



**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

**HIDROGEOMORPHOLOGICAL MODELING OF SATURATED AREA DYNAMICS ON CORREDEIRAS RIVER
CATCHMENT, RIO NEGRINHO – SC**

Marcelo Ng Wei Ban Hung¹, Cesar Augusto Crovador Siefert², Irani dos Santos³

RESUMO

A dinâmica espaço-temporal das áreas saturadas em bacias hidrográficas é controlada pela ocorrência de eventos pluviométricos e pelas características topográficas e físico-hídricas dos solos. Estas áreas atuam como fontes primárias de escoamento e o entendimento do seu comportamento hidrológico é fundamental para a descrição do funcionamento de bacias hidrográficas. Este artigo apresenta a avaliação e descrição dos padrões de umidade do solo na bacia do rio Corredeiras (117 km²), localizada na região sul brasileira, a partir da utilização do TOPMODEL em escala horária. Para o índice topográfico, utilizou-se e validou-se o algoritmo proposto por Böhner & Selige (2006) que considera um limite superior para as áreas de contribuição, minimizando valores de índice topograficamente inconsistentes. O modelo TOPMODEL foi calibrado de maneira semiautomática para simulação dos mecanismos de geração de escoamento em escala horária obtendo um COE médio de 0,7 para todo o período. As áreas saturadas variaram de 9% a 23% da área total da bacia. No processo de validação dos resultados da simulação em campo, o modelo foi capaz de representar as áreas com as maiores probabilidades de saturação, sobretudo em locais como as áreas de banhado permanentes, planícies fluviais dos canais de drenagem com grande área de contribuição e os terraços fluviais, além da ocorrência de áreas de saturação temporária que correspondem as porções de transição entre as vertentes e zonas ripárias.

PALAVRAS-CHAVE: área variável de afluência, probabilidade de saturação, TOPMODEL.

ABSTRACT

Spatial and temporal dynamics of saturated areas on catchments are triggered by rainfall events and soil physical properties. Saturated areas are the main sources of runoff and understanding their hydrological behavior is essential for describe catchment functioning. Our work shows an assessment and a description of soil wetness patterns on Corredeiras river catchment (117 km²), in southern Brazil, through hydrological modelling approach with TOPMODEL on hourly resolution. For topographical index, we tested the Böhner & Selige (2006)'s algorithm, which uses an upper limit for delineating contribution area, decreasing the misrepresentation of topographical features. TOPMODEL was calibrated using a semi-automatic method for simulation of streamflow generation processes with a COE higher than 0,7. Saturated areas dynamics shows a variability of 9% up to 23% of the catchment area. A fieldwork was conducted for validation purposes of the results emphasizing the model ability to represent areas with higher probability of saturation mainly wetland areas, floodplains with large contribution areas and fluvial terraces and temporary saturated areas as hillslopes and riparian zones intersection.

KEY-WORDS: variable source area, probability of saturation, TOPMODEL.

Recebido em: 15/05/2017

Aceito em: 20/06/2017

¹ Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, e-mail: marcelo.hung1@gmail.com

² Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, e-mail: cesarsiefert@gmail.com

³ Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, e-mail: irani@ufpr.br

SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

1. INTRODUÇÃO

As áreas saturadas (AS) são áreas da bacia hidrográfica que possuem dinâmica espacial e temporal de condições de saturação plena do perfil do solo de acordo com a ocorrência de eventos pluviométricos (HEWLETT & HIBBERT, 1967). Assim, a água infiltra-se no solo e altera a posição do nível freático, podendo fazer com que este chegue ao mesmo nível da superfície e atinja a saturação em toda extensão vertical (DUNNE, 1983; AMBROISE, 2004; MCDONNELL, 2013). Neste sentido, o escoamento por saturação é produzido pela precipitação direta sobre as AS e pela contribuição subterrânea resultante do afloramento da superfície freática (escoamento de retorno) (DUNNE & BLACK, 1970).

Este processo depende das características topográficas, da precipitação e da umidade inicial do solo, que influenciam diretamente na expansão e na contração das AS e da rede de drenagem da bacia hidrográfica. Deste modo, na década de 60, alguns autores propuseram o conceito de área variável de afluência (AVA) (TSUKAMOTO, 1963; HEWLETT & HIBBERT, 1963; 1967) e o escoamento subsuperficial passou a ser reconhecido como um dos processos mais importantes na geração do escoamento devido a sua extensão espacial variável evidenciando a conectividade entre processos.

O conceito de AVA surgiu no contexto no qual foi constatado que em bacias hidrográficas com grande cobertura vegetal, o escoamento direto não é produzido ao longo de toda a superfície da bacia, ou seja, é influenciado por uma área de origem dinâmica a qual sofre expansões e contrações, que geralmente ocupam uma pequena fração (em média 10%) da área total da bacia, podendo variar de 1% a 50%, dependendo de fatores como a quantidade e intensidade da precipitação que atinge a região (DICKINSON & WHITELEY, 1970). O escoamento por excesso de saturação é predominante em bacias de tamanho médio (1 – 10.000 km²), no qual a proporção de áreas planas ao longo dos rios é maior com relação a área de drenagem

total, pois geralmente o gradiente topográfico médio decresce se a área da bacia aumentar (SANTOS et al., 2013).

A ocorrência das AVAs na paisagem faz com que exista o aumento da largura do canal e a formação de canais intermitentes, expandindo a área que contribui diretamente para o escoamento superficial (LATRON & GALLART, 2007). Segundo Santos (2001), essas áreas podem produzir escoamento superficial mesmo quando a intensidade da precipitação é inferior à capacidade de infiltração média da bacia. Neste sentido, a diferença entre as AS e a dinâmica espaço-temporal das AVAs, se dá pela conectividade hidrológica entre as AS no qual gera o processo de AVA.

Além disso, um aspecto ambientalmente importante das AS e da AVA é que elas apresentam uma biodiversidade distinta com fauna e flora adaptadas às condições de variação da saturação do ambiente, e deste modo, essas áreas possuem grande importância ambiental e devem ser preservadas (SANTOS & KOBAYAMA, 2008), pois fornecem uma base científica para a definição e localização das áreas de preservação dentro de bacias hidrográficas (SIEFERT, 2012).

Diversos estudos (AGNEW et al., 2006; EASTON et al., 2008; WALTER et al., 2009; SIEFERT & SANTOS, 2010; SILVA, 2012; SIEFERT & SANTOS, 2015) buscam descrever os mecanismos de geração de escoamento em bacias a partir de modelos hidrogeomorfológicos (i.e. TOPMODEL, SWAT-VSA, Soil Moisture Routine, GHSSA) com o objetivo de delimitar áreas com maior probabilidade de saturação hídrica, e consequentemente, áreas com maior potencial de gerar escoamento superficial e transportar sedimentos e poluentes em direção aos canais.

O TOPMODEL (*Topography-based hydrological model*) (BEVEN & KIRKBY, 1979) constitui-se como um modelo de simulação de base física para descrição da dinâmica das AS. Este modelo leva em conta o processo de AVA aplicado à formação de escoamento superficial por saturação, com destaque na dinâmica das áreas de contribuição superficiais e subsuperficiais. A teoria e equacionamento do

SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

TOPMODEL foi descrita em Silva & Kobiyama (2007).

A dinâmica e distribuição das AS é baseada na distribuição do índice topográfico (IT) (SILVA & KOBİYAMA, 2007). O IT é utilizado para caracterizar a distribuição espacial das AS, demonstrando os efeitos do relevo na localização e extensão das áreas de acumulação mais propícias a chegarem ao estado de saturação (SCHULER et al., 2000).

O IT é definido pela razão entre a área de contribuição e a tangente da declividade local, sendo calculado a partir de um modelo digital do terreno da bacia hidrográfica. Quanto maior o valor do IT comparativamente em uma bacia hidrográfica, maior será a sua propensão a atingir o estado de saturação e apresentar um maior volume de umidade no solo (LYON et al., 2004; SCHNEIDERMAN et al., 2007).

Alguns estudos modificaram a equação original do IT em função da incorporação da transmissividade do solo (WALTER et al., 2002; LYON et al., 2004), alterações na forma de cálculo do gradiente hidráulico (HJERDT et al., 2004) ou ainda incorporando características físicas do solo na sua formulação (YU et al., 2016).

Böhner & Selige (2006) propuseram uma modificação na área de contribuição considerando um limite superior para as áreas de contribuição, ou seja, para cada valor de declividade é determinado uma área de contribuição máxima. Deste modo, valores maiores que esses limites são homogeneizados, principalmente em áreas de fundo de vale, cujo o objetivo é minimizar a existência de valores aleatórios e fora do padrão em áreas mais planas.

Conforme Böhner & Selige (2006), a equação original do IT produz uma representação

adequada dos relevos montanhosos, porém, em áreas muito planas como os vales, o IT produz pequenas diferenças de altitude que podem gerar formas de escoamento fora das características das áreas planas. Portanto, esta modificação na área de contribuição prevê uma melhor representação das áreas com maior probabilidade de saturação em áreas mais planas.

Neste contexto, o presente trabalho visa descrever a dinâmica espaço-temporal da umidade do solo na bacia do rio Corredeiras – SC, com o objetivo de estimar a probabilidade de saturação e avaliar a relação entre o uso da terra e os processos hidrogeomorfológicos que ocorrem na área de estudo. Para isto, foi utilizado o modelo TOPMODEL para simulação da dinâmica hidrológica em escala horária. Além disso, realizou-se um comparativo entre a versão original do IT e o índice topográfico modificado (ITM) proposto por Böhner & Selige (2006) para delimitação de AS e a sua validação em campo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Corredeiras (Figura 1) possui 117 km² de área total, está inserida na bacia do rio Iguazu e localiza-se no município de Rio Negrinho, no planalto norte do estado de Santa Catarina. O clima da região é classificado como *Cfb*, de acordo com a classificação de Koppen, portanto clima temperado com estações bem definidas ao longo do ano, com precipitações bem distribuídas e sem período de seca definido.

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
 CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

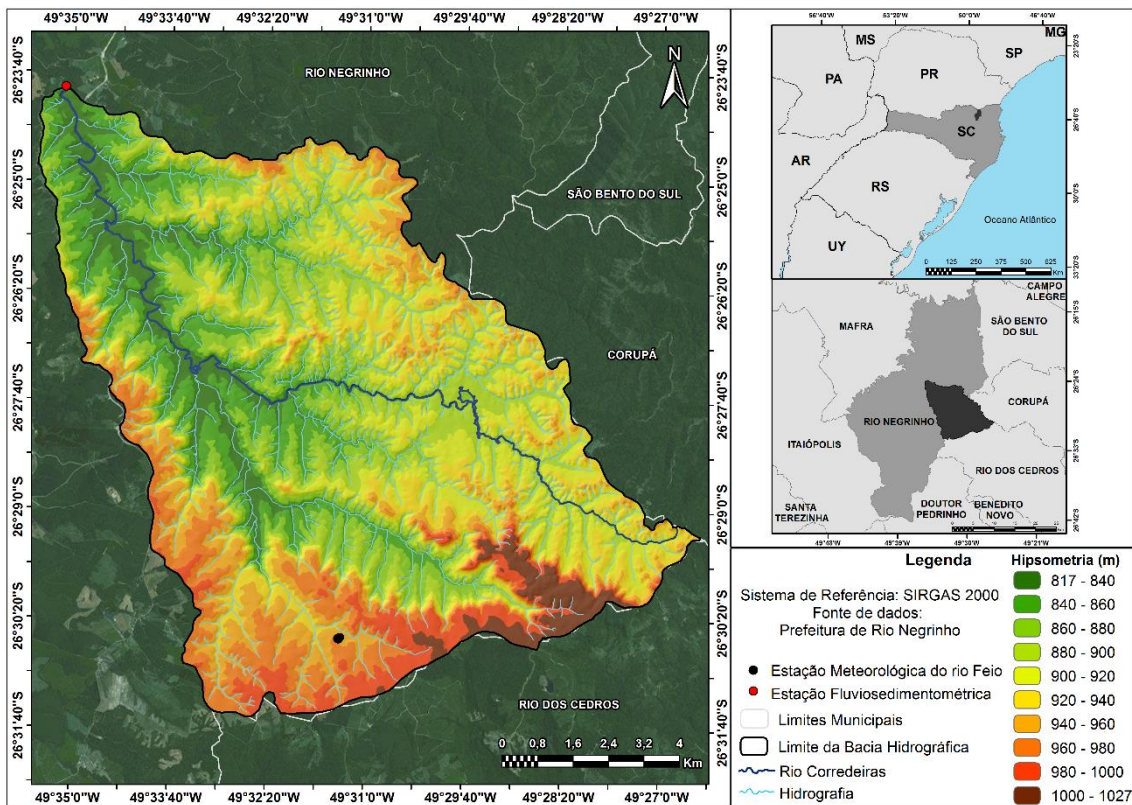


Figura 01 - Localização e hipsometria da bacia hidrográfica do rio Corredeiras.

A hipsometria da área de estudo varia de 817 m a 1027 m sendo que as características geomorfológicas da bacia variam de relevos com superfície regular, quase planos e de baixa energia (0 – 3% de declividade), a relevos intermediários ondulados formados por superfícies colinosas, além de áreas escarpadas

como na região sul e oeste, nas quais apresentam um relevo com declividades acima de 45 % (Figura 2).

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

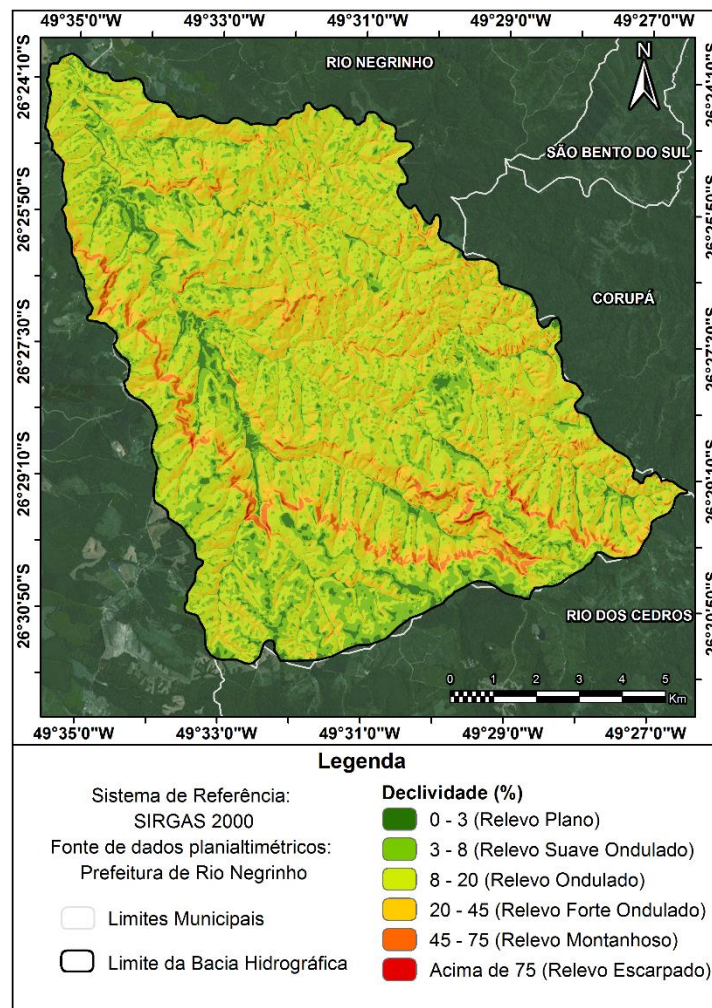


Figura 02 - Declividade da bacia do rio Corredeiras.

Já as classes de uso da terra (Figura 3) predominantes são a mata nativa (Floresta Ombrófila Mista) com 51,9 %, reflorestamento de *Pinus taeda* com 27,8 % e áreas de campo com 15,1 % da área total da bacia. Outros usos

incluem áreas de cultivo que representam 3,5 %, estradas não pavimentadas com 1,4 % e açudes com 0,3 % da área total da bacia.

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
 CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

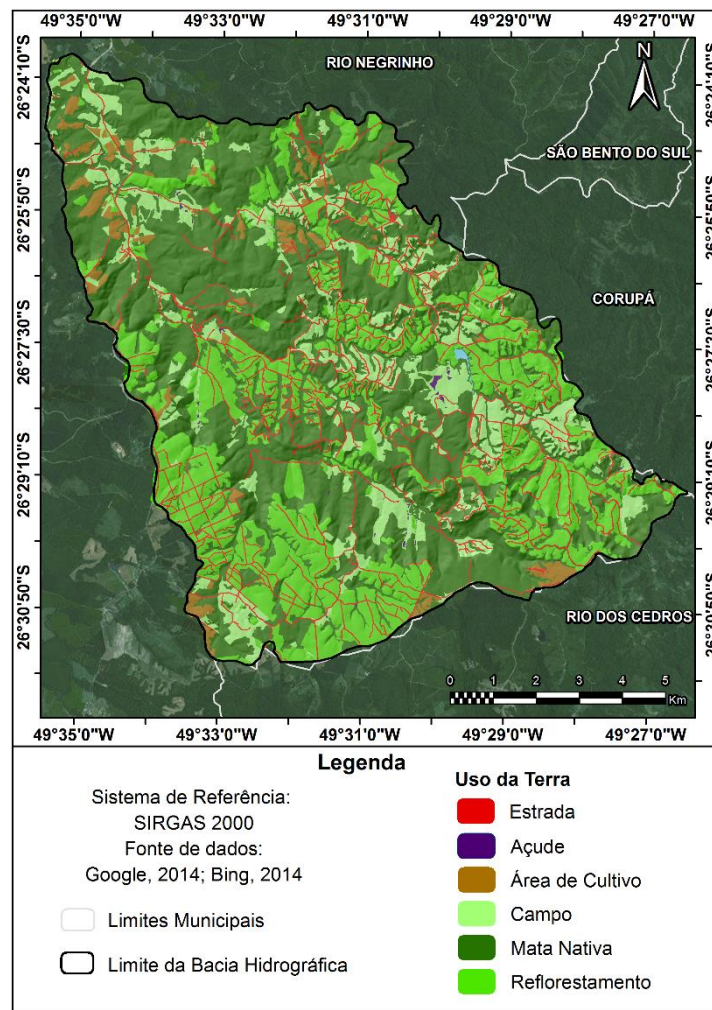


Figura 03 - Uso da terra da bacia do rio Corredeiras para o ano de 2014.

2.2 ÍNDICE TOPOGRÁFICO E ÍNDICE TOPOGRÁFICO MODIFICADO

Para gerar o índice topográfico (IT) e o índice topográfico modificado (ITM), inicialmente fez-se necessário a geração do modelo digital do terreno (MDT), sendo que utilizou-se dados em escala 1:25.000 (PMRN, 2006), referente aos pontos cotados, curvas de nível e hidrografia. O algoritmo utilizado para geração do MDT com resolução de 10 m foi o ANUDEM implementado no ArcMap 9.3 como *topo to raster*.

A partir do MDT, foi gerado o IT no *software* SAGA GIS 2.1.2 utilizando a direção do fluxo com direções infinitas (para o cálculo da área de contribuição) e a declividade.

Já a versão modificada (ITM) também foi gerado no *software* SAGA GIS 2.1.2 e conforme

Böhner & Selige (2006), este índice é calculado pela seguinte equação:

$$ITM = \ln \left(\frac{Acm}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

Onde *Acm* corresponde à área de contribuição modificada e $\tan \beta$ a declividade, sendo que *Acm* é determinado a partir da seguinte equação empírica:

$$Acm = A_{max} \left(\frac{1}{15} \right)^{\beta \exp(15\beta)} \quad (2)$$

Onde *A_{max}* é a área de contribuição máxima para cada valor de declividade.

2.3 DADOS DE ENTRADA DO MODELO TOPMODEL

Para simulação foram utilizados dados horários de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão entre 22/08/2012 a 08/06/2013. Os dados de vazão foram obtidos através da estação hidrossedimentométrica do rio Corredeiras (Figura 1), enquanto que os dados de precipitação e meteorológicos foram obtidos pela estação meteorológica do rio Feio (Figura 1). A evapotranspiração total diária foi calculada pelo método de Penman Modificado (DOORENBOS & PRUIT, 1992) e posteriormente distribuída para a escala horária.

Foi utilizado o TOPMODEL versão 97.01, que possui cinco parâmetros que exigem calibração com valores médios para a bacia, sendo eles: m é a função da transmissividade exponencial (adimensional); $\ln(TO)$ é o logaritmo natural de transmissividade do solo saturado (m^2/h); $Srmax$ é o armazenamento máximo de água na zona das raízes (m); $Srlnit$ é o déficit de armazenamento inicial na zona das raízes (m) e $ChVel$ é a velocidade de propagação do escoamento (m/h).

A probabilidade de saturação (P_{sat}) da bacia do rio Corredeiras foi calculada de acordo com a proposta de Walter et al., (2000), conforme a seguinte equação:

$$P_{sat} A_i = \frac{\sum n_{sat}}{\sum n_{tt}} \quad (3)$$

Onde n_{sat} é o número de dias em que o pixel A_i permaneceu saturado produzindo escoamento superficial e n_{tt} é o número total de dias do período simulado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO E DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO MODIFICADO NA REPRESENTAÇÃO DO RELEVO

O IT e o ITM da bacia hidrográfica do rio Corredeiras (Figuras 4 e 5) variaram de 2 a 24 e de 1 a 11 respectivamente. Os valores mais baixos de ambos os índices correspondem às áreas que, do ponto de vista geomorfológico, estão em posições do relevo não propícias à saturação hídrica e em sua grande maioria localizam-se nos terços superiores das vertentes.

Por outro lado, os maiores valores do IT e do ITM situam-se em posições do relevo com menores declividades propensos a uma maior probabilidade de saturação hídrica periódica ou permanente do solo. Portanto, são áreas de grande umidade e contribuem diretamente para a manutenção da vazão mínima dos rios (FREER et al., 2002).

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

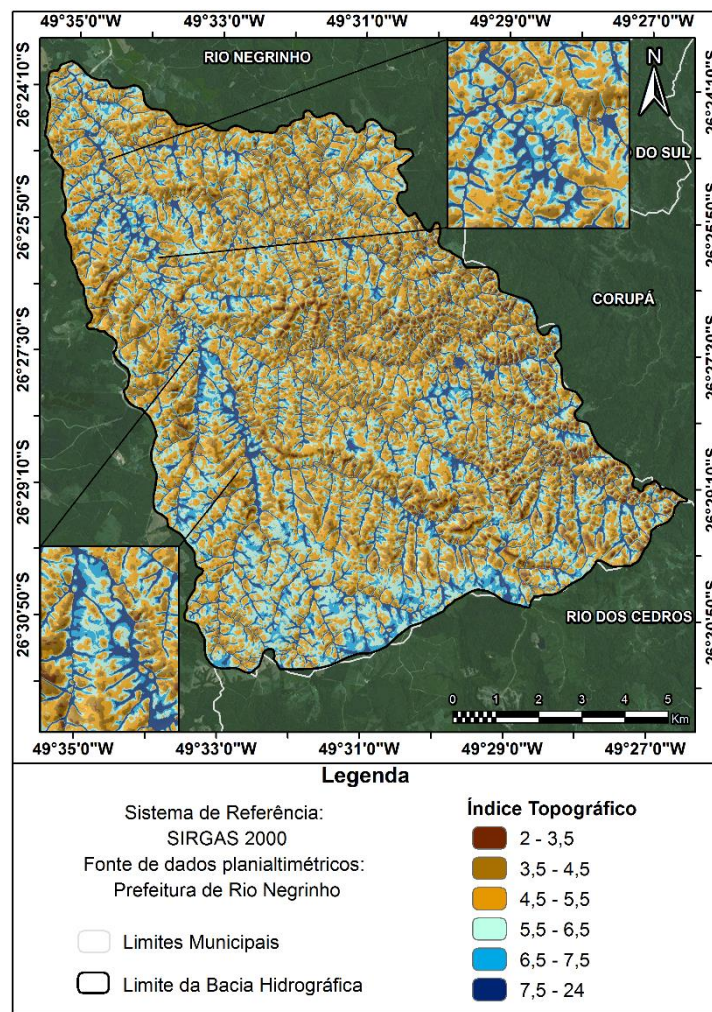


Figura 04 - IT da bacia do rio Corredeiras.

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
 CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

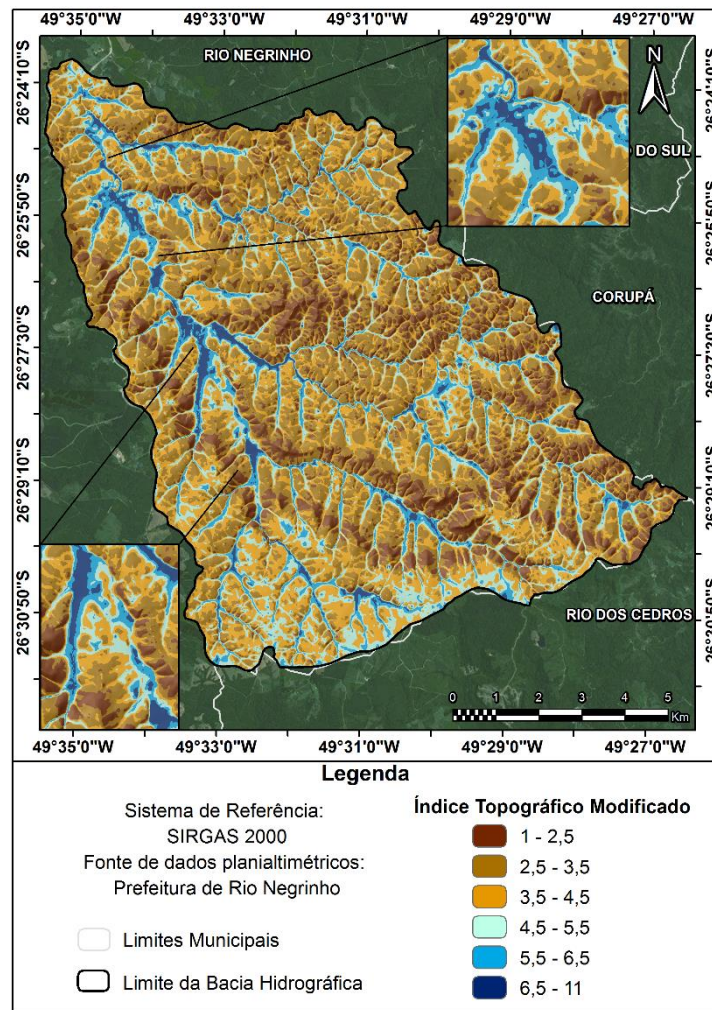


Figura 05 - ITM da bacia do rio Corredeiras.

Além disso, essas áreas estão nitidamente associadas com as AS, sendo que em um evento de precipitação, são as primeiras áreas a atingirem o estado de saturação hídrica do solo a medida em que a precipitação se prolonga. De modo geral, os resultados alcançados são semelhantes aos obtidos em Böhrner & Selige (2006), onde comparou-se o IT com o ITM, evidenciando que o ITM representa as áreas planas de forma mais próxima da realidade.

A Figura 6-A mostra a relação da proporção de área da bacia hidrográfica do rio Corredeiras com os valores do IT e ITM. Já o

Figura 6-B apresenta o IT e o ITM acumulado associado a área da bacia hidrográfica. Ambos os gráficos demonstram que os dois índices apresentaram características semelhantes. Pode-se observar que o ITM, por utilizar o limite máximo de área de contribuição para cada valor de declividade, proporciona valores absolutos menores que os do IT. Desta maneira, no ITM os valores de área de contribuição maiores que esses limites são homogeneizados principalmente em áreas mais próximas da rede de drenagem, cujo o objetivo é minimizar a existência de valores fora do padrão em áreas planas.

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

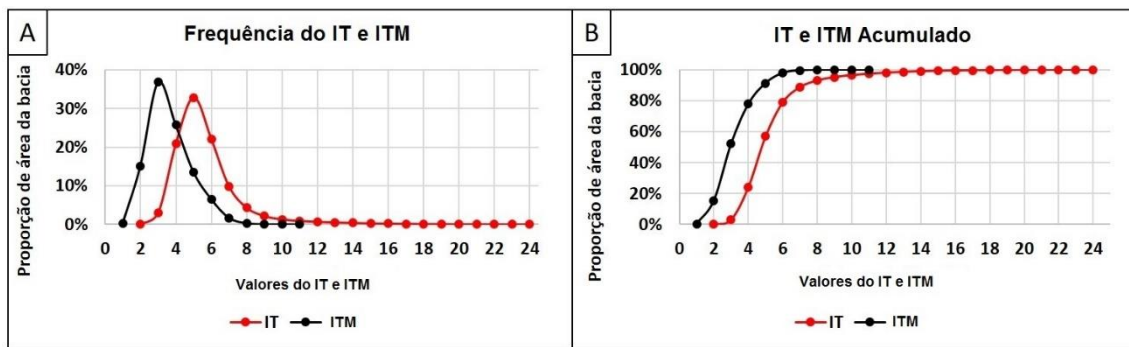


Figura 06 - IT e ITM em frequência (A) e acumulado (B).

Ao comparar o IT e o ITM (Figura 7), observa-se que nas áreas de planície fluvial e em alguns locais da rede de drenagem o IT apresentou áreas com inconsistências nos vales e zonas ripárias (Figura 7-C). Nota-se que as áreas de planície fluvial e de rede de drenagem não deveriam apresentar essas superfícies com baixos valores de IT, uma vez que se tratam de áreas mais planas com as menores declividades e grandes áreas de contribuição a montante, notadamente constituem-se como as áreas mais úmidas.

Fazendo a mesma comparação com o ITM (Figura 7-D), observa-se que este não apresenta os mesmos problemas de inconsistência, pois nota-se que, nas áreas de planície fluvial e nos canais de drenagem o ITM representou melhor as áreas com maior umidade, sem a presença de discontinuidades e

inconsistências. Além disso, a topografia demonstra que esses locais possuem características de áreas de convergência de fluxo dos canais de drenagem da bacia, sendo evidenciado também quando comparado com a hipsometria local (Figuras 7-A e 7-B).

Essa diferença entre o IT e o ITM é justificada também através do cálculo da área de contribuição modificada, que prevê uma melhor representação das áreas mais planas como os vales, reduzindo possíveis inconsistências na elaboração do IT, uma vez que a equação original do IT gera uma representação apropriada dos relevos montanhosos, porém, em áreas muito planas, o IT produz pequenas diferenças de altitude que podem gerar escoamentos fora das características das áreas planas (BÖHNER & SELIGE, 2006).

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
SIMULAÇÃO HIDROGEOFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

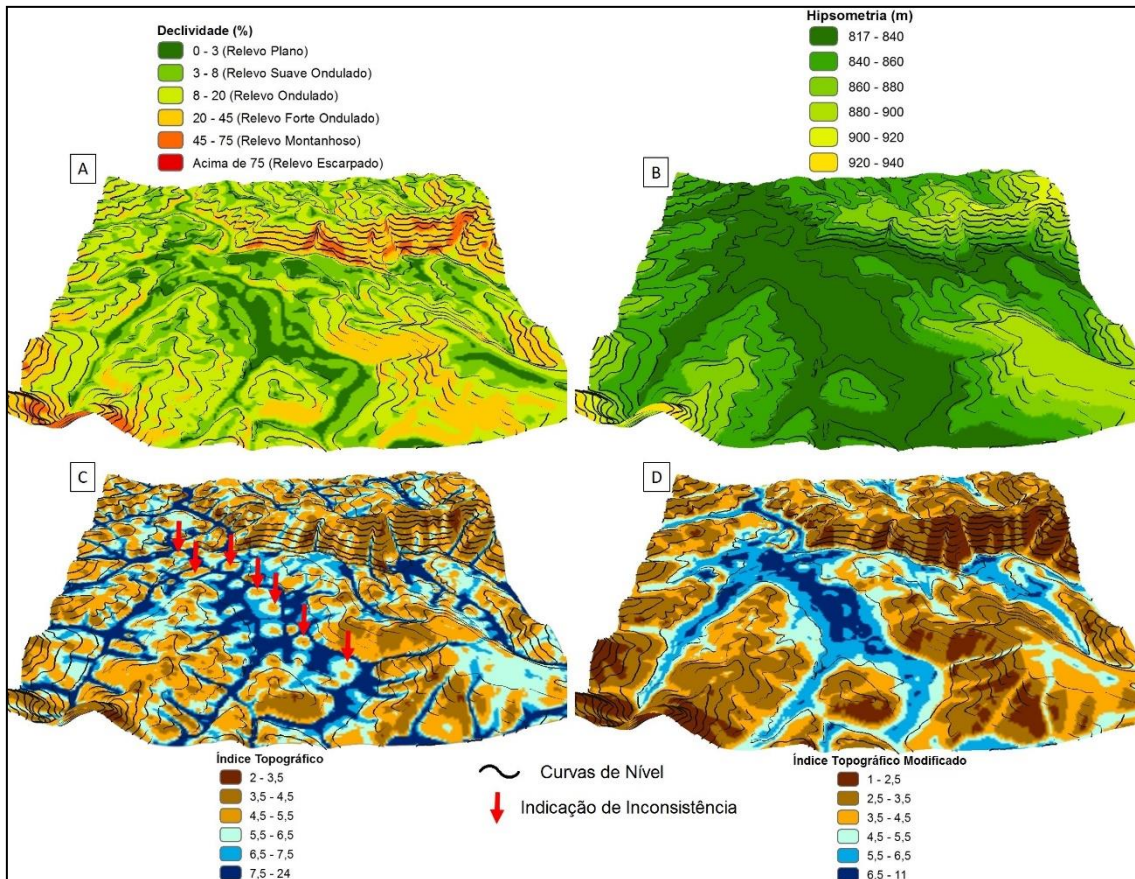


Figura 07 - Zoom da porção norte da bacia do rio Corredeiras comparando a Declividade (A), Hipsometria (B), IT (C) e ITM (D) com as curvas de nível (intervalo de 10 m).

3.2 SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS NA BACIA DO RIO CORREDEIRAS

A calibração dos parâmetros do TOPMODEL (Tabela 1) foi feita de maneira semiautomática com o objetivo de maximizar o coeficiente de eficiência (COE) medidos pelo índice de Nash e Sutcliffe (NASH & SUTCLIFFE,

1970) que varia de $-\infty$ a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor será a qualidade das simulações. O período simulado foi de 22/08/12 a 08/06/13 totalizando 290 dias simulados em escala horária. A série foi dividida em 3 períodos devido a limitações da extensão dos arquivos de entrada das séries no modelo.

Tabela 01 - Períodos simulados e os parâmetros calibrados no TOPMODEL.

Período	m (-)	$\ln(TO)$ (m ² /h)	Sr_{max} (m)	Sr_{nit} (m)	$ChVel$ (m/h)	COE
P1: 22/08/12 a 22/11/12	0,03	-3,70	0,12	0,0001	1600	0,76
P2: 23/11/12 a 23/02/13	0,02	-2,75	0,08	0,0080	1900	0,67
P3: 24/02/13 a 08/06/13	0,06	-3,75	0,08	0,0170	1600	0,66
Média	0,04	-3,40	0,09	0,0080	1700	0,70

Os valores dos parâmetros variaram para os três períodos simulados, com destaque para o m e $\ln(TO)$ que são os parâmetros que podem apresentar as maiores variações durante a simulação, pois representam a recessão e a

transmissividade lateral saturada do solo (BEVEN et al., 1997). O parâmetro m , que de acordo com Beven et al., (1995), atua como controlador da profundidade efetiva do solo e em conjunto com TO determinará a zona ativa do solo onde

SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

ocorrerá o escoamento subsuperficial. De acordo com Beven et al., (1984) e Mine & Clarke (1996), o m é o parâmetro mais importante do modelo no controle da resposta hidrológica.

Após a calibração do modelo, foi gerada a vazão simulada pelo TOPMODEL. A vazão simulada foi comparada com a vazão observada (Figura 8) e realizado o cálculo do COE para toda a série. A vazão simulada mostrou-se coerente com a vazão observada principalmente em relação aos picos do hidrograma, obtendo um COE médio de 0,7 para todo o período. Os valores de COE igual ou acima de 0,7 indicam alta eficiência no ajuste do modelo (MINE & CLARKE, 1996).

Nas recessões o modelo apresentou limitação para reproduzir os dados observados, conforme já observado em Santos (2001), Santos

(2009) e Siefert e Santos (2015). Este problema pode estar relacionado à ocorrência de processos hidrológicos não considerados nas hipóteses simplificadas pelo TOPMODEL (BEVEN, 2002), como a ausência de conectividade entre as AS (SANTOS, 2009) ou por não considerar os diferentes tipos de cobertura do solo e as diferentes classes de solo que possuem características e respostas hidrológicas distintas, ressaltando a dificuldade de simular perfeitamente as vazões em bacias hidrográficas (SIEFERT, 2012).

De modo geral, a vazão simulada se mostrou similar à vazão observada. Neste sentido, a vazão média simulada foi de $1,65 \text{ m}^3/\text{s}$ enquanto que a vazão média observada foi de $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$.

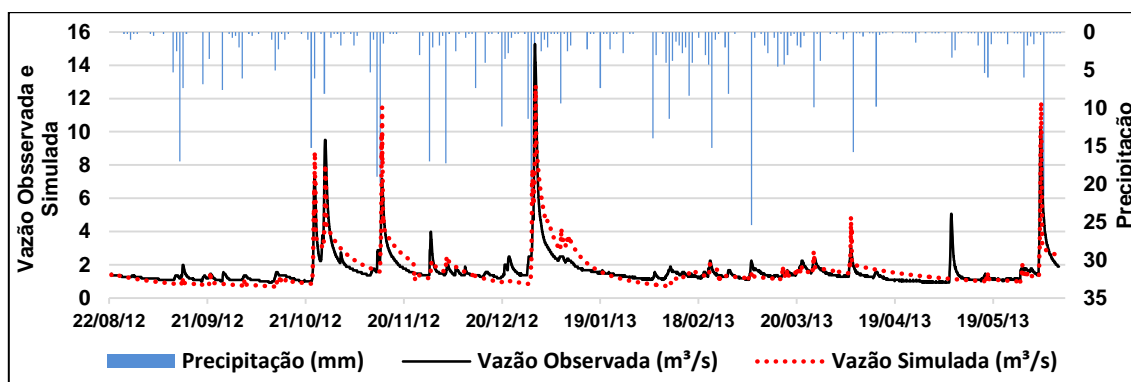


Figura 08 - Precipitação, vazão observada e simulada.

A Figura 9 apresenta a curva de permanência das AS no tempo para toda a série considerada, obtida pelo resultado da simulação do TOPMODEL. Observa-se que a área mínima saturada (9%) permaneceu por 100% do tempo

(ITM > 6,22), enquanto 10,4% de área saturada permaneceu por 30% do tempo (ITM > 6,05) e a área saturada máxima que ocupou 23% da superfície da bacia permaneceu por apenas 2% do tempo (ITM > 5,1) (Figura 10).

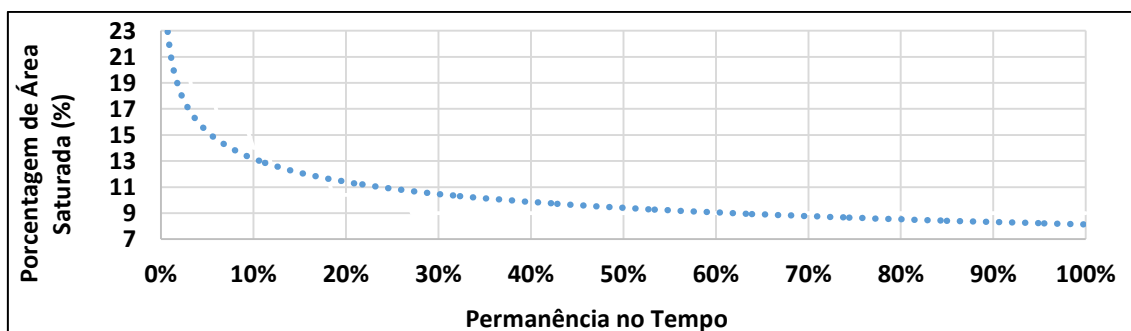


Figura 09 - Porcentagem de áreas saturadas no tempo.

SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

Neste sentido, nota-se a partir da Figura 10 que durante os eventos de precipitação, as regiões mais próximas às cabeceiras de drenagem atingiram o estado de saturação hídrica do solo, que posteriormente contribuiriam para a formação de canais intermitentes em áreas contíguas aos canais perenes, principalmente em áreas de convergência de fluxo. No instante em que a bacia do rio

Corredeiras atingiu seu estado de saturação máximo, concomitantemente ocorreu a geração de uma nova rede de drenagem a partir do escoamento superficial resultante das AS. A partir disso, observa-se o aumento da largura dos principais canais de drenagem acarretando na expansão da área que contribui diretamente para o escoamento superficial.

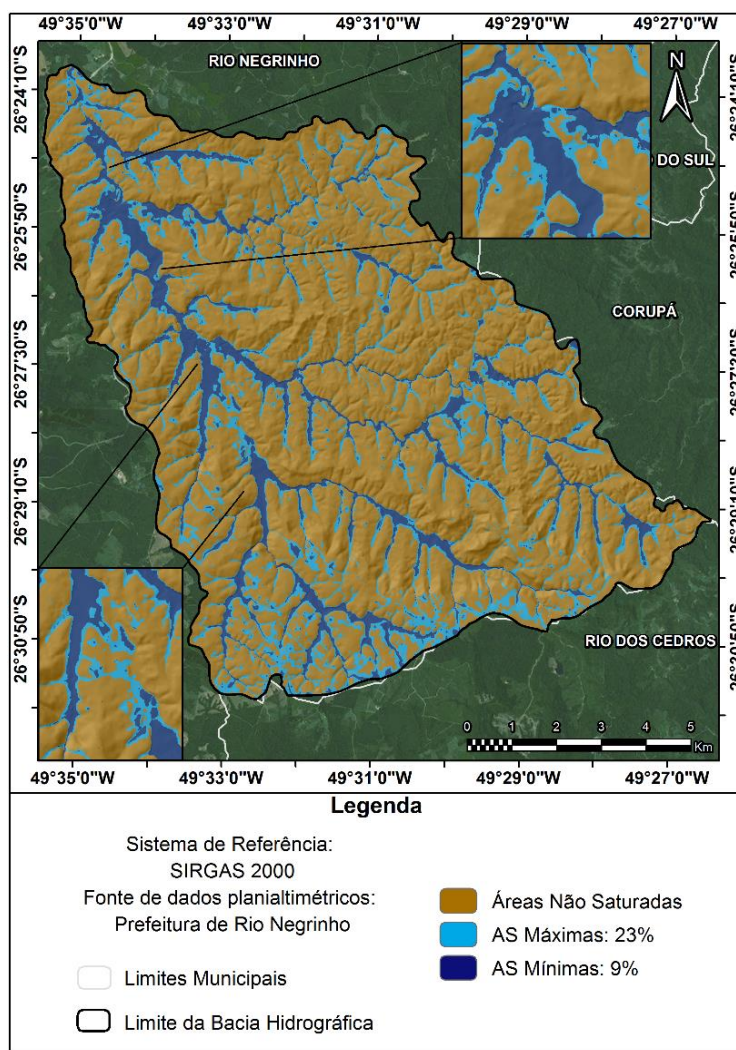


Figura 10 - Áreas Saturadas Máximas e Mínimas da bacia do rio Corredeiras.

Considerando a distribuição espacial das AS, pode-se afirmar que estas estão coerentes com as características topográficas da área de estudo, uma vez que ocorre a presença de áreas de relevo com menores declividades e maiores áreas de contribuição, como as planícies fluviais na seção mais próxima do rio Corredeiras, que se

apresentam como áreas altamente suscetíveis a saturação hídrica do solo de forma periódica ou permanente. Além disso, essas áreas são caracterizadas pela presença de grandes áreas de contribuição e vales encaixados, notadamente no terço inferior das vertentes no qual o relevo favorece a acumulação de fluxo dos canais de

SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC

drenagem e a geração de AS temporárias, que se constituem entre as AS mínimas até as AS máximas. Desta maneira, destaca-se a importância do relevo como agente controlador no que se refere aos mecanismos de geração de escoamento através do estudo das AS e AVA.

3.3 PROBABILIDADE DE SATURAÇÃO DO SOLO E USO DA TERRA

A probabilidade de saturação (P_{sat}) da bacia do rio Corredeiras foi calculada de acordo com a equação 3. A Figura 11 estabelece a relação entre as AS e suas respectivas probabilidades de saturação, onde observa-se que as AS mínimas (9%) possuem 100% de P_{sat} e de gerar escoamento superficial, enquanto que 14% das AS possuem a probabilidade de 8,3% de saturação e as AS máximas (23%) possuem apenas 1% de P_{sat} .

Neste sentido, as AS mínimas (9%) correspondem predominantemente as planícies

de inundação dos principais canais da rede de drenagem, enquanto que a partir deste ponto até cerca de 14% das AS, correspondem predominantemente aos terraços fluviais que alcançam o estado de saturação conforme a amplitude dos eventos pluviométricos e no qual as AS variam linearmente com a P_{sat} . Por fim, dos 14% até as AS máximas (23%), correspondem as zonas de saturação rara onde a P_{sat} é menor.

Esta relação entre as AS e a P_{sat} indica a dinâmica espacial e temporal do processo de AVA e está coerente com as condições topográficas locais, pois ocorre a presença de planícies fluviais e grandes áreas de contribuição que favorecem a formação de banhados permanentes e áreas de saturação temporária ao longo dos canais de drenagem. Por outro lado, observa-se que 77% da área total da bacia não satura, portanto, possui probabilidade de saturação igual a 0%, sendo localizadas principalmente nos terços médios até os topos das vertentes.

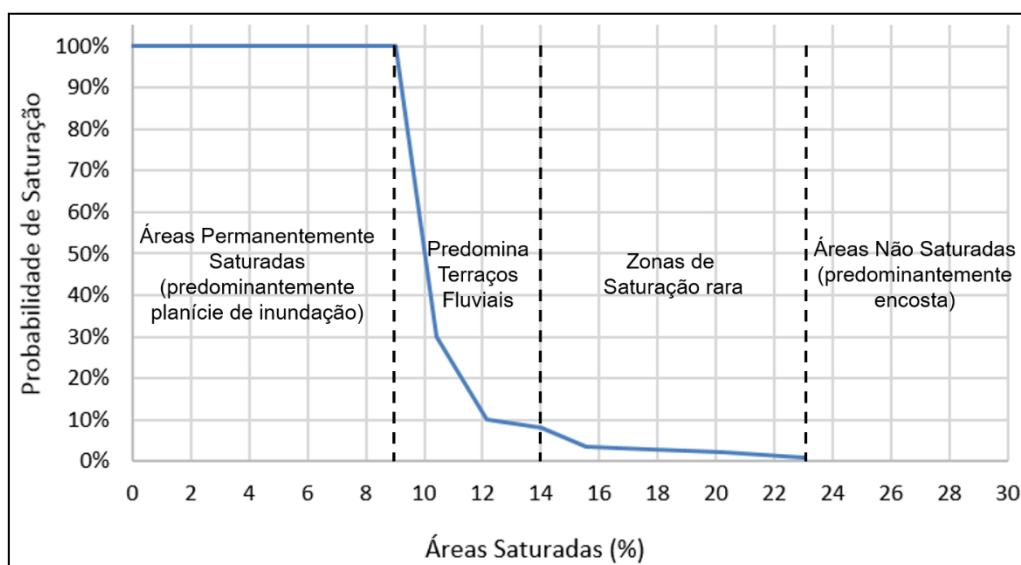


Figura 11 - AS em relação a probabilidade de saturação.

A distribuição das AS e da P_{sat} pelas classes de uso da terra (Figura 12 e Tabela 2) demonstra que a maior parte das AS mínimas encontra-se em áreas de mata nativa (54,82%), áreas de campo (20,74%) e reflorestamento de pinus (19,31%). Deste modo, as áreas saturadas permanentes que coincidem com a vegetação de campo, predominantemente representam áreas

de banhados cuja a condição de saturação hídrica permanente do solo associa-se ao tipo de vegetação hidrófila.

Já as AS máximas alcançam em sua grande maioria, áreas de mata nativa, reflorestamento de pinus e áreas de campo, com 52,14%, 24,44%, 18,28% respectivamente. Neste sentido, nota-se que as áreas com maior P_{sat}

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

encontram-se principalmente em áreas de mata nativa e áreas de campo, porém, conforme a incremento da precipitação ocorre um aumento das áreas de reflorestamento de pinus que são atingidas pelas AS, principalmente no centro e sul da bacia hidrográfica, caracterizando as AS máximas que possuem menor P_{sat} .

Entretanto, observa-se na porção norte da bacia uma grande quantidade de áreas de cultivo extremamente próximas das planícies fluviais e dos principais canais de drenagem (Figura 12 e Tabela 2), podendo ocorrer o transporte de sedimentos e poluentes em direção a rede de drenagem. Deste modo, ressalta-se que a distribuição espacial das AS pode sofrer alterações devido a modificações no uso da terra que influenciam na disponibilidade

de água no solo e concomitantemente, nas áreas que geram escoamento superficial.

Portanto, para a bacia do rio Corredeiras, as áreas com maior P_{sat} e o seu entorno deveriam possuir um manejo com o intuito de diminuir o escoamento superficial, com o objetivo de mitigar o transporte de sedimentos e poluentes em direção aos canais de drenagem, assim como apontado nos estudos sobre as áreas críticas de afluência (GBUREK & SHARPLEY, 1998; QIU, 2009; DREWES & QIU, 2011). Nesses trabalhos destacam-se o uso inadequado do solo resultante de atividades agrícolas com altas concentrações de sedimentos e nutrientes que podem ser transportados para a rede drenagem através do escoamento superficial.

Tabela 2 - Porcentagem de AS mínimas e máximas em cada uso da terra da bacia do rio Corredeiras.

Uso da terra	Porcentagem de AS Mínimas	Porcentagem de AS Máximas
Estrada	1,37%	1,43%
Área de cultivo	3,75%	3,71%
Campo	20,74%	18,28%
Mata Nativa	54,82%	52,14%
Reflorestamento	19,31%	24,44%

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
 CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

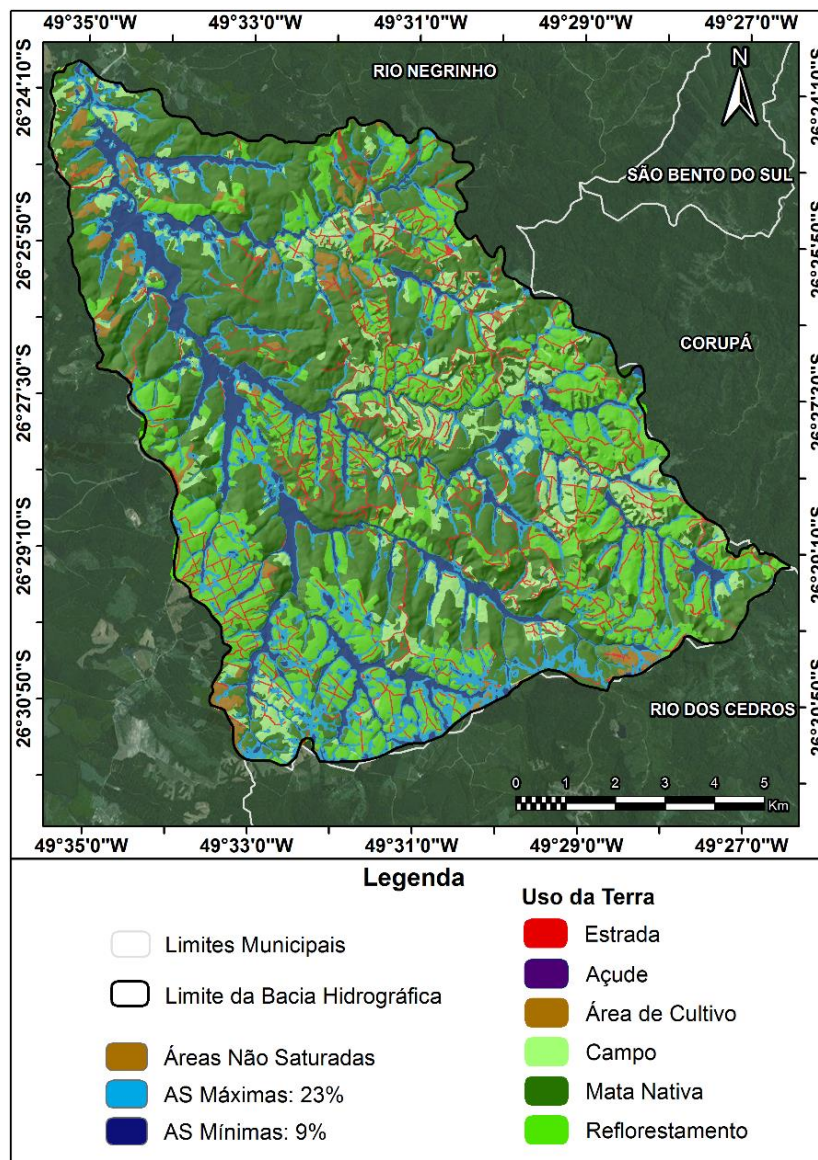


Figura 12 - Áreas Saturadas Máximas e Mínimas e classes de uso da terra da bacia do rio Corredeiras.

A título de avaliação da distribuição das AS e da probabilidade de saturação da área de estudo, foi realizada a comparação entre pontos de monitoramento do nível freático existentes em uma bacia experimental inserida na área de estudo, com a distribuição das AS. Foram avaliados 8 pontos distintos (Figura 13) no dia 13/07/16, com precipitação antecedente de 15,27 mm e 16,07 mm nos 7 e 14 dias anteriores. O ponto 1 refere-se ao exutório e representa a planície fluvial da bacia do rio Corredeiras. Os pontos 2 a 5 localizam-se em uma vertente no sul da bacia, fazendo parte da bacia experimental

inserida na bacia do rio Corredeiras. Nota-se que à medida em que se desloca do terço inferior da vertente em direção ao fundo de vale (do ponto 05 em direção ao ponto 02), o nível freático localiza-se mais próximo da superfície até a ocorrência de áreas de banhado (ponto 02), onde o perfil do solo encontra-se totalmente saturado.

Observa-se que o modelo TOPMODEL espacializou com coerência essas áreas, com destaque para os pontos 03 ao 05 que estão localizadas em áreas úmidas devido as características hidrogeomorfológicas (AS máximas). Resultados obtidos do monitoramento

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

do nível freático nestes locais indicam que essas áreas permanecem com nível freático acima de 0,5 m de profundidade durante aproximadamente 50% (ponto 03), 30% (ponto 04) e 15% (ponto 05) do ano, indicando propensão a saturação do perfil do solo, conforme dados de monitoramento do aquífero raso apresentados em Siefert (2016).

Por outro lado, os pontos 06 e 08 situam-se na planície do rio Saci e do rio Feio respectivamente, representando áreas que possuem grande P_{sat} , pois são áreas mais

próximas aos rios perenes e formam uma rede de drenagem intermitente que expandem e contraem dependendo da precipitação. Essas áreas são preferencialmente planas, com grandes áreas de contribuição de escoamento e comprimentos de rampa a montante e baixas declividade (0 – 8% de declividade). Por fim, o ponto 07 localiza-se no topo da vertente onde não ocorre a saturação hídrica do solo, uma vez que a área de contribuição é pequena e a declividade é alta (maior que 20% de declividade).

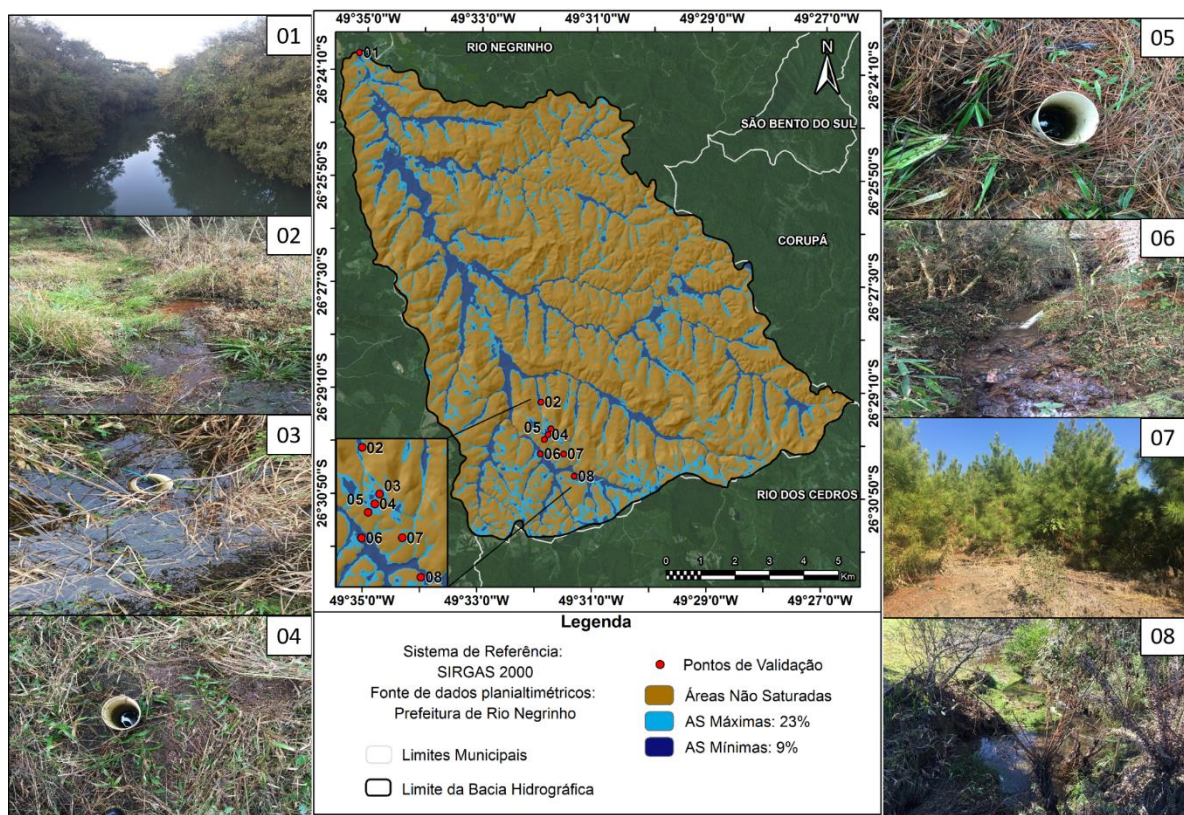


Figura 13 - Áreas Saturadas Máximas e Mínimas e pontos de validação da bacia do rio Corredeiras.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a simulação da dinâmica das AS para a bacia do rio Corredeiras, a partir da utilização do ITM que visa representar com maior precisão as áreas de contribuição e as áreas com maior probabilidade de saturação, juntamente com a avaliação em campo.

A calibração do TOPMODEL resultou em um COE médio de 0,7, demonstrando que o TOPMODEL é um modelo adequado para simular

a dinâmica espacial das AS ao longo do tempo, pois a vazão simulada ficou similar a vazão observada. As AS variaram de 9% a 23% da área total da bacia hidrográfica, valores estes condizentes com os valores apontados pela literatura.

As AS mínimas coincidiram com os rios perenes enquanto as áreas máximas formaram uma rede de drenagem intermitente que contribui para os canais da bacia hidrográfica.

**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

Apesar de superestimar a vazão nos períodos de recessão devido a simplificações do modelo, de modo geral, o TOPMODEL respondeu bem às condições ambientais da área de estudo confirmando a aplicabilidade deste modelo em regiões de clima úmido e predomínio de relevo suave.

No processo de avaliação dos resultados da simulação, evidenciou-se que o modelo foi capaz de representar as áreas com as maiores P_{sat} , sobretudo em locais como as áreas de banhado permanentes, as planícies fluviais dos principais canais de drenagem com grande área de contribuição e os terraços fluviais, além da ocorrência de áreas de saturação temporária que correspondem as porções de transição entre os topos de vertentes e os vales onde a P_{sat} é menor.

Na porção norte da bacia hidrográfica existe uma grande quantidade de áreas de cultivo que podem transportar sedimentos e poluentes em direção as AS com maior P_{sat} . Neste sentido, este tipo de abordagem mostra potencial para utilização como ferramenta para o planejamento ambiental, pois permite orientar ações antrópicas sobre o meio físico com base no estudo dos processos hidrológicos.

REFERÊNCIAS

- AGNEW, L.J.; LYON S.; GERARD-MARCHANT P.; COLLINS V. B., LEMBO A. J.; STEENHUIS T.S.; WALTER, M.T. Identifying hydrologically sensitive areas: Bridging the gap between Science and application. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 78, p. 63-76, 2006.
- AMBROISE, B. Variable 'active' versus 'contributing' areas or periods: a necessary distinction. **Hydrological Processes**, v.18, p. 1149-1155, 2004.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A. Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology, **Hydrol. Sci. Bull.**, p. 43-69, 1979.
- BEVEN, K.J.; KIRKBY, M. J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A. F.. Testing a Physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.69, p. 119-143, 1984.
- BEVEN, K.J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICIZ, R.; FREER, J.. Topmodel. In: SINGH, V. P. **Computer Models of Watershed. Water Resources Publication**, p. 627-668, 1995.
- BEVEN, K. J. TOPMODEL: a critique. **Hydrological Processes**. v.11, n.3, p.1069–1085, 1997.
- BEVEN, K. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. **Hydrological Processes**, v.16, p. 189-206, 2002.
- BÖHNER, J.; SELIGE, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In: Böhner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. [Eds.]: Göttinger Geogr. SAGA - **Analyses and Modelling Applications**. Abh, n. 115, 2006.
- DICKINSON, W.T. & WHITELEY, H. Watershed areas contributing to runoff. In: **Colloque sur les résultats des recherches sur les bassins représentatifs et expérimentaux**, p.1.12-1.26, 1970.
- DOORENBOS, J.; PRUIT, W. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 1992, 144p.
- DREWES, D.; QIU, Z. Hydrologically Sensitive Areas. **Natural Resource Inventory**. New Jersey, p.1-22, 2011.
- DUNNE T, BLACK RD. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. **Water Resources Research** 6(5): p. 1296–1311, 1970.
- DUNNE T. Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. **Journal of Hydrology**, v. 65 (1-3): p. 25–48, 1983.
- EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; COWAN, D. M.; SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. S. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. **Journal of hydrology**, v. 348 (3): p. 279-291, 2008.
- FREER, J.; MCDONNELL, J. J.; BEVEN, K.; PETERS, N.E.; BURNS, D.A., HOOPER, R.P.; AULENBACH, B.; KENDALL, C. The role of bedrock topography on subsurface storm flow. **Water Resources Research**, v. 38, n. 12, p. 1–19, 2002.
- GBUREK, W. J.; SHARPLEY, A. N. Hydrologic controls of phosphorus loss from upland agricultural watershed. **Journal of Environmental Quality**, v.27, nº 2, 267-277, 1998.

**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

- HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A.R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. **Journal of Geophysical Research**. v. 68, nº 4, p.1081-1087, 1963.
- HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. **International Symposium of Forest Hydrology**. Pergamon Press, Oxford. p. 275- 290, 1967.
- HJERDT, K. N.; MCDONNELL, J. J.; SEIBERT, J.; RODHE, A. A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. **Water Resources Research**, v. 40, 2004.
- LATRON, J.; GALLART, F. Seasonal dynamics of runoff-contributing areas in a small mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). **Journal of Hydrology**, v. 335 (1-3): p. 194–2006, 2007.
- LYON, S. W.; WALTER, M. T.; GÉRARD-MARCHANT, R.; STEENHUIS, T. S. Using a topographic index to distribute variable source area runoff predicted with the SCS curve-number equation. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 2757-2771, 2004.
- MCDONNELL, J. J. Are all runoff processes the same?. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 4103-4111, 2013.
- MINE, M. R. M.; CLARKE, R. T. O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: resultado preliminar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 1, p. 89-115, 1996.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290, 1970.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO NEGRINHO (PMRN). **Levantamento planialtimétrico do município de Rio Negrinho**, escala 1.25:000, 2006.
- QIU, Z. Assessing Critical Source Areas in Watersheds for Conservation Buffer Planning and Riparian Restoration. **Environmental Management**, v. 44, p. 968-980, 2009.
- SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR**. Curitiba: Curso de Pós-graduação em Agronomia, 108 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. Aplicação do TOPMODEL para determinação de áreas saturadas da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR, Brasil. **Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 3, n. 2, 2008.
- SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. 167 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- SANTOS, I.; SIEFERT, C.A.C.; LOPES, F.C.A.; IENSEN, I.R. R. Avaliação do efeito de escala na distribuição espacial das áreas variáveis de afluência na bacia do rio Apucarantina, região sul-brasileira. In: **VI Congresso Nacional de Geomorfologia**, 2013, Coimbra (Portugal). Atas/Proceedings.
- SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, W. S.; THONGS, D. J.; EASTON, Z. M.; ZION, M. S.; NEAL, A. L.; MENDOZA, G. F. Incorporating variable source area hydrology into a curve-number-based watershed model. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 3420-3430, 2007.
- SCHULER, A.E.; MORAES, J.M.; MILDE, L.C.; GROppo, J.D.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; CALIJURI M.L. Análise da representatividade física dos parâmetros do TOPMODEL em uma bacia de meso escala localizada nas cabeceiras do Rio Corumbataí, São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre. v. 5, n. 2, p. 5-25, 2000.
- SIEFERT, C.A.C.; SANTOS, I. Áreas Hidrologicamente Sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do rio Barigui, PR. **Revista Ambiente & Água**, v.5, n.2, 2010.
- SIEFERT, C. A. C. **Delimitação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem de processos e da relação solo-vegetação em ambientes hidrológicos**. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. Identificação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem hidrológica e da distribuição espacial de solos e vegetação em ambientes hidromórficos. **Sociedade & Natureza** (UFU. Online), v. 27, p. 141-155, n. 2015.

HUNG, M.N.W.B., SIEFERT, C.A.C., SANTOS, I.
**SIMULAÇÃO HIDROGEOMORFOLÓGICA DA DINÂMICA DAS ÁREAS SATURADAS DA BACIA DO RIO
CORREDEIRAS, RIO NEGRINHO – SC**

SIEFERT, C. A. C. **Dinâmica do aquífero raso e fontes de carbono orgânico dissolvido em uma bacia hidrográfica de cabeceira**. 115 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SILVA, R. V.; KOBIYAMA, M. TOPMODEL: Teoria integrada e revisão. **Revista RA'EGA**, Curitiba, n. 14, p. 97-110, Editora UFPR, 2007.

SILVA, M. M. **Dinâmica espaço-temporal das áreas variáveis de afluência da bacia do córrego do Cavalheiro**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

TSUKAMOTO, Y. Storm discharge from an experimental watershed. **Journal of the Japanese Forestry Society**, v. 45, p. 186-190, 1963.

YI, L.; ZHANG, W. C.; YAN, C. A. Modified topographic index that incorporates the hydraulic and physical properties of soil. **Hydrology Research**, v. 48, 2016.

WALTER, M. T.; WALTER M. F.; BROOKS E. S.; STEENHUIS T. S.; BOLL, J.; WEILER, K. R. Hydrologically Sensitive Areas: Variable Source Area Hydrology Implications for Water Quality Risk Assessment. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 55, p. 277-284, 2000.

WALTER, M.T.; STEENHUIS, T. S.; MEHTA, V. K.; THONGS, D.; ZION, M.; SCHNEIDERMAN, E. Refined conceptualization of TOPMODEL for shallow subsurface flows. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 2041-2046, 2002.

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, n.2, p.200–209, 2009.