriram que porções relativamente pequenas de uma bacia hidrográfica contribuem para o escoamento direto, enquanto as regiões remanescentes raramente geram escoamento superficial (O'LOUGHLIN, 1986; ANDERSON e BURT, 1978; ARTEAGA *et. al.*, 1973; MOLDENHAUER *et. al.*, 1960).

Conforme Amerman (1965), as áreas com potencial de geração de escoamento localizam-se nas partes inferiores das encostas em topografia convergente ou áreas côncavas; nos vales; nas áreas com lençol freático raso e; ao longo dos cursos d'água, variando significativamente espacial e temporalmente, durante eventos de precipitação ou sazonalmente. A variabilidade espacial e temporal depende da quantidade e intensidade da chuva, da umidade e características do solo, do uso da terra, da topografia, da profundidade do lençol freático e, de sua localização geográfica (SIVAPALAN *et. al.*, 1987).

Ao longo dos anos, vários pesquisadores propuseram técnicas para melhor descrever e prever a distribuição espacial da água do solo (MALLICK *et. al.*, 2010; JACKSON, 1993). As duas abordagens mais comuns envolvem (i) modelos hidrológicos distribuídos, muitas vezes complexos, que simulam numericamente os processos físicos que governam a dinâmica da água no solo ou (ii) índices mais simples baseados na topografia e, às vezes, nas propriedades do solo. Como os modelos distribuídos exigem entrada e calibração extensiva de dados, tornam-se proibitivos para uso de planejadores e gestores ambientais (WHITE *et. al.*, 2010; LANE *et. al.*, 2006). Já os índices de terreno oferecem uma alternativa mais simples e, devido à sua formulação e requisitos de parametrização moderados, podem ser eficazmente aplicados em escalas maiores, mantendo uma resolução espacial relativamente fina.

O índice de terreno mais conhecido e amplamente aplicado em hidrologia e ecologia é o índice topográfico de umidade (ITU), originalmente proposto por Beven e Kirby (1979). O ITU é definido pelo logaritmo natural da razão entre a área de contribuição específica (A_s) e a tangente do ângulo da declividade, como mostra a Equação 1.

$$ITU = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right) \quad 1$$

No qual A_s corresponde à área de contribuição específica por unidade de largura ortogonal à linha de fluxo ($m^2 m^{-1}$) e β é a declividade expressa em graus radianos. A equação mostra que o ITU é função apenas de β , assim é adicionada a seguinte restrição: $0^\circ < \beta < 90^\circ$, pois se $\beta = 0$, $\tan \beta = 0$ e $1/\tan \beta$ é infinito e, se $\beta = 90^\circ$, $1/\tan 90 = 0$, $\ln 0$ é infinito.

Este índice fornece uma medida relativa, não absoluta, do estado de umidade de uma determinada área ou pixel. Dessa forma, a predição automática de áreas propensas à saturação hídrica através de índices topográficos derivados de modelos digitais de elevação (MDE's) em ambiente do Sistema de Informação Geográfica (SIG), pode subsidiar a compreensão dos mecanismos dos processos hidrológicos de transferência de sedimento e poluentes para cursos d'água bem como auxiliar no gerenciamento de atividades potencialmente poluidoras.

Diante do acima exposto, o presente trabalho objetivou determinar a distribuição espacial das áreas propensas à saturação hídrica utilizando o índice topográfico de umidade e, identificar as fontes de poluição (pontuais e difusas) em uma bacia hidrográfica agrícola do noroeste do Rio Grande do Sul, no intuito de gerar informações que subsidiem a gestão das atividades potencialmente poluidoras.

MATERIAL E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido em uma bacia hidrográfica (BH) predominantemente agrícola (1.336 ha), localizada no Município de Palmitinho, noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Conforme Rossato (2011), o clima da região é o subtropical muito úmido. O substrato litológico é composto de basaltos da Formação Serra Geral, *Fácies Parapanema*, com relevo predominante forte ondulado (declividade entre 20-45%) e cota mínima de 199 m e máxima de 513 m (CAPOANE, 2016). As classes de solos mais expressivas da bacia hidrográfica são Neossolo e Cambissolo (CUNHA *et. al.*, 2010).

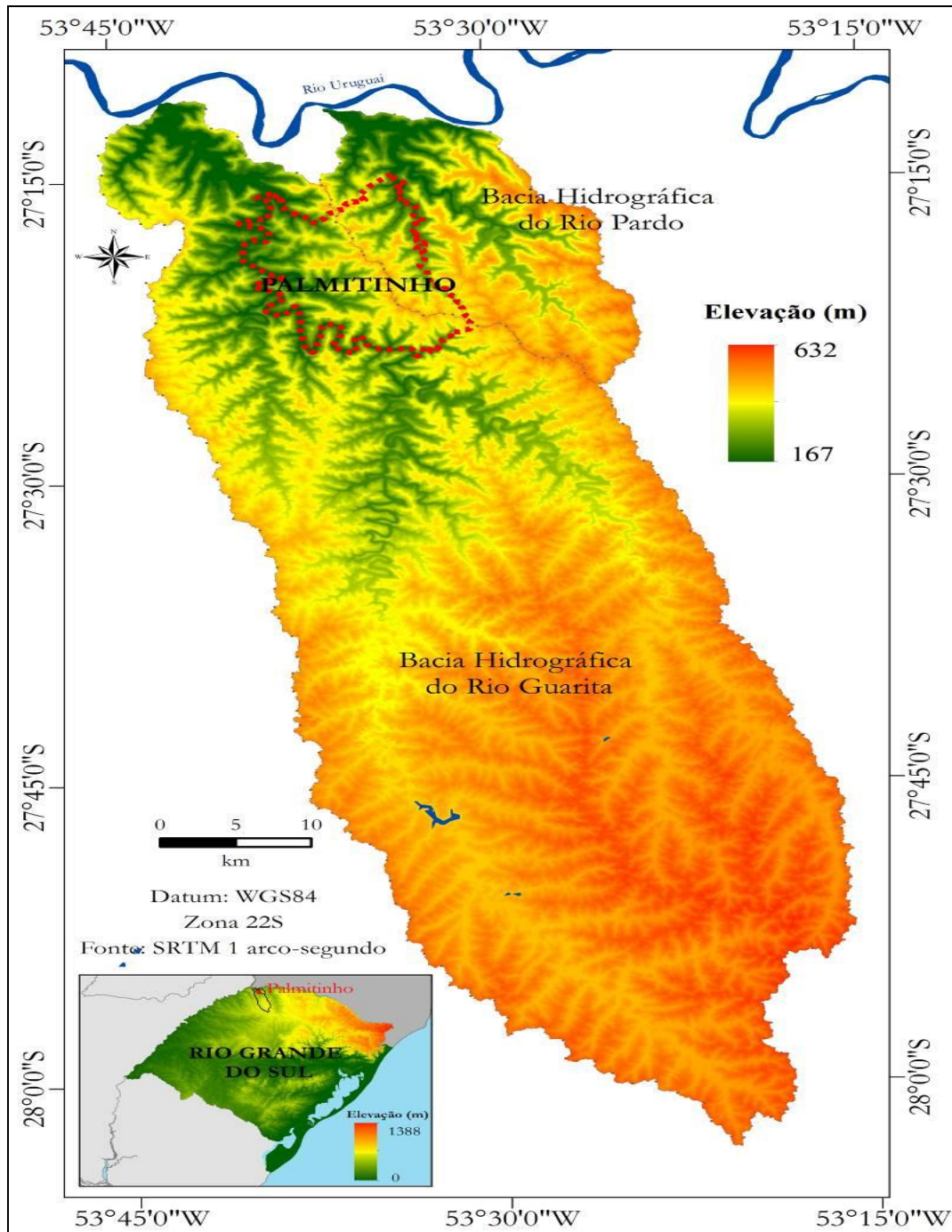


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Caldeirão, Palmitinho, RS.

Conforme Capoane *et. al.* (2014), a ocupação agrícola da BH está adaptada principalmente às dificuldades impostas pelo relevo. As lavouras encontram-se principalmente nos vales, mas é possível encontrá-las também em áreas mais íngremes. Os cultivos comerciais mais expressivos são milho e fumo no verão. No período de inverno pequenas áreas são cultivadas com forrageiras, mas a maior parte permanece em pousio hibernar.

Da vegetação, outrora de mata nativa composta pela formação floresta estacional decidual submontana, restam fragmentos preservados em áreas onde não é possível a prática agrícola em função do relevo acidentado. Em algumas propriedades, devido ao êxodo de jovens para as cidades, observam-se lavouras abandonadas com matas em vários estágios de regeneração (CAPOANE *et. al.*,

2014). A área da BH é subdividida em 124 propriedades e a economia local baseia-se, principalmente, na suinocultura intensiva, bovinocultura leiteira e aposentadorias.

DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS PROPENSAS A SATURAÇÃO HÍDRICA

Os dados cartográficos utilizados para a geração do MDE foram extraídos da carta topográfica de Palmitinhos na escala 1:50.000, folha SG-22-Y-C-I-4/ MI-2884/4, fuso 22. As informações utilizadas foram as isolinhas das curvas de nível e os pontos cotados. Estas informações foram interpoladas no *software* ArcGis 10.1 utilizando o método *Topo to Raster*. Este método de interpolação permite congrega tanto as feições hidrográficas, como a remoção de dados espúrios relativos a pontos de depressões (JENSON e DOMINIQUE, 1988). Na interpolação, optou-se pela resolução de pixel de 20 metros.

A partir do MDE gerado, o mesmo foi convertido para o formato txt utilizando a ferramenta *Raster to ASCII* do ArcGIS e, no *software* SAGAGIS 2.0.5. foi determinado o índice topográfico de umidade para a bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão. A migração de *software* deu-se, pois, o ArcGis considera o fluxo unidimensional, utilizando um único algoritmo de fluxo, o D8, já o SAGA GIS é muito mais evoluído neste aspecto, apresentando inúmeras opções de algoritmos, pois considera o fluxo bidimensional.

IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE POLUIÇÃO

O levantamento espacial das fontes pontuais de poluição da bacia hidrográfica foi realizado utilizando o *software* Google Earth Pro, cujas imagens disponíveis datavam de 2007. Em trabalhos de campo nos anos de 2013 e 2014 foram retiradas as coordenadas geográficas das granjas construídas depois desta data utilizando um GPS de navegação, *GPSmap 62s* da *Garmin*. As fontes difusas de poluição foram identificadas a partir do mapa de uso da terra gerado utilizando uma imagem de satélite disponível no *software* Google Earth Pro do ano de 2007, com posterior atualização em campo para o ano de 2012.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

ÁREAS PROPENSAS A SATURAÇÃO HÍDRICA

Os valores do índice topográfico de umidade para a bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão variaram de 3 a 19, média de 6,15, desvio padrão de 1,89. De acordo com o mapa gerado (Figura 2), a cor azul mais escura representa as áreas com maior potencial de saturação hídrica e geração de escoamento superficial. Na bacia hidrográfica essas áreas estão localizadas principalmente em vertentes côncavas convergentes nos fundos de vale e ao longo dos cursos d'água. As cores intermediárias representam pendentes de curvatura convergente em que os fluxos tendem a se concentrar, aumentando a umidade do solo, essas áreas estão presentes, principalmente, no terço inferior das encostas. As áreas em azul claro indicam baixa umidade do solo e estão presentes em vertentes divergentes, em locais com declive mais acentuado e nos interflúvios, associadas a solos rasos que retém pouca umidade.

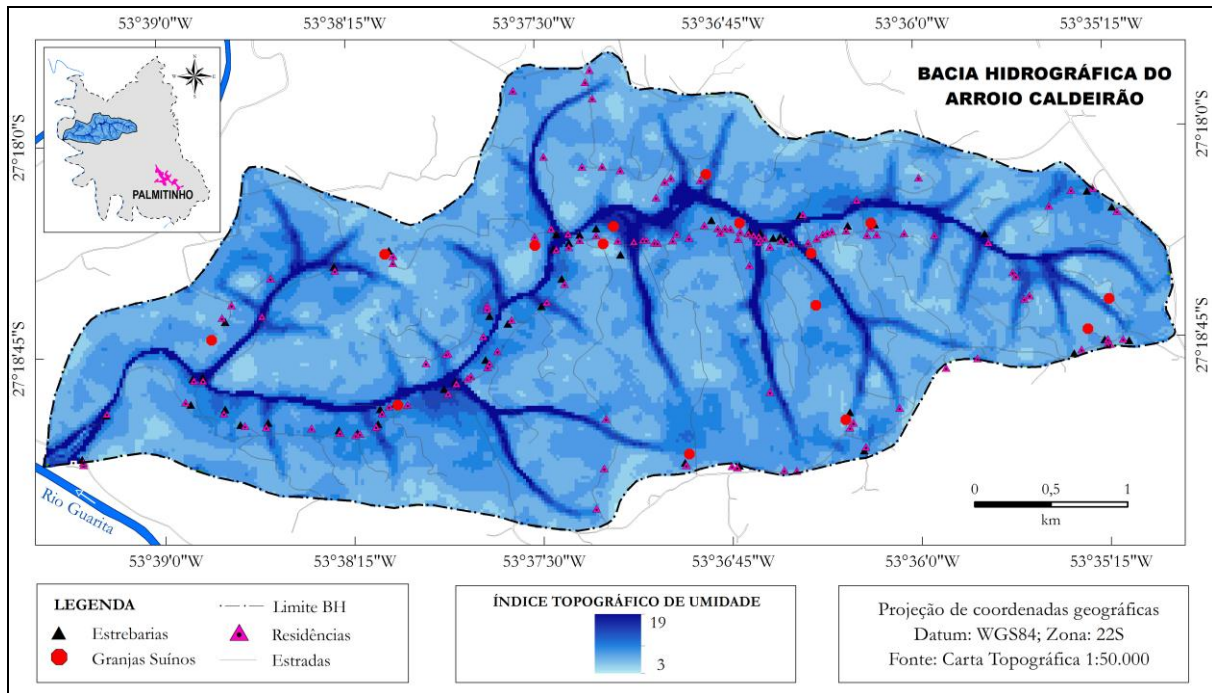


Figura 2 - Distribuição espacial do índice topográfico de umidade para a bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão, Palmitinho, RS.

Conforme Dalhke *et. al.* (2013) e Walter *et. al.* (2000), áreas de bacias hidrográficas que apresentam maior probabilidade de geração de escoamento superficial por saturação são consideradas como áreas hidrológicamente sensíveis. Para Walter *et. al.* (2000), devido ao seu comportamento hidrológico distinto na paisagem, estas áreas são de grande interesse ambiental, pois surgem como elemento de ligação entre as vertentes e os corpos d'água, propiciando o rápido transporte de poluentes através dos processos de escoamento. Dessa forma, a distribuição espacial das áreas hidrológicamente sensíveis através do índice topográfico de umidade poderá subsidiar a gestão ambiental em bacias hidrográficas, principalmente no que tange ao transporte de sedimento e poluentes, como já demonstraram Srinivasan e McDowell (2007), O'Campo *et. al.* (2006) e Walter *et. al.* (2000).

A identificação das áreas propensas à saturação hídrica a partir de MDEs também tem sido utilizada como indicadoras para a delimitação de *buffers* de preservação ao longo de rios e nascentes em bacias hidrográficas (BRESIANI e SCHMIDT, 2016; SIEFERT e SANTOS, 2012; WALTER *et. al.*, 2009; GORSEVSKI *et. al.*, 2008).

IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE POLUIÇÃO

Foram identificadas três fontes principais de poluição pontual na bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão, sendo elas: granjas de suínos, salas de ordenha e residências. As principais fontes difusas de poluição identificadas através do mapeamento do uso da terra e nos trabalhos de campo foram: lavouras mal manejadas onde o dejetos líquido de suíno é aplicado como fertilizante orgânico e, áreas de campo antropizado (potreiros) utilizado para o pastejo do gado.

As sedes das propriedades encontram-se nos vales, próximas a cursos d'água e nos topos de morros, próximas às nascentes, refletindo o histórico de

ocupação onde o agricultor sempre começava próximo ao curso d'água ou nascente pelo fato de precisar de uma fonte segura de abastecimento para a família e para os animais, o que desde o início da ocupação causou o comprometimento das áreas de preservação permanente, como as matas ciliares. Na maioria delas não há sistema de tratamento de esgoto, sendo todo efluente gerado encaminhado para fossas negras. Como a maioria das propriedades encontram-se em áreas propensas a saturação hídrica (Figura 2), aumentam os riscos de transferência de poluentes para os cursos d'água.

A bovinocultura de leite está presente em praticamente todas as propriedades, variando de uma a 40 vacas por propriedade (Figuras 2 e 3). O tratamento do efluente nas salas de ordenha é uma prática pouco utilizada pelos agricultores. Somente quatro propriedades possuem esterqueiras, e em três delas a atividade está consorciada com a suinocultura, onde os produtores aproveitam o mesmo sistema para canalização dos dejetos suínos e bovinos. Nas demais propriedades a ordenha é feita em estrebarias mal dimensionadas ou a céu aberto, sendo todo efluente gerado descartado diretamente no ambiente.

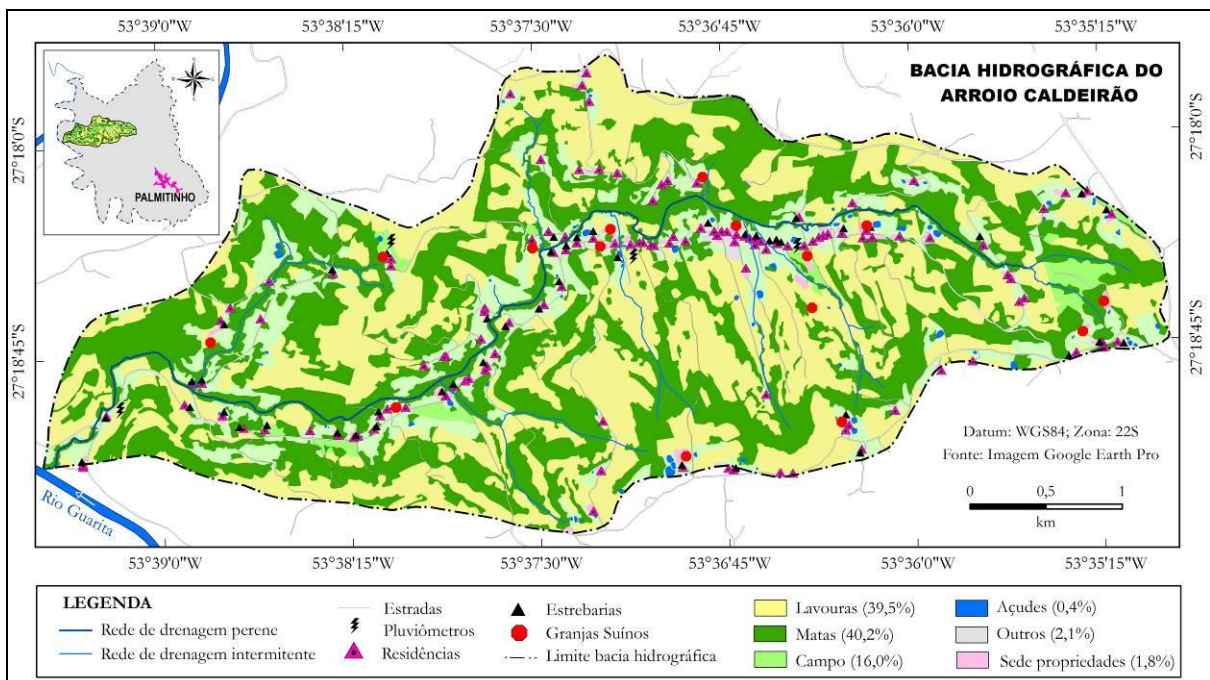


Figura 3 - Classes de uso da terra e fontes pontuais de poluição na bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão, Palmitinho, RS.

Conforme Capoane *et. al.* (2016), na bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão a atividade de suinocultura intensiva está presente em 15 propriedades, sendo 12 em Unidade de Terminação (UT) e três em Unidade de Produção de Leitões (UPL). O número de animais nas UTs é de 8.040 e nas UPLs é de 560 matrizes. Estes dados foram obtidos em uma visita a Secretaria de Agricultura do Município de Palmitinho no ano de 2015. Assim como no restante do país onde há produção intensiva de suínos, o tratamento dos dejetos ainda é uma prática pouco utilizada em virtude dos custos e da complexidade dos processos necessários para a eficiente depuração dessa matriz, que tem como característica inerente a sua alta carga poluente.

Nas propriedades que praticam a suinocultura intensiva, os efluentes líquidos são em sua totalidade utilizados como fertilizante orgânico nas áreas agrícolas e de pastagem. Conforme Capoane *et. al.* (2014), a aplicação dos dejetos

em áreas agrícolas normalmente é feita antes do plantio das culturas, nesse momento há a incorporação mecânica do efluente ao solo, mas também há aplicação durante o crescimento das plantas, feita em superfície. Em algumas propriedades, devido a sistemas de armazenagem subdimensionados, em determinados períodos do ano em que não é possível a distribuição dos efluentes nas lavouras em função do estágio de desenvolvimento das plantas, há o extravasamento ou descarte direto no ambiente em dias de chuva.

Na bacia BH do Arroio Caldeirão, Capoane *et. al.* (2014) calcularam o volume de dejetos líquidos produzidos, sendo este de $70 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ perfazendo um total de $25.550 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$, com uma oferta de $49,04 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para aplicação como adubo orgânico nas áreas agrícolas. Considerando que as 15 propriedades que desenvolvem a atividade têm em média 10 ha, a quantidade de efluente gerado é suficiente para causar grande acúmulo de nutrientes no solo, potencializando assim a transferência desses elementos aos sistemas aquáticos. A problemática é agravada devido a sistemas de armazenagem subdimensionados e infraestrutura de distribuição deficiente. Pior ainda é a constatação que há manejo inadequado das instalações, em especial por causa de vazamentos no sistema hidráulico, desperdício de água nos bebedouros e sistema de limpeza inadequado.

O estrume contribui para a fertilidade do solo (AITKEN, 1996) e, quando devidamente gerido nas áreas agrícolas, contribui também para o ganho econômico por meio do aumento da produtividade das culturas e benefícios ambientais por meio da melhora da resistência do solo às variações climáticas e no sistema de cultivo e manejo. Porém, doses acima do recomendado podem aumentar a concentração de metais pesados no solo, a ponto de atingir níveis tóxicos para as plantas (DE CONTI *et. al.*, 2016; LOURENZI *et. al.*, 2014; TIECHER *et. al.*, 2013) e aumentar o fluxo de gases de efeito estufa como o óxido nitroso do solo (GONZATTO *et. al.*, 2013). Durante eventos de precipitação de alta intensidade, a água de escoamento carrega nutrientes, fertilizantes, produtos químicos, pesticidas e várias bactérias nocivas que podem prejudicar a qualidade da água, tornando-a insegura para atividades recreativas ou para dessedentação, provocando condições hipóxicas para o ecossistema aquático (HAACK *et. al.*, 2015).

ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE, USO DA TERRA E FONTES DE POLUIÇÃO

A superposição dos mapas de uso da terra com as fontes pontuais e difusas de poluição com o índice topográfico de umidade (Figura 4) mostra que as áreas com maior potencial de atingir saturação hídrica e gerar escoamento superficial, encontram-se ao longo dos cursos d'água, logo são áreas que deveriam ser de preservação permanente, conforme a legislação Federal vigente. No entanto, nesses locais encontram-se sedes de propriedades, granjas de suínos, estrebarias e lavouras. Conforme Gburek *et. al.* (2002), Walter *et. al.* (2000) e, Pionke *et. al.* (1996), áreas onde o potencial de saturação hídrica coincide com as fontes de potenciais poluição (por exemplo, granjas de suínos e lavouras e pastagens com aplicação superficial de dejetos), existe um risco elevado de transferência de poluentes para os sistemas aquáticos.

No que se refere à aplicação de dejetos em lavouras e pastagens, em trabalho desenvolvido por Sharpley *et. al.* (2001), em bacias hidrográficas agrícolas do nordeste dos Estados Unidos, os autores mostraram que o escoamento superficial é a via dominante de transporte de poluentes e, nos locais onde dejetos

de suínos eram espalhados superficialmente, ou seja, sem incorporação (por exemplo, em pastagem e sistema de plantio direto) o problema era agravado. Na bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão, embora algumas propriedades já aderiram ao sistema plantio direto, na maioria delas predomina o sistema convencional de cultivo, mas independente do sistema de manejo do solo, o dejetos líquido de suíno é aplicado em sua maioria, superficialmente, assim a água de escoamento carrega nutrientes, fertilizantes, produtos químicos, pesticidas e várias bactérias nocivas que podem prejudicar a qualidade da água dos rios como já demonstrou Haack *et al.* (2015).

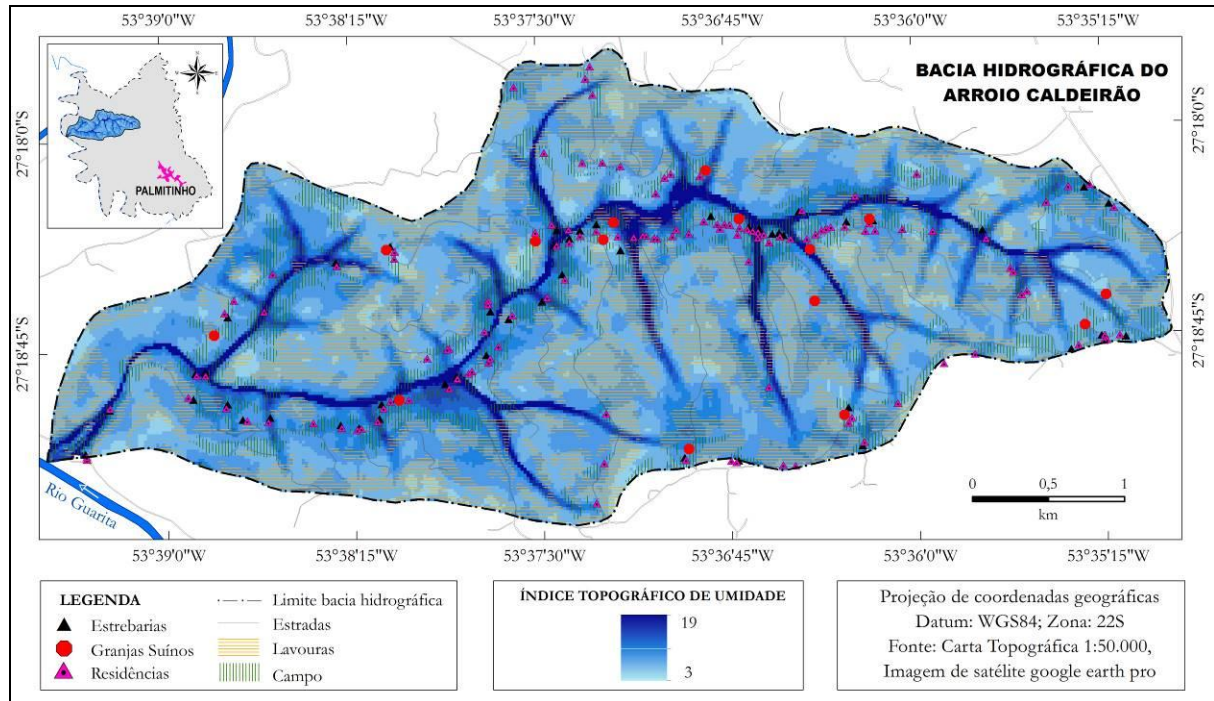


Figura 4 - Distribuição espacial do índice topográfico de umidade e as classes de uso da terra lavoura e campo (pastagens) na bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão, Palmitinho, RS.

Conforme o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em 2016 o Brasil ocupou o terceiro lugar no *ranking* mundial de produção e exportação de carne suína (USDA, 2016). No *ranking* estadual, em 2016, Santa Catarina liderou o abate de suínos, seguido por Rio Grande do Sul e Paraná (IBGE, 2016). Quanto às exportações, a comparação entre os segundos trimestres 2016/2015, Santa Catarina registrou aumento de 47,0% no volume exportado, mantendo-se como principal Estado exportador de carne suína. Rio Grande do Sul e Paraná registraram aumentos de 23,6% e 46,9%, respectivamente, contribuindo para o aumento de 37,7% das exportações brasileiras. A participação da Região Sul no total exportado ficou no mesmo patamar caindo de 83,7% para 83,3% (IBGE, 2016).

Embora a atividade de suinocultura intensiva tenha grande importância econômica e social nas regiões produtoras, a intensificação da produção tem provocado uma forte pressão sobre os recursos naturais, principalmente sobre o solo e a água. Dada à gravidade do problema, ferramentas capazes de determinar a distribuição espacial de áreas propensas a saturação hídrica com a delimitação das áreas de maior risco de transferência de poluentes dos sistemas terrestres para os aquáticos em bacias hidrográficas, podem auxiliar os gestores na identificação de locais prioritários, para que estas áreas possam ser protegidas de atividades

potencialmente poluidoras, tais como implantação de novas granjas ou aplicações de dejetos animais em terras agrícolas hidrologicamente sensíveis.

CONCLUSÕES

A distribuição espacial do índice topográfico de umidade mostrou que as áreas com maior potencial de atingir saturação hídrica e gerar escoamento superficial encontram-se ao longo dos cursos d'água. Os menores valores foram encontrados em áreas com declive mais acentuado e interflúvios onde os solos são rasos e retêm pouca umidade.

As fontes pontuais de poluição encontram-se, na maior parte, em áreas propensas a saturação hídrica, com isso os riscos de transferência de poluentes para cursos d'água aumentam significativamente. As fontes difusas de poluição como lavouras e pastagens onde o dejetos líquido de suíno é aplicado como fertilizante, também apresentam grande potencial de transferência de poluentes para os sistemas aquáticos.

Os mapas gerados poderão auxiliar os gestores na definição das áreas prioritárias para o planejamento de ações visando à gestão das atividades potencialmente poluidoras identificadas na bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

AITKEN, M. N. Sustainable use of sewage sludge on agricultural land. In: TAYLOR, A. G.; GORDON, J. E.; USHER, M. B. **Soils, Sustainability and the Natural Heritage**. HMSO, Edinburgh, 1996, p.152-169.

AMERMAN, C. R. The use of unit-source watershed data for runoff prediction. **Water Resources Research**, v. 1, p. 499-507, 1965.

ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. Toward more detailed field monitoring of variable source areas. **Water Resources Research**, v.14, n.6, p.1123-1131, 1978.

ARTEAGA, F. E.; RANTZ, S. E. Application of the source-area concept of storm runoff to a small Arizona watershed. **Journal of Research U.S. Geological Survey**, v. 1, n. 4, p. 493-498, 1973.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, p. 43-69, 1979.

BRESSIANI, J. X.; SCHMIDT, M. A. R. Proposta de uso das áreas variáveis de afluência como área de preservação permanente. **Revista Monografias Ambientais**, v. 15, 198-208, 2016.

CAPOANE, V. Concentrações de Cu, Zn e Mn no sedimento de fundo de uma bacia hidrográfica com suinocultura intensiva. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 10, p.43-58, 2016.

CAPOANE, V.; TIECHER, T.; SCHAEFER, G. L.; SANTOS, D. R. dos. Impactos da suinocultura na qualidade da água da bacia hidrográfica do Arroio Caldeirão,

Palmitinho, Rio Grande do Sul. **Brazilian Geographical Journal: geosciences and humanities research medium**, v. 5, p. 494-509, 2014.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; KOESTER, E.; OLIVEIRA, L. D.; ALBA, J. M. F.; COSTA, F. A.; TERRES, V. C.; LOPES, R. T. Estudos de Solos do Município de Palmitinho, RS. **Documentos** (Circular Técnica, Embrapa Clima Temperado), v. 105, p. 1-28, 2010.

DAHLKE, H. E.; EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; STEENHUIS, T. S. Real-Time Forecast of Hydrologically Sensitive Areas in the Salmon Creek Watershed, New York State, Using an Online Prediction Tool. **Water**, v. 5, n. 3, p. 917-944, 2013.

DE CONTI, L.; CERETTA, C. A.; FERREIRA, P. A. A.; LOURENZI, C. R.; GIROTTO, E.; LORENSINI, F.; TIECHER, T. L.; MARCHEZAN, C.; ANCHIETA, M. G.; BRUNETTO, G. Soil solution concentrations and chemical species of copper and zinc in a soil with a history of pig slurry application and plant cultivation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 216, p. 374-386, 2016.

GAREN, D. C.; MOORE, D. S. Curve number hydrology in water quality modeling: Uses, abuses, and future directions. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 2, p. 377-388, 2005.

GONZATTO, R.; MIOLA, E. C. C.; DONEDA, A.; PUJOL, S. B.; AITA, C. Volatilização de amônia e emissão de óxido nitroso após aplicação de dejetos líquidos de suínos em solo cultivado com milho. **Ciência Rural**, v. 43, p. 1590-1596, 2013.

GORSEVSKI, P. V.; BOLL, J.; GOMEZDEL CAMPO, E.; BROOKS, E. S. Dynamic riparian buffer widths from potential non-point source pollution areas in forest watersheds. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 664-673, 2008.

GBUREK, W. J.; DRUNGIL, C. C.; SRINIVASAN, M. S.; NEEDELMAN, B. A.; WOODWARD, D. E. Variable-source-area controls on phosphorus transport: Bridging the gap between research and design. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, p. 534-543, 2002.

HAACK, S. K.; DURIS, J. W.; KOLPIN, D. W.; FOGARTY, L. R.; JOHNSON, H. E.; GIBSON, K. E.; FOCAZIO, M.; SCHWAB, K. J.; HUBBARD, L. E.; AND FOREMAN, W. T. Genes indicative of zoonotic and swine pathogens are persistent in stream water and sediment following a swine manure spill. **Applied and environmental microbiology**, v. 81, p. 3430-3441, 2015.

HOOVER, J. R. Seep and runoff detector design and performance to determine the extent and duration of seep/runoff zones from precipitation on a hillside. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 33, p. 1843-1850, 1990.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Indicadores IBGE: Estatística da Produção Pecuária**. Disponível em:

Estudos Geográficos, Rio Claro, 14(2): 57-69, jul./dez. 2016 (ISSN 1678—698X)
<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo>

ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Pecuaria/Fasciculo_Indicadores_IBGE/abate-leite-couro-ovos_201602caderno.pdf. Acessado em: 03 de fev. 2017.

JACKSON, T. J. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. **Hydrological Processes**, v. 7, p. 139-152, 1993.

JENSON S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

LANE, S. N.; BROOKES, C. J.; HEATHWAITE, A. L.; AND REANEY, S. Surveillant Science: Challenges for the Management of Rural Environments Emerging from the New Generation Diffuse Pollution Models. *Journal of Agricultural Economy*, v. 57, p. 239-257, 2006.

LOURENZI, C. R.; CERETTA, C.A.; BRUNETTO, G.; GIROTTO, E.; TIECHER, T. L.; VIEIRA, R.C. B.; CANCIAN, A.; FERREIRA, P. A. A. Pig slurry and nutrient accumulation and dry matter and grain yield in various crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 949-958, 2014.

MALLICK, K.; BHATTACHARYA, B. K.; PATEL, N. K. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI, v. 149, p. 1327-1342, 2009.

MOLDENHAUER, W. C.; BARROWS, W. C.; SWARTZENDRUBER, D. Influence of rain storm characteristics on infiltration measurements. **Transactions of the International Congress on Soil Science**, v. 7, p. 426-432, 1960.

O'CAMPO, C. J.; SIVAPALAN, M.; OLDHAM, C. Hydrological connectivity of upland-riparian zones in agricultural catchments: Implications for runoff generation and nitrate transport. **Journal of Hydrology**, v. 331, p. 643-658, 2006.

O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.

PIONKE, H. B.; GBUREK, W. J.; SHARPLEY, A. N.; SCHNABEL, R. R. Flow and nutrient export patterns for an agricultural hill-land watershed. **Water Resources Research**, v. 32, p. 1795-1804, 1996.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. 240 f. Tese de Doutorado em Geografia apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS - RS, Brasil).

SHARPLEY, A. N.; MCDOWELL, R. W.; WELD, J. L.; KLEINMAN, P. J. A. Assessing site vulnerability to phosphorus loss in an agricultural watershed. **Journal of Environmental Quality**, v. 30, p. 2026-2036, 2001.

SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis: uma abordagem hidrogeomorfológica para delimitação

de áreas de preservação permanente. **RA'EGA: o Espaço Geográfico em Análise**, v. 24, p. 227-257, 2012.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 4, p. 270-292, 2002.

SIVAPALAN, M.; BEVEN, K.; WOOD, E. F. On hydrologic similarity 2. A scaled model of storm runoff production. **Water Resources Research**, v. 23, n. 12, p. 2266-2278, 1987.

SRINIVASAN, M. S.; MCDOWELL, R. W. Hydrological approaches to the delineation of critical-source areas of runoff. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 50, p. 249-265, 2007.

TIECHER, T. L.; CERETTA, C. A.; COMIN, J. J.; GIROTTO, E.; MIOTTO, A.; MORAES, M. P.; BENEDET, L.; FERREIRA, P. A. A.; LOURENZI, C. R.; COUTO, R. C.; BRUNETTO, G. Forms and accumulation of copper and zinc in a sandy typic hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep litter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 812-824, 2013.

UNITED STATES DEPARTAMENTO OF AGRICULTURE - USDA. **Livestock and poultry: world markets and trade**. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf. Acessado em: 03 de fev. 2017.

WALTER, M. T.; WALTER, M. F.; BROOKS, E. S.; STEENHUIS, T. S.; BOLL, J.; WEILER, K. Hydrologically sensitive areas: variable source area hydrology implications for water quality risk assessment. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 3, p. 277-284, 2000.

WALTER, M. T.; ARCHIBALD, J. A.; BUCHANAN, B.; DAHLKE, H.; EASTON, Z. M.; MARJERISON, R. D.; SHARMA, A. N.; SHAW, S. B. New paradigm for sizing riparian buffers to reduce risks of polluted storm water: practical synthesis. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 135, p. 200-209, 2009.

WHITE, M. J.; STORM, D. E.; BUSTEED, P. R.; SMOLEN, M. D.; ZHANG, H.; FOX, G. A. A quantitative phosphorus loss assessment tool for agricultural fields. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, p. 1121-1129, 2010.

Artigo submetido em: 04/02/2017

Aceito para publicação em: 14/02/2017

Publicado em: 20/02/2017