

**EFEITO DA RESOLUÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA
DERIVAÇÃO DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE: ESTUDO DE CASO NO
MUNICÍPIO DE PALMITINHO-RS**

**EFFECT OF RESOLUTION OF DIGITAL ELEVATION MODELS IN THE
DERIVATION OF TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX: CASE STUDY IN THE
COUNTY OF PALMITINHO-RS**

Viviane CAPOANE¹
Luís Fernando Flenik COSTA²
Tatiana Mora KUPPLICH³

Resumo: A topografia exerce um importante controle sobre os processos hidrológicos. Uma abordagem para quantificar esse controle é o Índice Topográfico de Umidade (ITU). Este índice é determinado a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em ambiente do sistema de informação geográfica. Embora o cálculo seja relativamente simples, as diferenças de resoluções entre os MDEs podem ter impactos significativos sobre o ITU. A proposta deste trabalho foi analisar os efeitos da resolução de MDEs no cálculo do ITU para o município de Palmitinho, a fim de selecionar a melhor resolução de MDE capaz de separar as áreas com potencial de saturação hídrica e geração de escoamento superficial. O ITU foi calculado com base nos atributos do terreno declividade e área de contribuição específica a partir de três MDEs de diferentes resoluções (20m, 30m e 90m). Os resultados foram comparados em termos de diferenças quantitativas e de distribuição espacial. A comparação entre os índices revelou que conforme a resolução do MDE diminui os intervalos do ITU também diminuem. Isso tem como consequência subestimar áreas úmidas e superestimar as áreas secas. O MDE de resolução mais fina apresentou com mais detalhe as áreas com potencial de geração de escoamento superficial.

Palavras-chave: Análise do terreno; Escoamento superficial; Saturação; Poluentes.

Abstract: Topography is an important control on hydrological processes. One approach to quantify this control is the Topographic Wetness Index (TWI). This index is determined through Digital Elevation Models (DEMs) using a geographic information system. Although the calculation is relatively simple, the different resolutions between the DEMs could have significant impact on the TWI. The purpose of this study was to analyze the effects of DEMs resolution in the TWI calculation to Palmitinho County with the intent to select the best DEM resolution can separating the areas with potential water saturation and generation of surface runoff. The TWI was calculate based on the terrain attributes, declivity and specific contribution area and from three different DEMs with different resolutions (20m, 30m and 90m). The results were compared in terms of quantitative difference and space distribution. The comparison between the indexes revealed that as DEM resolution decreases the TWI range also decreases. This has a consequence the underestimation of wetness areas and overestimation of dry areas. The DEM with finer resolution showed with more details areas with potential to generate runoff.

Keywords: Terrain analysis; Runoff; Saturation; Pollutant.

¹Geógrafa, Pesquisadora no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS/INPE), Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: capoane@gmail.com

²Engenheiro Florestal, Pesquisador no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS/INPE), Santa Maria, RS, Brasil, E-mail: flenikcosta@gmail.com

³Bióloga, Tecnologista Sênior no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS/INPE), Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: tatiana.kuplich@inpe.br

Introdução

O escoamento superficial é produzido por dois processos diferentes, o escoamento superficial Hortoniano e o escoamento superficial por saturação. O escoamento superficial Hortoniano ocorre quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo (HORTON, 1933). Em áreas úmidas bem vegetadas a capacidade de infiltração raramente é excedida, de modo que o modelo de fluxo de Horton não funciona, ao invés disso, o solo é saturado até que a capacidade de armazenamento é excedida (DUNNE & BLACK, 1970; DUNNE *et al.*, 1975; WARD, 1984; WALTER *et al.*, 2000). Porém, se houver precipitação sobre uma área que excedeu a sua capacidade de armazenamento, nesta haverá escoamento Hortoniano. Dessa forma, como o solo fica saturado, a área saturada tende a se expandir, em contrapartida, nos períodos mais secos há uma contração da área saturada (HEWLETT & HIBBERT, 1967). As áreas onde o escoamento superficial por saturação é dominante são nominadas como Área Variável de Afluência (AVA) (HEWLETT & HIBBERT, 1967).

A extensão da AVA na paisagem está condicionada ao total de precipitação de um evento, às condições antecedentes de umidade e à intensidade da chuva, das características hidrológicas dos solos (DUNNE *et al.*, 1975) e, da topografia que, conforme Moore *et al.* (1991), condiciona o movimento superficial e lateral da água nas encostas. Dentre estes fatores, as características topográficas podem ser previstas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), o que torna possível mapear as áreas com maior potencial de saturação e geração de escoamento na paisagem.

Um índice amplamente utilizado para a determinação das AVAs a partir de MDEs é o Índice Topográfico de Umidade (ITU) (QUINN, 1995). Este índice foi primeiramente apresentado por Beven & Kirkby (1979) no modelo TOPMODEL. Conforme estes autores, o pressuposto básico do ITU é que a topografia controla o movimento da água nas encostas. Esta conclusão foi embasada em observações feitas em campo, onde os autores notaram o acúmulo do fluxo de água nos fundos de vales e em áreas planas. Atualmente, o ITU é um dos principais parâmetros hidrogeomorfológicos utilizados para localização de áreas úmidas na paisagem.

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 $ITU = \ln(A_s / \tan \beta)$, 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. A ideia por trás do ITU é proporcionar um índice de saturação relativa em uma bacia hidrográfica, onde assume-se a similaridade hidrológica entre áreas com o mesmo valor de índice (BEVEN & KIRKBY, 1979).

O cálculo do ITU utilizando modelos digitais de elevação em ambiente do sistema de informação geográfica é relativamente simples, entretanto as diferenças de resoluções entre os MDEs podem ter impactos significativos sobre o cálculo dos atributos do terreno. A área de contribuição específica, por exemplo, é afetada diretamente pela resolução do MDE, pois células maiores da grade irão produzir valores menores de A_s . Thompson *et al.* (2001), dentre outros autores, verificaram que MDEs com baixa resolução geram gradientes de menor média e máximo. Quinn *et al.* (1995) concluíram que quadrículas maiores não são representativas, ao mesmo tempo difíceis de validar em pequenas bacias hidrográficas, pois a forma e dimensão podem ser alteradas por células excessivamente grandes e, os resultados da baixa resolução tendem para valores mais baixos do ITU. Straumann *et al.* (2007) mostraram que há perda na representação dos fluxos canalizados e menores valores da A_s com a diminuição da resolução. Zhang & Montgomery (1994) usando MDEs com resoluções de 2 m, 4 m, 10 m, 30

m e 90 m em encostas de 30-40°, constataram que a resolução de 10 m melhora a modelagem de processos, porém, nenhuma melhora significativa foi encontrada em resoluções mais finas. Diante do exposto percebe-se que as diferentes resoluções de MDEs podem sub ou superestimar as zonas saturadas na paisagem.

Em bacias hidrográficas áreas com potencial de saturação e geração de escoamento superficial encontram-se situadas ao longo dos cursos d'água, nas cabeceiras de drenagem próximo às nascentes e nas concavidades do terreno para as quais convergem as linhas de fluxo. Nesses locais, a geração de escoamento superficial pode transportar nutrientes e contaminantes em excesso para os sistemas aquáticos. Diante disso, Walter *et al.* (2000) definiram as AVAs como áreas hidrologicamente sensíveis (AHS), ou seja, as áreas da bacia hidrográfica mais propensas a atingirem o estado de saturação do solo, logo, com potencial para transportar contaminantes para corpos d'água perenes. Segundo estes autores, uma descrição quantitativa das AHS fornece uma base ou, pelo menos, um ponto de partida para a avaliação de risco de contaminação dos corpos d'água.

Considerando que a resolução dos modelos digitais de elevação tem efeito direto na qualidade dos atributos geomorfométricos, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da resolução de três MDEs no cálculo do índice topográfico de umidade para o município de Palmitinho, Rio Grande do Sul. A área de estudo foi selecionada, pois Palmitinho tem como importante fonte de arrecadação a atividade de suinocultura intensiva, atividade esta considerada de grande potencial poluidor dos recursos hídricos. A motivação para este estudo foi que a definição da melhor resolução do MDE para a avaliação das áreas com potencial de saturação hídrica e geração de escoamento superficial, pode subsidiar o planejamento ambiental, no intuito de prevenir e mitigar a poluição pontual e difusa decorrente da suinocultura intensiva no município.

Material e Métodos

Local do estudo

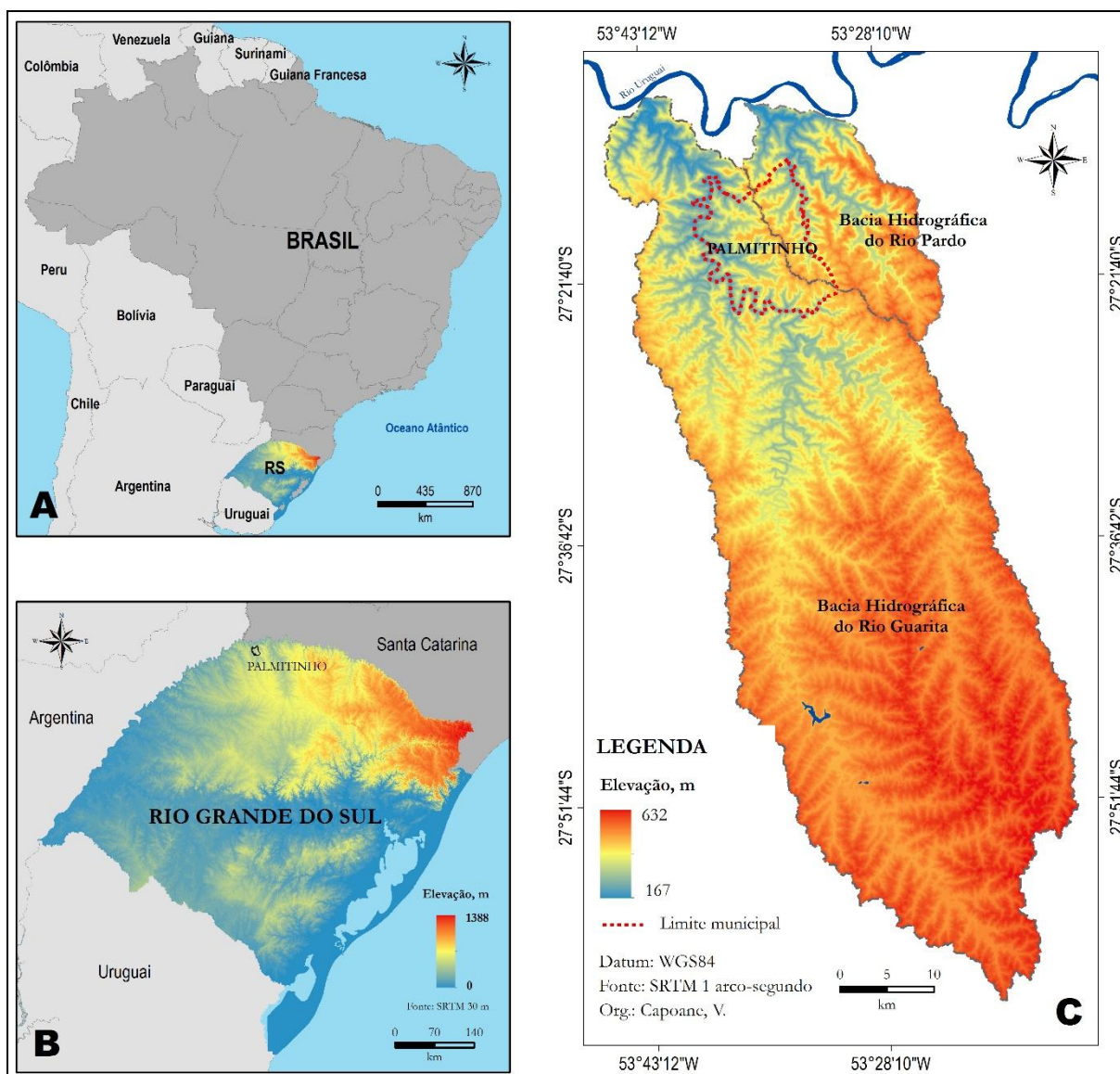
O município de Palmitinho (144,045 km²) localiza-se na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). O clima da região é o subtropical muito úmido com inverno fresco e verão quente (ROSSATO, 2011). Este tipo climático sofre maior influência dos sistemas tropicais marítimos e continentais em associação com o efeito do relevo (planalto e vale do rio Uruguai). Os sistemas associados ao Tropical Atlântico Continentalizado são significativos na região, o que colabora para o aumento das temperaturas. A temperatura média anual varia de 20-23°C, a temperatura média do mês mais frio oscila entre 14-17°C e a temperatura do mês mais quente varia entre 23-29°C. É a região com o conjunto de médias de temperaturas mais altas do Estado. Chove entre 1700-1900 mm ao ano.

As águas do município compõem duas bacias hidrográficas (BHs), sendo elas a BH do Rio Guarita correspondendo a 68,4% da área do município e a BH do Rio Pardo, que corresponde a 31,6% da área do município de Palmitinho. Ambas as bacias drenam em direção ao Rio Uruguai (Figura 1).

O substrato litológico é composto de basaltos da Formação Serra Geral, *Fácies Paranapanema*. As principais classes de solo do município são Luvissolo crômico, Neossolo litólico e regolítico e Cambissolo háplico (CUNHA *et al.*, 2010). O relevo do local é acidentado com encostas íngremes possuindo formas distintas como: espigões rochosos (28,7%); espigões degradados (1,16%); serras (62,64%) com superfícies íngremes de relevo com aspecto muito rochoso, fortemente escarpadas e; vales com terras quase planas ou aplainadas nos platôs e fundos de vale (7,53%) (CUNHA *et al.*, 2010).

No município predominam pequenas propriedades que se fragmentaram ao longo do tempo, com agricultura familiar. Conforme dados do último Censo Demográfico (IBGE, 2010) o município possui 6.920 habitantes e destes, 3.393 (49%) residem na zona urbana e 3.527 na zona rural (51%). A economia é dependente dos produtos primários, sendo basicamente agrícola com pecuária leiteira integrada a criação de suínos e aves (CAPOANE *et al.* 2014).

Figura 1 – A) Mapa do Brasil com destaque para o Rio Grande do Sul; B) Localização do município de Palmitinho no Estado do RS; C) Posição geográficas do município de Palmitinho nas bacias hidrográficas do Rio Guarita e Rio Pardo.



Dados cartográficos

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.

Dados orbitais

Os dados orbitais SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução de três arcos-segundo (± 90 metros), foram obtidos no *web site* do *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI) no formato TIFF (georreferenciada). Estes dados são fornecidos gratuitamente e estão disponíveis no endereço <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>. A imagem utilizada foi a "srtm2618". Também foram utilizados dados SRTM com resolução de um arco-segundo (± 30 metros), obtidos no repositório do Serviço Geológico Americano (*United States Geological Survey-USGS*), no *web site* <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Para cobrir a área de estudo foi utilizada a imagem "S28W054" no formato TIFF (georreferenciada).

Geração dos modelos digitais de elevação e índices topográficos de umidade

A base de informações constituída pela carta topográfica (CT 20), SRTM 30 e SRTM 90, foi organizada em um banco de dados geográfico no *software* ArcGis® 10.2. As diferentes bases de dados selecionadas para este trabalho são as mais comumente utilizadas com fins de pesquisa no Brasil, por serem gratuitas e de fácil obtenção. Como a USGS disponibilizou os dados SRTM 30 m, optou-se por não utilizar os dados TOPODATA 30 m, pois estes são um produto da interpolação dos dados SRTM de 90 m (VALERIANO & ROSSETI, 2011).

O MDE carta topográfica foi obtido a partir da interpolação das curvas de nível e pontos cotados. Para a definição do tamanho de pixel optou-se por utilizar a equidistância vertical de 20 metros. A interpolação dos dados foi feita utilizando o método *Topogrid*, desenvolvido para estudos hidrológicos (HUTCHINSON, 1989). No ArcGis® 10.2 utilizando o módulo *Project*, os dados originais SRTM (30 e 90 metros) foram projetados no sistema de coordenadas geográficas para o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), utilizando o sistema de referência WGS84, zona 22S. Deste modo, os dados altimétricos gerados a partir da grade SRTM foram convertidos para o sistema de projeção UTM sem a necessidade de interpolação dos valores da grade e a consequente alteração da distribuição dos valores de altitude originais.

No ArcGis os três MDEs foram convertidos para o formato txt e, no *software* SAGAGIS 2.2.5 (SAGA, 2016) foi determinado o índice topográfico de umidade para o município de Palmitinho. A migração de *software* deu-se, pois, o ArcGis considera o fluxo unidimensional utilizando um único algoritmo de distribuição de fluxo (D8), já o SAGAGIS possui mais opções de algoritmos, pois considera o fluxo bidimensional.

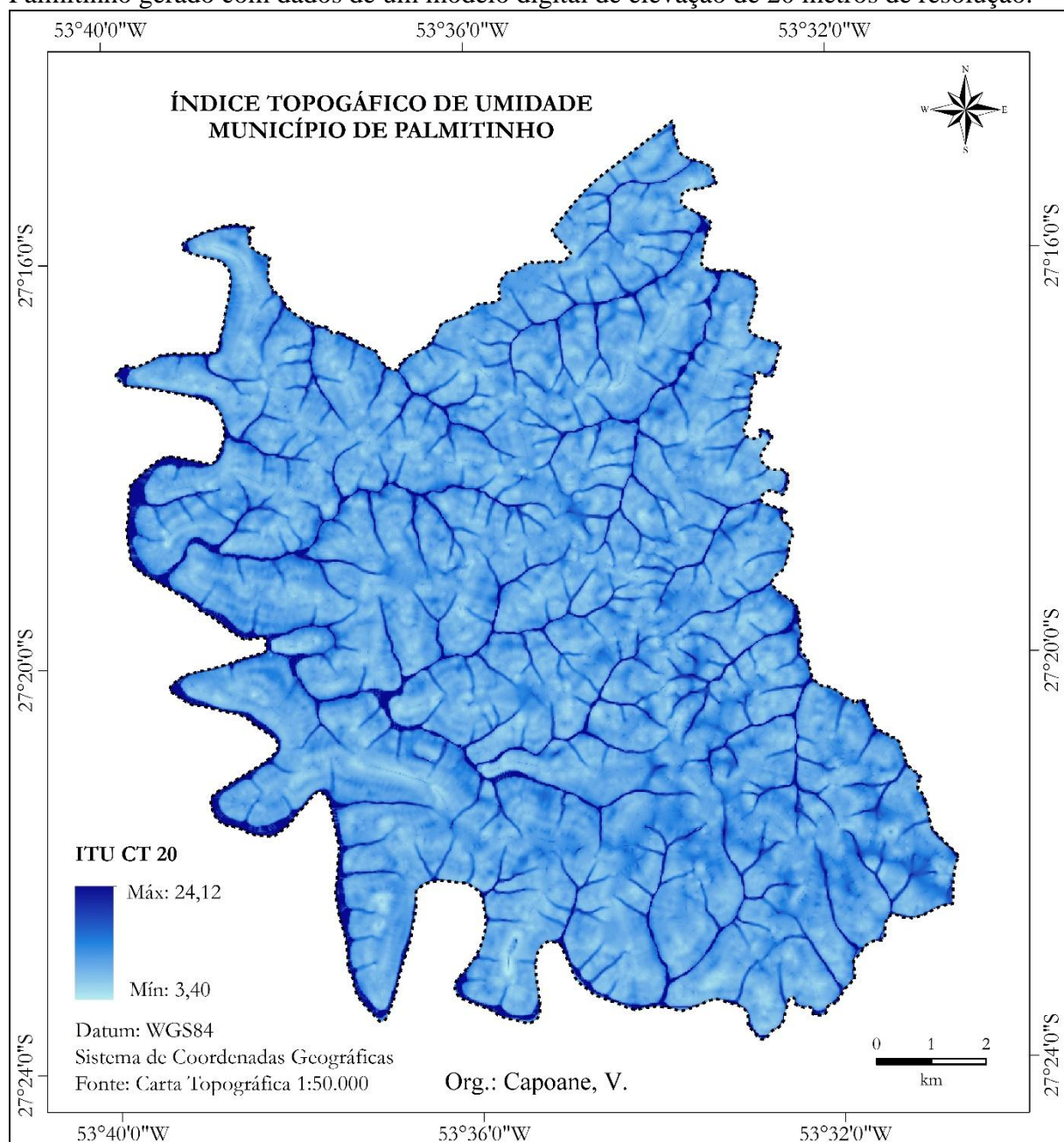
Com base nos atributos declividade e área de contribuição específica, utilizando a extensão *Terrain Analysis* → *Compound Analysis* → *Basic Terrain Analysis* do SAGA GIS, os mapas do ITU foram gerados. Os resultados foram comparados em termos de diferenças quantitativas e de distribuição espacial.

Resultados e discussões

Na base de dados CT 20 o valor do índice topográfico de umidade variou de 3,4 a 24,1 com média de $6,6 \pm 0,008$ e desvio padrão de 2,1 (Tabela 1 e Figura 2). Na base de dados SRTM 30 o índice variou de 2,8 a 23,2 com média de $7,0 \pm 0,010$ e desvio padrão de 2,5 (Tabela 1 e Figura 3). Na base de dados SRTM 90 o índice variou de 4,4 a 21,7 com média de $7,5 \pm 0,017$ e desvio padrão de 2,3 (Tabela 1 e Figura 4).

O efeito da resolução foi maior entre os valores mínimos e máximos nas bases CT 20 e SRTM 90, mostrando a tendência de aumento dos valores mínimos com a diminuição da resolução (Tabela 1). Com os valores máximos ocorre o inverso, pois com a diminuição do declive médio e aumento na área de contribuição, os valores mínimos do índice aumentam e os máximos diminuem. As médias e erro padrão aumentaram conforme as resoluções diminuíram $6,6 \pm 0,008$; $7,0 \pm 0,010$; $7,5 \pm 0,017$, bases CT 20, SRTM 30 e SRTM 90, respectivamente (Tabela 1). Os resultados encontrados seguiram a mesma tendência observada por Thompson *et al.* (2001) e Straumann *et al.* (2007) que avaliaram o efeito de diferentes resoluções na determinação de atributos do terreno.

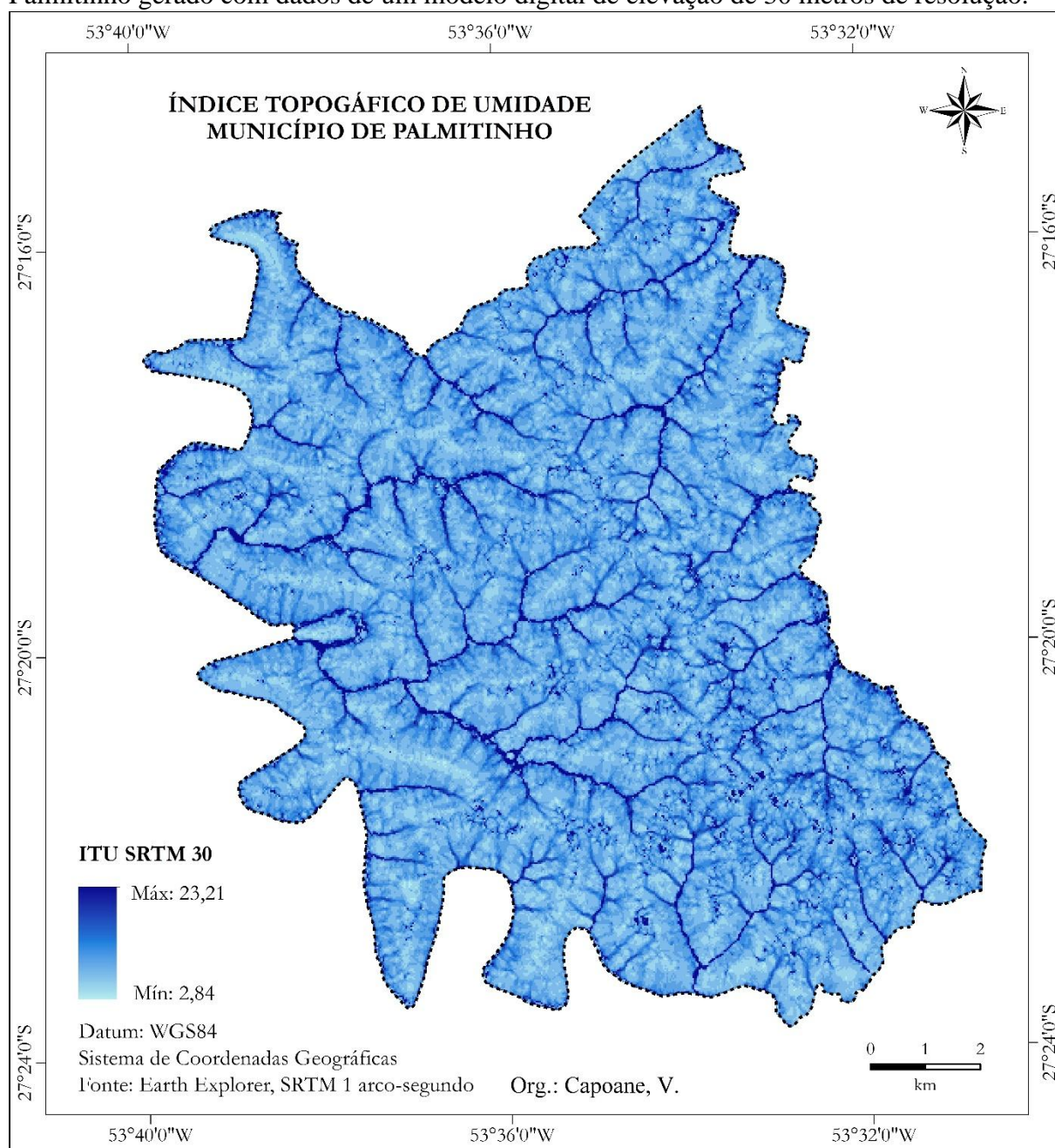
Figura 2 - Distribuição espacial do índice topográfico de umidade para o município de Palmitinho gerado com dados de um modelo digital de elevação de 20 metros de resolução.



Observa-se que as áreas com potencial de saturação tendem a aumentar enquanto a definição do canal diminui com a redução da resolução (Figuras 2, 3 e 4). O mesmo foi observado por Lane, *et al.* (2004) utilizando MDEs com resoluções de 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m e 64 m e, Zhang & Montgomery (1994) que utilizaram MDEs com resolução de 2 m, 4 m, 10 m, 30 m e 90 m.

O intervalo de variação “range” também diminuiu com a diminuição da resolução (Tabela 1). Isso revela que conforme a resolução diminui os intervalos de valores do índice também diminuem. Isso tem como consequência subestimar as áreas úmidas e superestimar as áreas secas. No MDE de resolução mais fina, CT 20 o ITU apresentou com mais detalhe as áreas com potencial de geração de escoamento. Já no ITU gerado com MDEs de resolução mais grosseira, SRTM 30 e 90, as áreas mais úmidas deslocaram-se para os fluxos efêmeros.

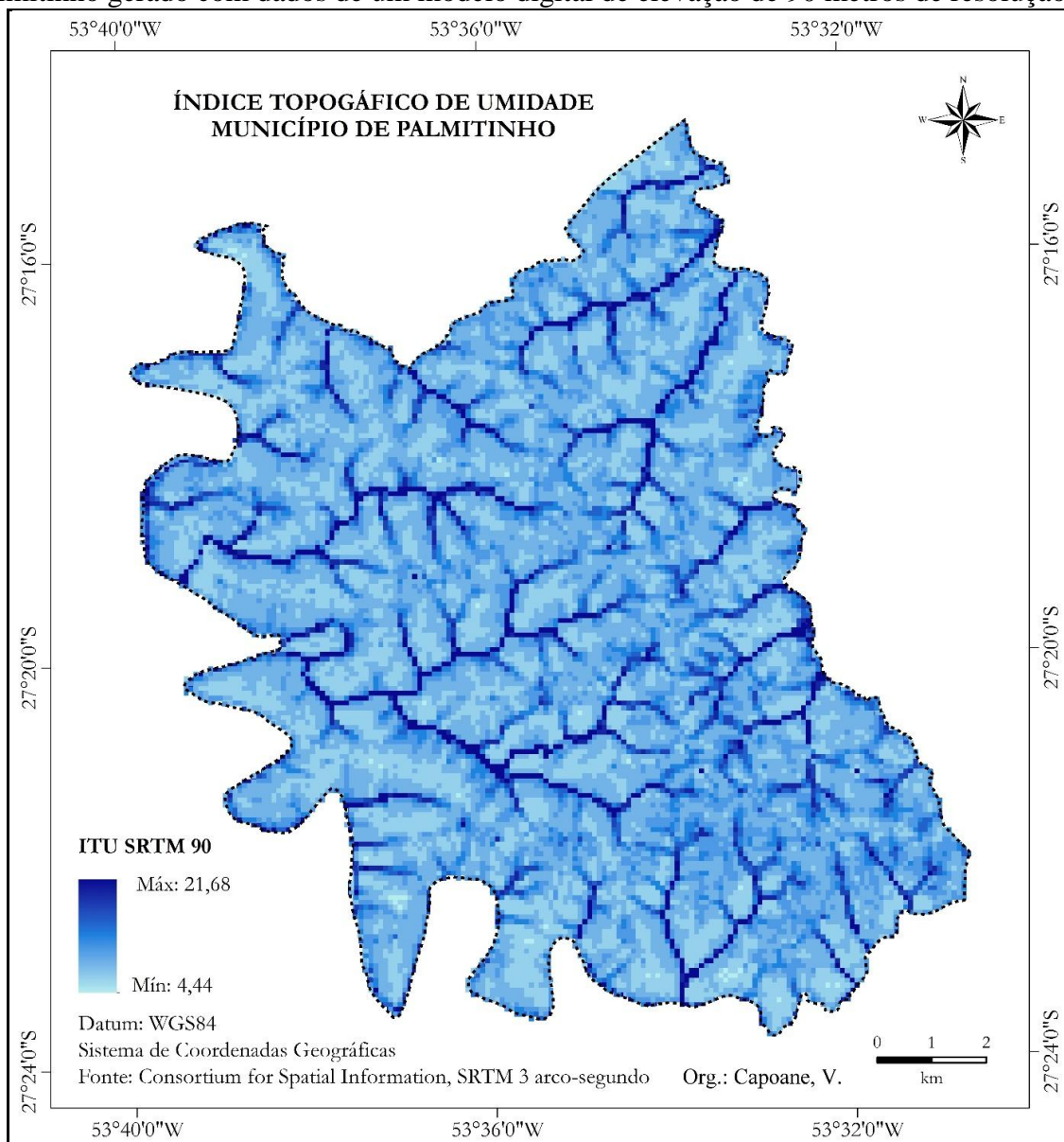
Figura 3 - Distribuição espacial do índice topográfico de umidade para o município de Palmitinho gerado com dados de um modelo digital de elevação de 30 metros de resolução.



De acordo com os mapas gerados (Figuras 2, 3 e 4), a cor azul mais escura representa as áreas com maior potencial de umidade, ou seja, áreas com maior potencial de acúmulo de água e geração de escoamento. No município de Palmitinho essas áreas estão localizadas principalmente ao longo dos cursos d'água e nascentes. As cores intermediárias representam as pendentes de curvatura convergente, locais onde os fluxos tendem a se concentrar, aumentando a umidade do solo. Estas áreas estão presentes, principalmente, no terço inferior das encostas e interflúvios mais extensos. As áreas em azul claro indicam baixa umidade do solo e estão presentes em vertentes divergentes, em locais com declive mais acentuado e solos rasos e, nos interflúvios de pequena extensão.

Os valores obtidos mostram que a resolução mais fina, CT 20, apresenta com maior detalhe as áreas com potencial de atingir saturação hídrica e gerar escoamento superficial. As áreas úmidas (azul escuro) incluem pequenos afluentes nas resoluções mais finas, mas parecem ampliar a umidade para os fluxos efêmeros nas resoluções mais grosseiras.

Figura 4 - Distribuição espacial do índice topográfico de umidade para o município de Palmitinho gerado com dados de um modelo digital de elevação de 90 metros de resolução.



O método de determinação do índice topográfico de umidade a partir de MDEs sintetiza os atributos tridimensionais do terreno com uma simples descrição do movimento da água em encostas oferecendo uma base quantitativa para interpretar o comportamento hidrológico na paisagem. Embora esta análise se limite a especificar zonas com potencial de saturação hídrica e geração de escoamento superficial, o mapa é útil para a identificação das áreas hidrológicamente sensíveis e pode ajudar no gerenciamento de atividades potencialmente poluidoras, caso do município de Palmitinho, que tem como importante fonte de arrecadação as atividades de suinocultura intensiva e avicultura. Destas atividades, a suinocultura é considerada de maior risco ambiental, devido ao seu grande potencial poluidor.

Tabela 1 - Estatística descritiva do índice topográfico de umidade gerado com modelos digitais de elevação de diferentes resoluções.

Base	Mínimo	Máximo	Range	Média	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação
CT 20	3,4	24,1	20,7	6,6±*0,008	6,1	2,1	32,2
SRTM 30	2,8	23,2	20,4	7,0±0,010	6,3	2,5	35,5
SRTM 90	4,4	21,7	17,3	7,5±0,017	6,7	2,3	31,0

* ±: erro padrão.

No município de Palmitinho, a suinocultura é responsável por 70,3% da arrecadação do imposto sobre mercadorias e serviços, envolvendo mais de 100 famílias na atividade (EMATER/RS, 2014). Conforme dados obtidos na Secretaria de Agricultura do Município, em 2015 o plantel de suínos correspondia a 88.222 suínos entre as unidades de produção de leitões e terminação, representando um aumento de 35% em relação ao último Censo Agropecuário (IBGE, 2012), cujo número de suínos era de 65.296. Esses números demonstram que a densidade demográfica de suínos do município (6,12 animais/ha) é muito maior que a densidade populacional (0,48 habitantes/ha).

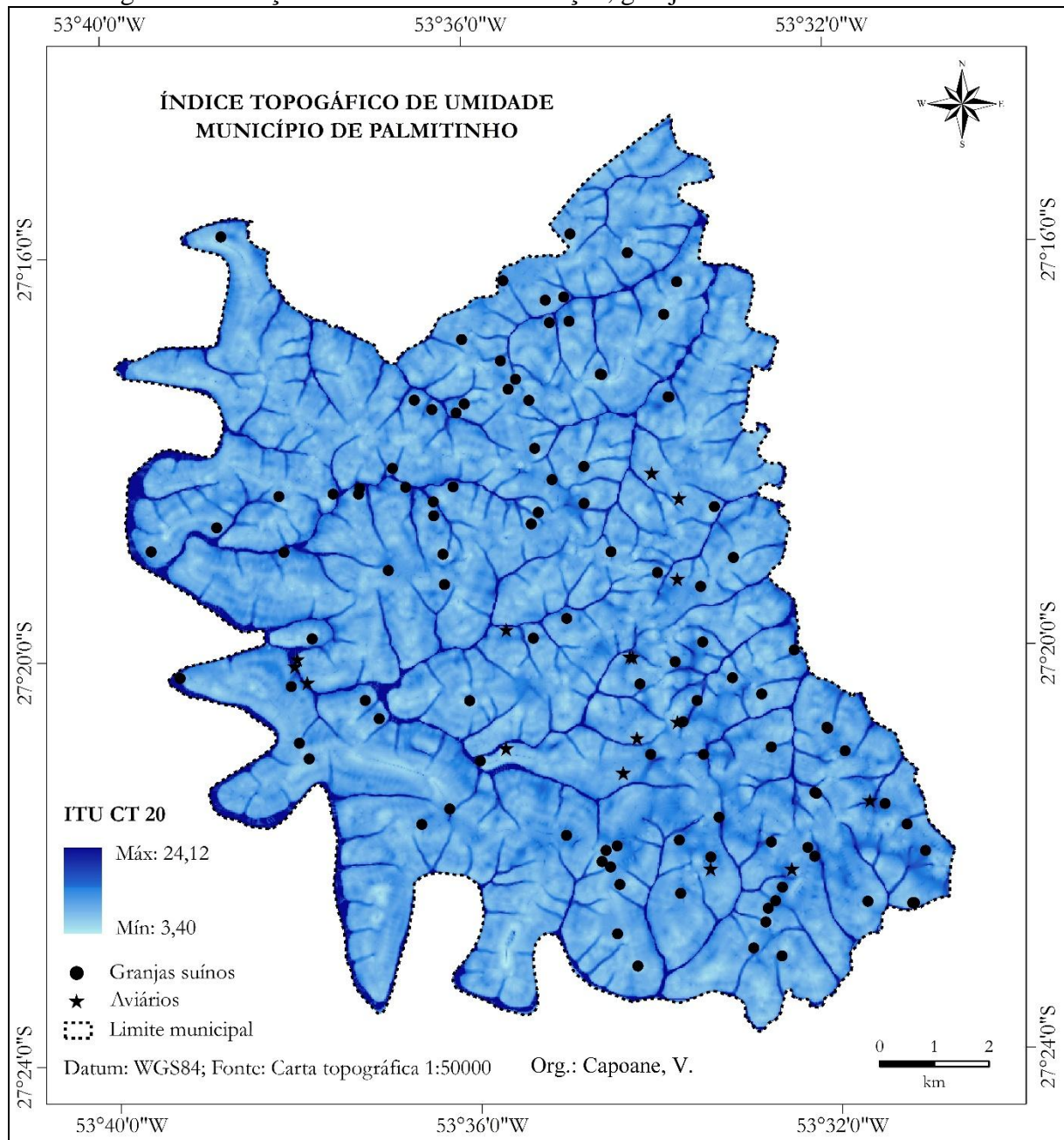
A avicultura está presente em 16 propriedades e os aviários têm capacidade para 540.000 aves. Tanto o efluente líquido de suínos quanto as camas de aviário são utilizados como fertilizante orgânico em áreas agrícolas. Embora o potencial poluidor das camas de aviário seja alto, o potencial da suinocultura é muito maior, pois o risco de transferência de contaminantes para os sistemas aquáticos da avicultura é menor do que a suinocultura cujo efluente é líquido. A distribuição espacial das granjas de suínos e aviários no município pode ser visualizada na Figura 5.

Ainda que as atividades de suinocultura e avicultura tenham grande importância econômica e social para o município, a intensificação da produção, principalmente a de suínos, tem provocado uma forte pressão sobre os recursos naturais, principalmente sobre o solo e a água. A problemática reside na dificuldade de se fazer o manejo ambientalmente adequado dos dejetos líquidos que são gerados nos sistemas confinados de produção. Atualmente, a forma predominante de manejo é o seu emprego como fertilizante orgânico em áreas agrícolas (CAPOANE *et al.*, 2014). Todavia, no município predominam pequenas propriedades rurais e, em função da área agrícola reduzida e relevo acidentado (Figura 6) - classes de declividade predominantes de 15-30% (34,2%) e 30-60% (32,6%) (Tabela 2) - a maioria das propriedades que desenvolvem a suinocultura na forma intensiva não tem condições de realizar a reciclagem dos dejetos sob a forma de fertilizante orgânico. É comum a aplicação sucessiva de efluentes em áreas agrícolas próximas as granjas, como constataram

Capoane *et al.* (2014) em trabalho realizado em uma sub-bacia do Rio Guarita no município de Palmitinho.

Considerando que os solos não são sumidouros infinitos para os nutrientes presentes no efluente como metais, fósforo e nitrogênio, a aplicação continuada a uma taxa que excede as exigidas pelas culturas, aumenta sobremaneira os riscos de perdas, principalmente durante eventos pluviométricos (poluição difusa) e isso pode ameaçar a qualidade da água dos mananciais. Como agravante, os sistemas de armazenamento são sub-dimensionados (CAPOANE *et al.*, 2014), assim, nos períodos em que as lavouras estão em fase intermediária de desenvolvimento impossibilitando a entrada de maquinário para a distribuição do efluente, há descarte direto no ambiente em dias de chuva (poluição pontual).

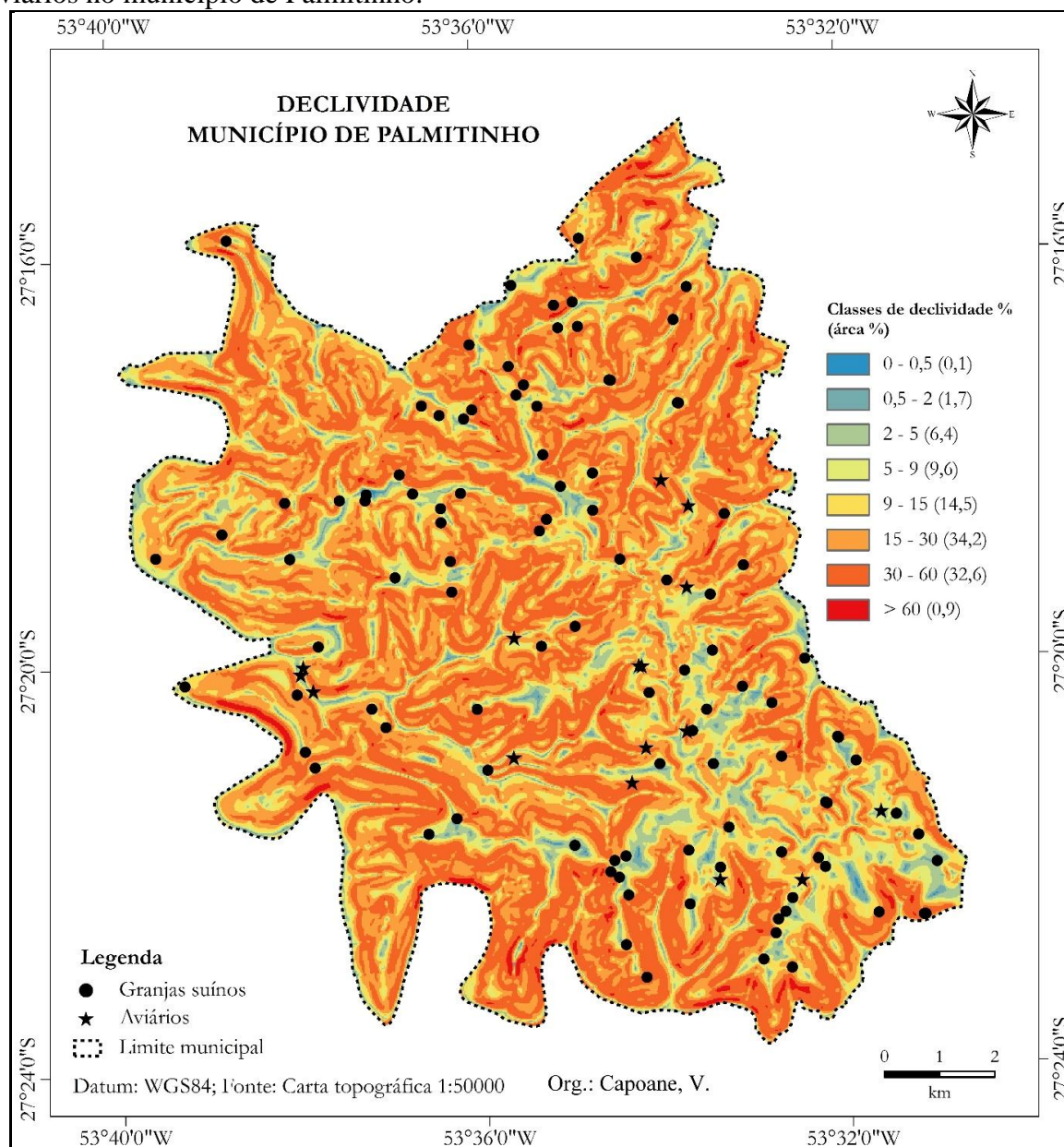
Figura 5 - Distribuição espacial do índice topográfico de umidade gerado com dados de um modelo digital de elevação de 20 metros de resolução, granjas de suínos e aviários.



Observa-se também na Figura 5, que muitas das granjas de suínos encontram-se em áreas com maior potencial de atingir saturação hídrica e gerar escoamento superficial. Dessa forma, existe um risco elevado de transferência de poluentes dos sistemas terrestres para os 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. No município de Palmitinho o dejetos líquidos de suíno é aplicado majoritariamente superficialmente, aumentando assim os riscos de transferência de contaminantes/poluentes para os cursos d'água.

Figura 6 - Distribuição espacial das classes de declividade geradas com dados de um modelo digital de elevação de 20 metros de resolução com a localização das granjas de suínos e aviários no município de Palmitinho.



Nos anos de 2012 e 2013 Capoane *et al.* (2014; 2015), realizaram um monitoramento da qualidade da água em uma sub-bacia hidrográfica com suinocultura intensiva que drena para o Rio Guarita, inserida no município de Palmitinho. Os resultados obtidos pelos autores comprovaram que as atividades agropecuárias desenvolvidas na sub-bacia estavam impactando a qualidade das águas superficiais. As concentrações de P solúvel e de NO_3^- foram maiores nos pontos de coleta amostrados em áreas bastante antropizadas, próximas a estrebarias, granjas de suínos e lavouras onde o dejetos líquido de suínos era utilizado como fertilizante. Os autores observaram um aumento nas concentrações de elementos químicos de origem antropogênica no sentido nascente – exutório, sendo que as maiores concentrações foram observadas no médio curso e, à medida que ia entrando água de tributários menos impactados houve uma diluição nas concentrações.

Capoane *et al.* (2016), também avaliaram a qualidade do sedimento de fundo de rios nesta mesma sub-bacia. Os teores totais de metais e não metais obtidos pelos autores, além de refletir as condições naturais do substrato geológico, refletiram as atividades agropecuárias desenvolvidas na bacia hidrográfica. Conforme os autores, o aumento nas concentrações de alguns deles é motivo de preocupação, uma vez que os metais têm capacidade de bioacumulação nos tecidos da biota e podem afetar também a distribuição e densidade de organismos bentônicos bem como a composição e diversidade das comunidades e, efeitos tóxicos já podem estar ocorrendo na biota aquática da bacia hidrográfica.

Tabela 2 - Quantificação das classes de declividade do município de Palmitinho, utilizando o modelo digital de elevação de 20 metros de resolução espacial (CT 20).

Declividade %	Área %	Relevo
0 - 0,5	0,1	Nível depressional
0,5 - 2	1,7	muito levemente declivoso
2 - 5	6,4	levemente declivoso
5 - 9	9,6	moderadamente declivoso
9 - 15	14,5	fortemente declivoso
15 - 30	34,2	acentuadamente declivoso
30 - 60	32,6	declive muito acentuado
> 60	0,9	extremamente declivoso

Dada a gravidade do problema, ferramentas capazes de determinar a distribuição espacial de áreas propensas à saturação hídrica, com a delimitação das áreas de maior risco de transferência de poluentes para os sistemas aquáticos em bacias hidrográficas, podem auxiliar os gestores na identificação de locais prioritários. Assim, estas áreas podem ser protegidas de atividades potencialmente poluidoras, tais como implantação de novas granjas e aplicações de dejetos animais em terras agrícolas hidrologicamente sensíveis, principalmente as próximas a cursos d'água e nascentes.

Cabe ressaltar que, embora o ITU derivado do MDE CT 20 tenha representado com maior detalhamento as áreas com potencial de saturação hídrica no município, as informações contidas nas cartas topográficas da Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) do Exército foram geradas a partir de levantamentos nas décadas de 60/70. Dependendo da finalidade do trabalho, os dados SRTM, embora de resolução mais grosseira (30 metros), são mais recentes e de grande aceitação (gerados a partir de dados de radar de abertura sintética – SAR - durante a *Radar Topography Mission* no ano 2000), podendo ser adequados, principalmente em face de escassez de dados de outras fontes.

Conclusão

A comparação entre os índices calculados em diferentes resoluções revelou que conforme a resolução dos modelos digitais de elevação diminui os intervalos de valores do índice topográfico de umidade também diminuem. Isso tem como consequência subestimar áreas úmidas e superestimar as áreas secas conforme as resoluções se tornam mais grosseiras. O MDE de resolução mais fina, CT 20, apresentou com mais detalhe as áreas com potencial de saturação e geração de escoamento superficial.

O mapa do ITU gerado com dados da carta topográfica na escala 1:50.000 pode dar suporte à gestão ambiental do município, uma vez que melhor separou as áreas hidrologicamente sensíveis, ou seja, as áreas com maior potencial de saturação hídrica e que são preferenciais na formação do escoamento superficial, consequentemente, sujeitas a transferência de poluentes para os sistemas aquáticos.

Referências

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

CAPOANE, Viviane; TIECHER, Tales; SCHAEFER, Gilmar Luis; ALVAREZ, Jimmy Walter Rasche; BURROW, Robert Alan; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos. Avaliação da qualidade dos sedimentos de leito em uma bacia hidrográfica do noroeste do Rio Grande do Sul. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v.42, n.2, p.1-20, 2016.

CAPOANE, Viviane; TIECHER, Tales; SCHAEFER, Gilmar Luis; CIOTTI, Lucas Henrique; SANTOS, Danilo Rheinheimer. Transferência de nitrogênio e fósforo para águas superficiais em uma bacia hidrográfica com agricultura e produção pecuária intensiva no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v.45, p.647-650, 2015.

CAPOANE, Viviane; TIECHER, Tales; SCHAEFER, Gilmar Luis; SANTOS, Danilo Rheinheimer 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, n.2, p.494-509, 2014.

CUNHA, Noel Gomes da; SILVEIRA, Ruy José da Costa; KOESTER, Ediney; OLIVEIRA, Leondres Duarte de; ALBA, José Maria Filippini; COSTA, Fábria Amorim da; TERRES, Vinícius Cantarelli; LOPES, Rodrigo Thiel. Estudos de Solos do Município de Palmitinho, RS. **Documentos**(Circular Técnica, Embrapa Clima Temperado), v.105, p.1-28, 2010.

DUNNE, Thomas; BLACK, Richard D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. **Water Resources Research**, v.6, p.1296-1311, 1970.

DUNNE, Thomas; MOORE, Tim R.; TAYLOR, Colin H. Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. **Hydrological Sciences Bulletin**, v.20, p.305-327, 1975.

EMATER (2014). Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/noticias/detalhe-noticia.php?id=20468#.VenmuVlViko>. Acesso em: 10 de fev. 2016.

FRANKENBERGER, Jane R.; BROOKS, Erin S.; WALTER, M. Todd; WALTER, Michael F.; STEENHUIS, Tammo S. A GIS-based variable source area model. **Hydrological Processes**, v.13, n.6, p.804-822, 1999.

HEWLETT, John D.; HIBBERT, A. R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid regions. In: **Forest Hydrology**. SOPPER, William E.; LULL, Howard W. (eds.) Pergamon Press, Oxford. p.275-290, 1967.

HORTON, Robert E. The role of infiltration in the hydrological cycle. **Transactions of the American Geophysical Union**, v.14, p.446-460, 1933.

HUTCHINSON, Michael F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v.106, n.3-4, p.211-232, 1989.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário**, 2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/ppm/2012/>. Acesso em: 20 de jan. 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico**, 2010. Disponível em: <http://loja.ibge.gov.br/atlas-do-censo-demografico-2010.html>. Acesso em: 05 de jan. 2016.

LANE Stuart N.; BROOKES, Christopher J.; KIRKBY, Mike J.; HOLDEN, Joseph. A network-index-based version of TOPMODEL for use with high-resolution digital topographic data. **Hydrological Processes**, v.18, n.1, p.191-201, 2004.

MOORE, Ian D.; GRAYSON, Rodger B.; LADSON, Tony. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrologic Processes**, v.5, n.1, p.3-30, 1991.

QUINN, P. F.; BEVEN, Keith J.; LAMB, R. The $\ln(a/\tan b)$ index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework. **Hydrological Processes**, v.9, n.2, p.161-182, 1995.

ROSSATO, Máira Suertegaray. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. 240f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses. Disponível em: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>. Acesso em: 05 de jun. 2016.

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

STRAUMANN, Ralph K.; PURVES, Ross S. Resolution sensitivity of a compound terrain derivative as computed from LiDAR-based elevation data. FABRIKANT, Sara Irina; WACHOWICZ, Monica (eds.) **Lecture Notes in Geoinformation and Cartography**. The European Information Society - Leading the Way with Geo- Information, Proceedings of AGILE 2007, 8-11 May 2007, Aalborg, Denmark, p.87-109, 2007.

THOMPSON, James A.; BELL, Jay C.; BUTLER, Charles A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. **Geoderma**, v.100, p.67-89, 2001.

VALERIANO, Márcio de Morisson; ROSSETTI, Dilce de Fátima. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography** (Sevenoaks), v. 32, p.300-309, 2011.

WALTER, M. Todd; WALTER, Michael F.; BROOKS, Erin S.; STEENHUIS, Tammo S.; BOLL, Jan; WEILER, Kirk. 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.

WARD, Roy C. On the response to precipitation of headwater streams in humid areas. **Journal of Hydrology**, v.74, p.171-189, 1984.

ZHANG, Weihua; MONTGOMERY, David R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **WaterResourcesResearch**, v.31, n.4, p.1019-1028, 1994.

Artigo recebido em 19-09-2016

Artigo aceito para publicação em 29-07-2017