

## Estimativa da umidade do solo usando o modelo hidrológico distribuído MHD-INPE: estudo de caso na Bacia do Purus

Ricardo Dal'Agno da Silva<sup>1</sup>  
Laura De Simone Borma<sup>1</sup>  
Pedro Jorge Belé Mateus<sup>1</sup>  
Pétala Bianchi Augusto-Silva<sup>1</sup>  
Daniel Andres Rodriguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
silvard@dsr.inpe.br; {laura.borma, pedro.mateus, daniel.andres}@inpe.br;  
petalaugusto@gmail.com

**Abstract.** It is known that estimations of soil moisture with remote sensing data (e.g. NDVI, land surface temperature) are restricted over dense forested areas due to its interference with the remote sensed signal. The use of process models like soil-vegetation-atmosphere transfer or hydrological models may contribute to minimize this problem and can be used to produce more accurate soil moisture estimates. Therefore, the objective of this study was to conduct preliminary analysis of the consistency of soil moisture estimative by the distributed hydrologic model MHD-INPE through the comparison with precipitation data. The model succeeded in the representation of hydrological response of the Purus Basin for 1970-1990 period, capturing the minimum and maximum stream flow. The estimation of soil moisture using the model showed a consistent spatial distribution in relation to the precipitation. During the wet season, 60-day cumulative rainfall presented a strong correlation with soil moisture, representing the restitution of ground water stored in the soil. For the dry season it was observed weaker correlations, as expected, due to the absence of rainfall not mean low values of soil moisture. The observed soil moisture in the dry season is related to ground water already stored in the soil, which is decreased from the wet season to the dry season due to factors such as lack of rainfall, discharge from the aquifer and evapotranspiration processes.

**Palavras-chave:** Amazônia, umidade do solo, modelo hidrológico, precipitação, Amazon, soil moisture, hydrological model, precipitation.

### 1. Introdução

A umidade do solo é uma variável hidrológica que desempenha papel fundamental em diversos processos físicos da superfície da terra (Seneviratne et al., 2010). O conhecimento dessa variável é essencial para o monitoramento de culturas agrícolas e florestas com relação à disponibilidade hídrica. Define-se pela quantidade de água que se encontra temporariamente armazenada no solo após os processos de precipitação, evapotranspiração, escoamento, percolação, absorção da água pela vegetação, etc.

Numa escala local, a estimativa da umidade do solo pode ser realizada através de medições *in situ* com equipamentos como tensiômetros, *Time Domain Reflectometry* (TDR), SENTEK SDI-12, sonda de nêutrons, etc. Apesar dessa abordagem apresentar a melhor estimativa possível da umidade do solo, ela limita-se a amostras pontuais e, em alguns casos, os equipamentos possuem um alto custo de aquisição.

Numa escala regional, existem diversos dados de sensoriamento remoto que possibilitam a estimativa indireta da umidade do solo baseado em dados de temperatura da superfície (e.g. TRMM/TMI, Landsat-8/TIRS, subproduto MOD11-LST), precipitação (e.g. subproduto TRMM/3B42), índices de vegetação (e.g. derivados de Landsat-5/TM, Landsat-8/OLI, subproduto MOD13). Essa estimativa pode ser realizada por relações empíricas simples ou com relação entre variáveis (e.g. NDVI e temperatura da superfície da terra). Apesar destas abordagens serem amplamente utilizadas, a precisão das estimativas em áreas com vegetação é limitada devido a sua interferência no sinal que é captado pelos sensores (Narasimhan et al., 2005). Abordagens mais robustas para essa estimativa são modelos de simulação dos

processos físicos, como *Soil Vegetation Atmosphere Transfer* ou modelos hidrológicos (e.g. Narasimhan et al. 2005).

O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Rodriguez, 2011) é um modelo hidrológico distribuído que combina princípios dos modelos Xinanjiang (Zhao & Liu, 1995), TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979), e *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM; Wigmosta et al., 2002). Através da integração de equações que retratam os processos físicos de interceptação da chuva, evapotranspiração, percolação e escoamento, o MHD simula o balanço hídrico para cada célula do modelo, obtendo-se uma estimativa da umidade do solo.

O objetivo desse estudo foi de realizar análises preliminares da consistência da umidade do solo estimada pelo modelo hidrológico distribuído MHD-INPE através da comparação com dados de precipitação.

## 2. Metodologia de Trabalho

O desenvolvimento do trabalho seguiu quatro etapas: (1) seleção da área de estudo; (2) preparação dos dados; (3) calibração do modelo; e (4) estimativa da umidade do solo e comparação com dados de precipitação.

### 2.1. Seleção da área de estudo

A área de estudo corresponde a Bacia do Purus, ocupando áreas do Brasil (estados do Acre, Amazonas e Rondônia), Peru e Bolívia (Figura 1). Na seleção da área de estudo tivemos em conta os seguintes aspectos: (1) disponibilidade de dados diários da vazão para calibração do modelo; (2) relevância científica dado que se trata de uma das bacias amazônicas com maior área de preservação da floresta primária; (3) relevância sócio-econômica devido à subsistência de comunidades locais ser, na sua maioria, altamente dependente dos recursos hídricos.

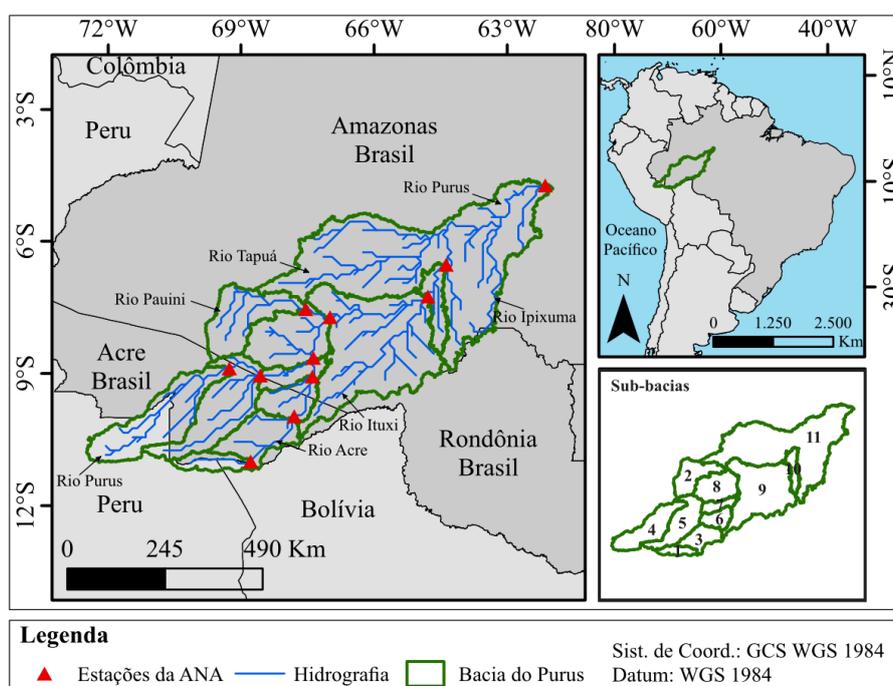


Figura 1. Área de estudo e estações fluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas) localizadas na bacia do Purus.

## 2.2. Preparação dos dados

A resolução das células do modelo foi determinada em 1 km em vista da grande extensão da bacia hidrográfica. Portanto, todo e qualquer dado com melhor resolução espacial foi interpolado para 1 km. O modelo foi calibrado para o período de 01/01/1970 a 31/12/1990.

### 2.2.1. Sub-bacias e parâmetros topográficos

Foram selecionadas 11 estações da Agência Nacional das Águas (ANA) (Figura 1) com dados diários de vazão e/ou cotas disponíveis (Tabela 1). Estes dados foram usados pelo modelo para delimitação das sub-bacias (SB) e calibração. Para as estações que possuíam falhas nos dados de vazão, aplicou-se o método da curva-chave para sua estimativa usando a relação entre as variáveis (vazão e cota).

Tabela 1 – Estações da ANA com dados para a Bacia do Purus com dados de 1970 a 1990, seus números de identificação e área de drenagem (km<sup>2</sup>).

Sub-bacia	Nome da Estação	Número da Estação	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )
1	Brasiléia	13470000	7020
2	Fazenda Borangaba	13740000	23300
3	Rio Branco	13600002	23500
4	Manoel Urbano	13180000	32800
5	Florianópolis	13650000	34400
6	Seringal da caridade	13410000	63100
7	Valparaíso - montante	13710001	105000
8	Seringal Fortaleza	13750000	154000
9	Lábrea	13870000	226000
10	Canutama	13880000	236000
11	Arumã - jusante	13962000	366000

Foram calculados parâmetros inerentes às SB: vazão média (QB), vazão média específica (QMESP), parâmetro do retardo do reservatório subterrâneo (CB) e coeficientes para largura do rio (Rodriguez, 2011).

A delimitação das SB foi realizada a partir do aplicativo TerraView 4.2.2 Hidro 0.3.8, utilizando o Modelo Digital de Elevação (*Digital Elevation Model* - DEM) derivado do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM; USGS, 2004). O DEM do SRTM foi utilizado para cálculo de índices topográficos relacionados ao fluxo de água sobre o terreno segundo a metodologia de Seibert & McGlynn (2007).

### 2.2.2. Dados meteorológicos

Foram obtidos dados diários e pontuais de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): pressão atmosférica, radiação solar, temperatura a ponto de orvalho, temperatura do ar e velocidade do vento. A partir dos dados pontuais gerou-se uma grade interpolada para cada pixel do terreno pelo método do inverso da potência das distâncias (IPD; Shepard, 1968), com parâmetro de potência igual a dois. Esses dados foram utilizados no cálculo da evapotranspiração por Penman-Monteith.

Com relação à precipitação, foram obtidos dados diários e pontuais das estações meteorológicas: Cargill, Aneel, Proclima, Clima, Para, Sudene e INMET. Esses dados também foram interpolados por IPD.

### 2.2.3. Uso e cobertura do solo e seus parâmetros

Os mapas de uso e cobertura do solo foram baseados nas classes do *Simplified Simple Biosphere Model* (SSiB; Xue et al., 1991). Foram utilizados os dados de uso e cobertura da terra e tipos de vegetação do PROVEG/IBGE (Vieira et al., 2013), com resolução espacial de

100 m. Extraiu-se o percentual de ocupação por classe para cada célula do modelo em cada um dos 21 anos.

Os parâmetros de vegetação necessários para o cálculo da evapotranspiração e interceptação foram obtidos da literatura: albedo, índice de área foliar, altura, cobertura de dossel, profundidade radicular, plano de deslocamento zero, rugosidade, resistência superficial, capacidade máxima do dossel (Culf et al., 1996; Dorman & Sellers, 1989; LDAS-NASA, 2014). Outros parâmetros inerentes ao modelo, como por exemplo, omega crítico (OC = 0,85) e fator de distribuição de raízes (FDR = 6) foram determinados empiricamente.

As características hidráulicas do solo foram obtidas através da informação pedológica utilizando funções de pedotransferência (Tomasella et al., 2003) sobre os mapas de solo desenvolvidos por Doyle e Tomasella (2010). Os parâmetros correspondem a: condutividade hidráulica do solo em condição de saturação (Ksat), pressão de entrada do ar (Psib), parâmetro 'b' da curva de retenção de Brooks-Corey, umidade volumétrica na saturação (THS), e umidade volumétrica residual (THR).

#### 2.2.4. Parâmetros calibráveis

A Tabela 2 apresenta os dez parâmetros calibráveis do modelo. Inicialmente, cada parâmetro apresenta valor igual a 1, sendo ajustados no decorrer do processo de calibração.

Tabela 2 – Parâmetros calibráveis pelo modelo MHD-INPE.

Sigla	Significado	Amplitude
<b>D1</b>	Profundidade da camada do solo 1	0,01 a 10
<b>D2</b>	Profundidade da camada do solo 2	0 a 15
<b>D3</b>	Profundidade da camada do solo 3	0,01 a 30
<b>DKSS</b>	Condutividade hidráulica da camada superior	0,01 a 10
<b>DTSUB</b>	Coefficiente da transmissividade horizontal por área saturada	1 a 100
<b>DMU</b>	Coefficiente de decaimento da transmissividade com a profundidade	1 a 4
<b>DALPHA</b>	Coefficiente de anisotropia	1
<b>DCSI</b>	Porcentagem mínima de armazenamento subterrâneo para gerar escoamento	0,01 a 1
<b>DCS</b>	Coefficiente do tempo de retardo da camada superficial	0,001 a 100
<b>DCB</b>	Coefficiente do tempo de retardo da camada subterrânea	0,001 a 100

#### 2.3. Calibração do modelo

A calibração automática foi realizada pela técnica *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) de Duan et al. (1992). A SCE-UA é uma técnica de otimização global criada especificamente para problemas de modelagem hidrológica. Na prática, ela divide o espaço de atributos em “complexos”, estabelece um ranqueamento no desempenho de cada um com vista a uma solução do problema, converge para o mínimo local de cada complexo, embaralha-os, e, por fim, espera-se ter localizado o mínimo global (Duan et al., 1992).

O desempenho da calibração foi medido por índices de ajuste clássicos da literatura: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), *Mean Average Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), RMSE relativo (%) e coeficiente de variação do RMSE (CV%). Os resultados também foram avaliados visualmente através de hidrogramas para observar se as vazões mínimas e máximas foram alcançadas.

#### 2.4. Estimativa da umidade do solo

A umidade do solo ( $\theta$ ) foi obtida a partir do *output* do modelo de água armazenada no solo (S), calculado após levar em consideração precipitação, interceptação, escoamento superficial, percolação, etc. para as três profundidades D1, D2 e D3. Para normalizar os valores de  $\theta$  aplicou-se a Equação 1 (Seneviratne et al., 2010):

$$\theta = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i}{D_i} \quad (1)$$

Para uma análise preliminar da consistência da estimativa de  $\theta$  foram utilizados dados de precipitação do produto TRMM 3B42 (resolução espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) (Kummerow et al., 2000). Comparou-se um mapa de umidade do solo (para profundidade variando de 0,3 a 7,5 m) para a estação úmida (01/01/1990) e para a estação seca (01/09/1990) com os dados de precipitação do mesmo dia e com a precipitação acumulada de até 60 dias anteriores. Os mapas foram comparados qualitativamente por uma análise visual para detectar áreas com padrão espacial similar, e quantitativamente através da correlação de Pearson e sua significância estatística (p-valor).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Calibração do modelo

Não foi possível realizar a calibração da SB11 devido à ocorrência de remanso, caracterizado no hidrograma desse exutório por dois padrões de vazão distintos. Portanto, os parâmetros calibrados da última bacia a montante (SB10) foram utilizados na SB11. A SB11 apresentou o pior ajuste dentre as demais SB calibradas. Apesar disso, todos os ajustes foram estatisticamente significativos ( $p < 0,01$ ) e retrataram com sucesso as variações do regime hídrico das SB, alcançando mínimos e máximos da vazão.

Observou-se um aumento do erro das SB de montante a jusante (Tabela 3). Os erros absolutos foram condicionados ao aumento do volume de água de montante à jusante. No entanto, o RMSE (%) apontou que os erros relativos variaram de 5,8 a 12,3% (excluindo a SB11 que não foi calibrada), ou seja, um erro relativo similar.

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos calculados entre as vazões médias mensais observadas e simuladas pelo modelo MHD-INPE após calibração para a série histórica de 1970 a 1990 na Bacia do Purus.

Sub-bacia	R <sup>2</sup>	NSE	MAE (m <sup>3</sup> /s)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	RMSE (%)	CV(RMSE) (%)
1	0,718	0,705	41,82	64,43	11,06	49,28
2	0,970	0,969	84,53	107,53	5,83	13,92
3	0,837	0,836	98,56	150,51	9,80	39,55
4	0,851	0,848	211,92	309,43	10,31	37,31
5	0,855	0,855	160,17	239,31	10,00	36,93
6	0,865	0,847	352,45	525,77	9,01	38,32
7	0,928	0,922	360,51	549,62	7,67	26,30
8	0,939	0,938	584,93	815,26	7,92	20,31
9	0,915	0,886	926,59	1350,83	11,43	23,30
10	0,895	0,889	1038,75	1487,52	12,30	22,65
11	0,596	-0,056	5154,78	6181,48	27,48	40,64

#### 3.2. Estimativa da umidade do solo e comparação com dados de precipitação

A SB1 foi removida da análise por ter apresentado padrão espacial muito diferenciado das demais, prejudicando a análise visual. Isso ocorreu provavelmente devido ao problema de calibração, referido na seção anterior. A SB11, apesar de não ter sido calibrada, foi mantida na análise.

Observou-se uma boa relação entre a distribuição espacial da umidade do solo e da precipitação para a estação úmida (Figura 2). Já no período da estação seca, a precipitação acumulada nos últimos 30 à 60 dias apresentou uma relação muito fraca com a umidade do solo. Esse resultado é esperado uma vez que, no período seco, a umidade do solo é fortemente

relacionada à água armazenada no solo proveniente da estação úmida precedente (Negrón-Juarez et al., 2007).

Através da comparação visual entre a umidade do solo e a precipitação acumulada de 30 dias antes, para as datas de 01/01/90 (período chuvoso) e 01/09/90 (período seco) (Figura 2), observou-se uma diminuição na quantidade de umidade do solo na estação seca (Figura 2b) em relação à estação úmida (Figura 2a), o que é esperado devido à ausência de precipitação e/ou eventual aumento na evapotranspiração (não medido) na estação seca. Entretanto, a quantidade de umidade do solo, apesar de menor do que na estação úmida, manteve-se relativamente elevada na estação seca, provavelmente devido a fatores tais como capacidade de retenção de água no solo, proximidade do lençol freático, etc.

Mesmo no período seco, observou-se uma forte resposta da umidade do solo em relação à chuva, como se observa pelas Figuras 2b e 2d.

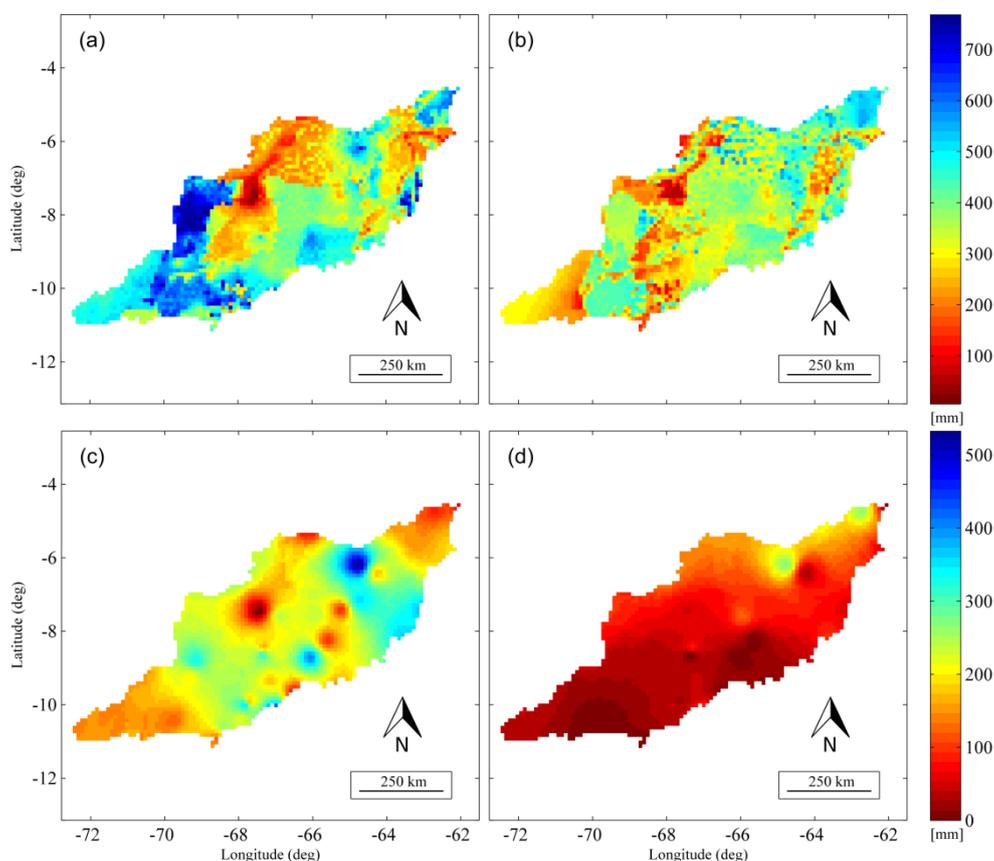


Figura 2. Umidade do solo (a) na estação úmida (01/01/90), e (b) na estação seca (01/09/90); e chuva acumulada de 30 dias na (c) estação úmida e (d) estação seca.

Numa análise quantitativa por SB, observou-se que na estação úmida em várias SB a umidade do solo apresentou forte correlação positiva e significativa ( $p < 0,01$ ) com as precipitações acumuladas, com exceção da SB7, que apresentou correlação negativa (Figura 3a). Esse fato representa a reposição da água armazenada no solo com a ocorrência das chuvas. Para a estação seca (Figura 3b), as correlações foram, na maior parte, não significativas ( $p > 0,01$ ), fracas e, muitas vezes, negativas, sugerindo que a precipitação (ou a falta dela) não é o fator de maior contribuição no processo de umidade do solo na estação seca.

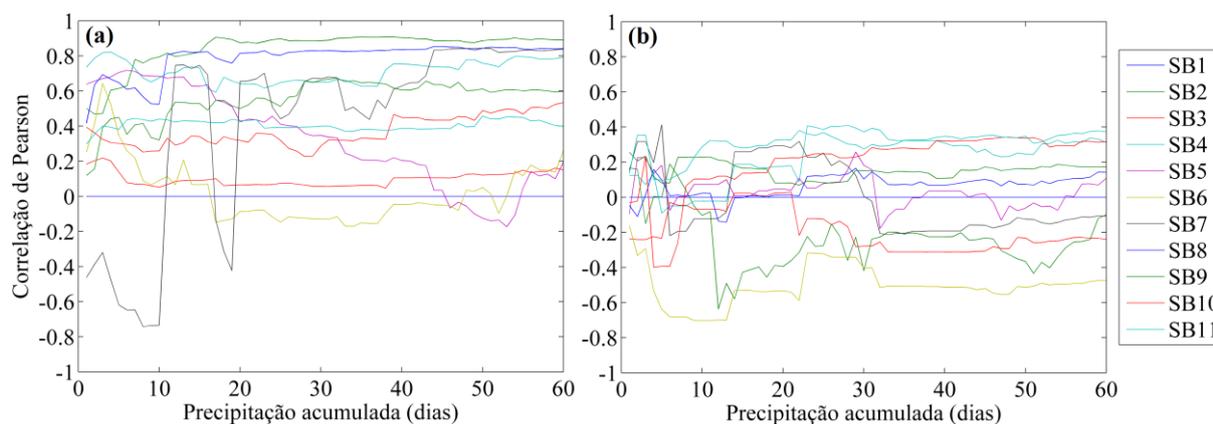


Figura 3. Correlação entre a umidade do solo e a precipitação acumulada por sub-bacia na (a) estação úmida, e (b) estação seca.

Apesar da forte correlação observada na estação úmida, é necessário considerar que algumas SB, tais como as SB3, SB6, SB7, SB10 e SB11 apresentaram correlações não significativas ( $p > 0,01$ ). Quanto às SB3, SB6 e SB7, é possível que sua fraca correlação com a precipitação seja explicada por erros propagados da SB1, a montante, que apresentou problema de calibração. E, quanto à SB11, certamente a impossibilidade de sua calibração afetou a modelagem da umidade do solo. Entretanto, apesar disso, algumas áreas dentro da SB11 obtiveram boa relação com a precipitação (próximo a Lat -6, Long -64), mesmo sem a calibração direta da mesma.

#### 4. Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo a estimativa da umidade do solo por meio de um modelo hidrológico de base física (MHD-INPE) alimentado com dados meteorológicos observados, para a bacia do Purus. Os resultados mostram uma média/forte correlação da água no solo com a precipitação acumulada para a estação úmida (janeiro) em comparação com a estação seca (setembro). Esse comportamento foi explicado pelo fato da umidade do solo, na estação seca, ser influenciada pela água armazenada em estações úmidas precedentes enquanto que a umidade do solo na estação úmida é fortemente influenciada pela precipitação incidente nessa estação. A rápida resposta da umidade do solo em relação à chuva foi também observada em determinados pontos da bacia, para a estação seca.

Para estudos futuros, pretende-se analisar a relação da estimativa da umidade do solo com outras medidas relacionadas a disponibilidade hídrica no solo e/ou vegetação, como índices de vegetação (e.g. NDVI) e evapotranspiração. Apesar disso, os resultados preliminares desse estudo mostram-se promissores para a estimativa de umidade do solo em larga escala.

#### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa (processo nº 302561/2014-5).

#### Referências Bibliográficas

Beven, K. J., and M. J. Kirkby. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v.24, n.1, p.43-69, 1979.

Culf, A.D., J.L. Esteves, A.O. Marques Filho, and H.R. Rocha. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. In: GASH, J.H.C., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M., VICTORIA, R.L. **Amazonian deforestation and climate**. New York: John Wiley & Sons, 175-191, 1996.

Dorman, J. L., and P. J. Sellers. A Global Climatology of Albedo, Roughness Length and Stomatal Resistance for Atmospheric General Circulation Models as Represented by the Simple Biosphere Model (SiB). **J. Appl. Meteor.**, v.28, p.833-855, 1989.

Doyle, M. E., and J. Tomasella. Experiments Using New Initial Soil Moisture Conditions and Soil Map in the Eta Model Over La Plata Basin. In: THE MEETING OF AMERICAS, 2010, Foz do Iguaçu, BR. **Proceedings...**, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3892P38>>. Acesso em: 25 fev. 2011.

Duan, Q., S. Sorooshian, and V.K. Gupta. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, v.28, n.4, p.1015-1031, 1992.

Kummerow, C.; et al. The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit. **J Appl Meteor.**, v.39, p.1965-1982, 2000.

LDAS-NASA. **NLDAS Vegetation Parameters**. 2014. Disponível em: <<http://ldas.gsfc.nasa.gov/nldas/NLDASmapveg.php>>. Acesso em: 15 de jun.2014.

Narasimhan, B.; Srinivasan, R.; Arnold, J. G.; Di Luzio, M. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. **Trans. Asae**, v.48, p.1101-1113, 2005.

Negrón Juárez, R. I.; Hodnett, M. G.; Fu, R.; Goulden, M. L.; Randow, C. v. Control of dry season evapotranspiration over the amazonian forest as inferred from observations at a southern amazon forest site. **J. Climate**, v.20, p.2827-2839, 2007.

Rodriguez, D. A. **Impactos dos padrões espaciais da vegetação nas variáveis atmosférica e terrestre do ciclo hidrológico, em bacia de floresta amazônica**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2011.

Seibert, J., and B. L. McGlynn. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. **Water Resour. Res.**, v.43, W04501, 2007.

Seneviratne, S. I.; Corti, T.; Davin, E. L.; Hirschi, M.; Jaeger, E. B.; Lehner, I.; Orlowsky, B.; Teuling, A. J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v.99, n.3-4, 2010, p.125-161.

Shepard, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. **Proceedings of the 1968 ACM National Conference**, p.517-524, 1968.

Tomasella, J., Y.A. Pachepsky, S. Crestana, and W. J. Rawls. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. **Soil Science Soc. of America Jour.**, v.67, n.4, p.1085-1092, 2003.

USGS. **Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second scene SRTM\_u03\_n008e004, Unfilled Unfinished 2.0**. Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, 2004.

Vieira, R. M. S. P.; et al. **Mapa de uso e cobertura da terra do território brasileiro para uso em modelagem climática e meteorológica**. São José dos Campos: INPE, 2013. 33 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/07.01.12.41-RPQ). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3ECULQ5>>. Acesso em: 15 de jun. 2014.

Wigmosta, M.S., B. Nijssen, P. Storck, D.P. Lettenmaier. The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model. In: Singh, V.P., and D.K. Frevert (Ed.) **Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications**. Littleton, CO: Water Resource Publications, 7-42, 2002.

Xue, Y., P. J. Sellers, J. L. Kinter, and J. Shukla. A simplified biosphere model for global climate studies. **Journal of Climate**, v.4, n.3, p.345-364, 1991.

Zhao, R.J., and X.R. Liu. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publication. p215-232, 1995.