



## IDENTIFICAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA NA REGIÃO CENTRO-SUL DO BRASIL A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS MODIS

G. A. V. Fernandez<sup>1</sup>, B. T. Rudorff<sup>2</sup>, D. A. Aguiar<sup>3</sup>, F. S. C. Pinhati<sup>4</sup>, M. P. G. Salgado<sup>5</sup>,  
T. H. Fontenelle<sup>6</sup>

**RESUMO:** A cana-de-açúcar cobre aproximadamente 9.026.000 ha (89% da extensão nacional) em SP, MG, GO, PR, MS, MT, RJ e ES. Quatro Conjuntos de Dados Geográficos (CDGs) foram usados: 1) pivôs; 2) deficiência hídrica (DEF); 3) séries temporais do satélite MODIS e 4) mapeamento da cana (Canasat). A identificação de cana irrigada na safra 2015/16 foi realizada com base no Enhanced Vegetation Index (EVI) do sensor MODIS. Valores menores indicam pouca ou nenhuma biomassa e valores próximos a 1 indicam maior presença de biomassa verde. A dinâmica de séries temporais do EVI das lavouras de cana em contraste com a DEF reflete o ganho ou perda da biomassa ao longo do ano desde o solo exposto até a colheita. A irrigação está expressa no formato da curva, cuja leitura permite segregar talhões irrigados de não irrigados, desde que o aporte de água ou vinhaça diluída tenham causado resposta positiva na biomassa. O CDG de pivôs foi a primeira referência para a caracterização de píxeis de área irrigada e posteriormente identificar outros tipos de irrigação. A maior extensão irrigada está em São Paulo, com 774.500 ha de irrigação de salvamento, seguida de GO (377.000 ha), MG (322.000 ha), MS (112.100 km<sup>2</sup>), PR (42.000 ha), ES (25.000 ha) e RJ (10.000 ha). Goiás, Minas Gerais e Espírito Santo têm entre 33% e 35% do total de plantio sob irrigação. Excetuado o Paraná, com apenas 6% de irrigação (de salvamento), os outros estados têm entre 13% e 16%. Para resolver os tipos de irrigação adotou-se as seguintes lâminas: 20 a 80 mm/ano (salvamento, 1.700.000 ha total), 200 a 300 mm/ano (com déficit, 14.500 ha total) e 300 a 1.000 mm/ano (plena, 12.800 ha total).

**PALAVRAS-CHAVE:** cana-de-açúcar, irrigação, EVI MODIS.

<sup>1</sup> MSc. Sensoriamento Remoto, Especialista em Geoprocessamento ANA, Brasil. E-mail: gonzalo.fernandez@ana.gov.br

<sup>2</sup> PhD. Agronomia/Sensoriamento Remoto, Diretor Executivo da Agrosatélite Geotecnologia Aplicada. E-mail: bernardo@agrosatelite.com.br

<sup>3</sup> Dr. Sensoriamento Remoto, sócio-diretor da Agrosatélite Geotecnologia Aplicada. E-mail: daniel@agrosatelite.com.br

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, Especialista em Geoprocessamento ANA, Brasil. E-mail: filipe.pinhati@ana.gov.br

<sup>5</sup> MSc. Sensoriamento Remoto, sócio-diretor da Agrosatélite Geotecnologia Aplicada. E-mail: moises@agrosatelite.com.br

<sup>6</sup> MSc. Biogeoquímica, Especialista em Recursos Hídricos ANA, Brasil. E-mail: thiago.fontenelle@ana.gov.br

## **IRRIGATED SUGAR CANE IN BRAZIL'S MIDSOUTH BASED ON MODIS TIME SERIES**

**ABSTRACT:** the sugarcane culture covers nearly 9.026.000 ha (89% of the national extension) in SP, MG, GO, PR, MS, MT, RJ and ES states. Four Geographic Datasets (FGD) were used: 1) central pivots; 2) water deficiency (DEF); 3) MODIS time series; and 4) sugarcane map (Canasat). Irrigated sugarcane in the 2015/2016 harvest was based on MODIS' Enhanced Vegetation Index (EVI). Lower values indicate less or none green mass and values closer to 1 indicate more green mass. The dynamic of EVI time series of sugarcane fields contrasted with DEF reflects the loss or gain of green mass along the year since exposed soil to harvest. Irrigation is expressed in the curve's shape, which allows irrigated and not irrigated areas resolution, given that the water or diluted stillage had caused positive response on green mass. Pivots CDG was the first reference to characterize irrigated areas pixels and then identifying other types of irrigation. The greatest extension of irrigated sugarcane is in the state of São Paulo, with 774.500 ha of partial irrigation, followed by GO (377.000 ha), MG (322.000 ha), MS (112.100 km<sup>2</sup>), PR (42.000 ha), ES (25.000 ha) and RJ (10.000 ha). Goiás, Minas Gerais and Espírito Santo have between 33% and 35% of total plantation under irrigation. With the exception of Paraná, with only 6% of irrigation (partial), the other states have between 13% e 16% of their sugarcane under watering. To resolve the types of irrigation the following sheets were adopted: 20 to 80 mm/year (partial, 1.700.000 ha total), 200 to 300 mm/ano (under irrigated, 14.500 ha total) and 300 total 1.000 mm/ano (full irrigation, 12.800 ha total).

**KEYWORDS:** Sugar cane, irrigation, MODIS EVI.

### **INTRODUÇÃO**

A cana-de-açúcar é a cultura de maior área irrigada do País. Contudo, algumas peculiaridades dificultam sua identificação, tais como: a aplicação em larga escala de baixas lâminas de irrigação (fertirrigação e salvamento); o elevado reaproveitamento da vinhaça oriunda do processo industrial de produção do etanol e a natural mobilidade dos equipamentos de irrigação utilizados.

Embora a cana seja uma cultura que apresente boa resistência ao estresse hídrico, seu crescimento e desenvolvimento é beneficiado largamente sob condições hídricas favoráveis

com ganhos de produtividade, longevidade e qualidade. Neste sentido, a irrigação desempenha um papel relevante no ciclo de produção da cana. Tanto em regiões onde a produção depende da aplicação de lâminas de água mais significativas, que podem chegar até 1.000 mm/ano, como em regiões onde se aplicam lâminas menores, que podem variar de 20 a 80 mm/ano, sem deixar de mencionar áreas onde são aplicadas lâminas ainda menores, mas de pequeno impacto em termos de suprimento de água para a cultura. No entanto, a quantidade de água utilizada na prática da irrigação da cana-de-açúcar ainda é relativamente desconhecida.

A prática da irrigação nos canaviais no presente estudo foi dividida em dois grandes grupos, em função dos tipos de sistemas de irrigação utilizados para aplicar as lâminas de água. No primeiro grupo foi enquadrada a irrigação *plena* que visa suprir próximo a 100% da deficiência hídrica do período seco aplicando lâminas de água mais significativas (300 a 1.000 mm/ano). Ainda nesse grupo se encontra a *irrigação com déficit* (ou *semiplena*) que visa suprir em torno de 50% da deficiência hídrica do período seco aplicando lâminas de água entre 200 e 300 mm/ano. Tanto a irrigação *plena* quanto a *irrigação com déficit* são realizadas majoritariamente por meio de pivôs centrais e sistemas lineares.

No segundo grupo de irrigação se enquadrada a irrigação de *salvamento* que visa reduzir parcialmente o estresse hídrico no período seco no intuito de favorecer o desenvolvimento das lavouras com a entrada das primeiras chuvas. Em geral, na irrigação de salvamento são aplicadas lâminas de vinhaça pura ou diluída em água, originárias do processo industrial. A aplicação é realizada com carretel enrolador ou com pivô rebocável, variando de 20 a 80 mm/ano. A irrigação de *salvamento* é realizada tanto em regiões de maior deficiência hídrica, onde a produção não se viabiliza economicamente sem irrigação, quanto em regiões de menor deficiência hídrica, onde esse tipo de irrigação é praticado visando ganho de produtividade e longevidade dos canaviais. A aplicação de lâminas anuais entre 80 e 200 mm é pouco adotada, mas pode acontecer sob condições climáticas adversas. Aplicação de vinhaça em canaviais, com a finalidade de realizar fertirrigação, com lâminas muito pequenas não foi objeto deste estudo por ter baixo impacto na redução do estresse hídrico da cana e, conseqüentemente, apresentar resposta à irrigação abaixo do limiar mínimo identificável nas imagens de satélite.

O presente estudo teve por objetivo levantar as áreas de cana-de-açúcar irrigadas na região Centro-Sul por meio de técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto e análises de dados meteorológicos.

## **METODOLOGIA**

O desenvolvimento deste estudo foi pautado, essencialmente, em três variáveis que estão relacionadas com o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar: 1) a deficiência hídrica; 2) a irrigação; e 3) o vigor do canavial. A primeira e segunda exercem impacto direto sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura; enquanto a terceira é uma resposta relacionada com o crescimento e desenvolvimento da mesma. A hipótese de que a prática da irrigação proporciona ao canavial melhor condição de crescimento, quando comparado aos canaviais sem irrigação, e que isto pode ser detectado por meio do vigor do canavial medido pelas imagens de satélites (Fernández et al., 2013) justificou a realização deste estudo.

Neste sentido, foi fundamental o entendimento da relação entre a deficiência hídrica – acompanhada ou não da irrigação – e a resposta captada pelas imagens de satélite ao longo das fases de crescimento e desenvolvimento da cana. Uma vez que o método busca a diferenciação de resposta da cana relacionada às áreas irrigadas e não irrigadas, foi essencial a utilização do mapa com a distribuição geográfica dos canaviais da região Centro-Sul.

De forma sintética (detalhado a seguir), a realização do mapa de irrigação, safra 2015/2016 passou por três grandes fases. O primeiro passo foi realizar um zoneamento edafoclimático da cultura da cana-de-açúcar e que indicasse necessidades de complementação hídrica à cultura. Um segundo passo foi gerar curvas de resposta radiométrica da cultura de cana-de-açúcar para identificar padrões que indicassem o uso de irrigação. O terceiro conjunto de atividades comparou os dois primeiros produtos com a finalidade de estimar o déficit hídrico e, conseqüentemente, inferir o tipo de irrigação usado: salvamento, com déficit ou plena.

### **Zoneamento edafoclimático**

O primeiro passo do trabalho foi apresentar as regiões com maior ou menor aptidão edafoclimática para produção de cana em larga escala. Inicialmente analisou-se uma série histórica de dados meteorológicos de 15 anos. Para esse fim foi usado um conjunto de variáveis meteorológicas de uma série temporal de dados coletados de 1997 a 2012 (Xavier et al., 2015) – temperatura mínima, temperatura máxima, evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) e precipitação – e a Capacidade de Água Disponível (CAD) dos solos (CNPTIA/Embrapa). Num segundo momento, para o período de crescimento e desenvolvimento dos canaviais colhidos na safra 2015/16, foco do presente estudo foi utilizando o mesmo procedimento metodológico com variáveis meteorológicas provenientes dos modelos *Weather Research and Forecasting* (WRF) e *Climate Prediction Center* (CPC).

Um dado importante nesse conjunto foi a Deficiência Hídrica (DEF), que é a quantidade de água que a cultura necessita para suprir plenamente sua demanda a fim de expressar plenamente o potencial produtivo na ausência de outros fatores limitantes ao crescimento. A

DEF é obtida a partir da diferença entre a Evapotranspiração Máxima (ET<sub>m</sub>) e a Evapotranspiração Real (ET<sub>r</sub>). Quanto menor essa diferença melhor a cultura está sendo suprida pela água disponível no solo. Neste estudo o cálculo foi realizado com base no balanço hídrico proposto por Thornthwaite-Mather (1955), tal como em outros estudos (Monteiro e Sentelhas, 2014; Marin et al., 2006; Mota, 1979; Doorembos e Kassam, 1979).

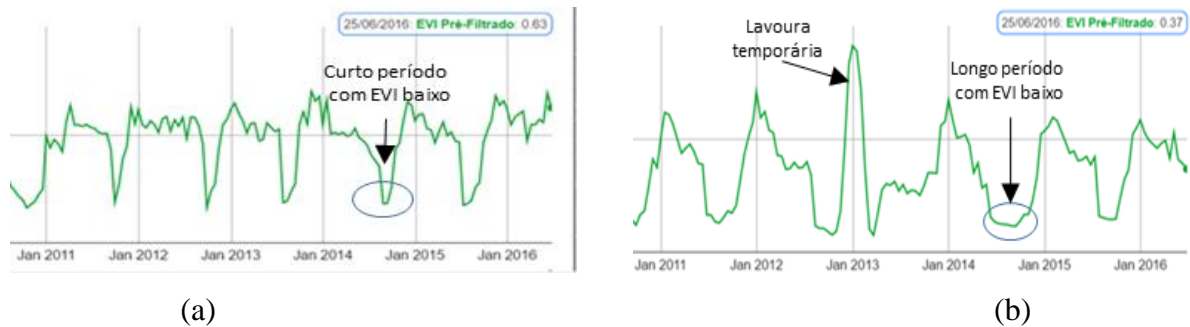
### **Séries temporais de índice de vegetação**

A área cultivada com cana na região Centro-Sul vem sendo mapeada anualmente por meio do projeto Canasat. Este projeto usa imagens de sensoriamento remoto com resolução espacial de 30 x 30 metros (Rudorff et al., 2010). A mancha de distribuição espacial desse mapeamento foi usada como máscara inicial para análise multitemporal das imagens de satélite. Essa atitude visou diminuir erros de omissão e comissão no mapeamento da cana-de-açúcar irrigada e otimizar os processos computacionais e a análise dos resultados, frente ao grande volume de dados que representam uma série temporal de um índice de vegetação.

A identificação da cana-de-açúcar irrigada se deu pela análise de séries temporais de um índice de vegetação. Para essa finalidade foi usado o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), calculado a partir de bandas espectrais do azul, vermelho e do infravermelho próximo do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, a bordo dos satélites Terra e Aqua, com resolução espacial de 250 x 250 m - 6,25 ha). Esse índice varia de 0 a 1 e os valores próximos a zero indicam pouca ou nenhuma biomassa, enquanto os valores próximos de 1 indicam maior presença de biomassa verde. A análise de uma série temporal reflete a taxa de recuperação da biomassa após o plantio ou após o corte. De forma geral, feições de recuperação rápida da biomassa indicam sujeição à irrigação, enquanto curvas mais lenientes de recuperação da biomassa indicam crescimento sob condições naturais de suprimento de água.

Os gráficos da Figura 1 plotam a série temporal de um píxeis EVI/MODIS de uma lavoura de cana-de-açúcar, irrigada por pivô central e de sequeiro. Essa série temporal é um registro histórico da dinâmica de uso e da evolução da biomassa verde nessa área específica.

Observe-se que o aumento do EVI está associado com o início do ganho de biomassa verde e a queda abrupta dos valores do EVI está associada à colheita, que remove toda a biomassa. A recuperação mais rápida na primeira figura indica uso de irrigação, em contraste com a recuperação mais lenta do EVI em situação de restrição hídrica e dependência dos aportes naturais de água pela chuva, na segunda figura.



**Figura 1.** Trajetória do EVI/MODIS de uma área com cana irrigada em pivô central (a) e Trajetória do EVI/MODIS de uma lavoura de cana de sequeiro (b). Fonte: SATVEG, EMBRAPA 2016.

### Classificação dos tipos de irrigação

A classificação dos tipos de irrigação se deu a partir da interpretação das curvas de EVI. Com base na dinâmica do índice de vegetação e da sua relação com a prática da irrigação na cultura canavieira foram definidas algumas métricas que expressem ou sintetizem características das curvas correlacionadas com a cultura irrigada ou de sequeiro. Buscaram-se características específicas das séries temporais do EVI, principalmente durante o período seco e após a colheita, quando a diferença entre as lavouras de cana com e sem irrigação fica mais evidente. Por exemplo, o número de dias após a colheita em que os valores de EVI permaneceram abaixo de um determinado limiar é um excelente indicador de velocidade de superação do estresse hídrico dessa época. Aumento rápido do EVI indica um acelerado ganho de biomassa num curto intervalo e, conseqüentemente, alta probabilidade de ser uma área irrigada. Por outro lado, incremento lento do EVI até atingir um certo limiar indica que a demora na recuperação da biomassa se deve à deficiência hídrica no período seco e, conseqüentemente, alta probabilidade de não ser irrigada. Diversas outras métricas foram derivadas deste mesmo conceito que relaciona a maior ou menor deficiência hídrica observada no período seco com maior ou menor ganho de biomassa da cultura da cana.

Também foram feitas visitas a usinas e entrevistas com especialistas. As visitas a campo e as discussões com especialistas em irrigação de canaviais forneceram os elementos necessários para definição das métricas extraídas das séries temporais das imagens de satélite, fundamentais na identificação das áreas irrigadas. Ainda, vale observar que a aplicação de lâmina de água ou vinhaça diluída nem sempre tem a resposta proporcional em biomassa. Outros fatores podem limitar o crescimento da cultura e a própria ausência de deficiência hídrica pode ser uma das causas de eventual sobre-irrigação.

Definido o conjunto de métricas mais significativas (foram testadas mais de 30 métricas), submeteu-se o conjunto de imagens a classificadores de imagens denominados *K-means* e

*Random Forest*. O trabalho desses classificadores permitiu a diferenciação entre áreas irrigadas e não irrigadas. As classificações foram aplicadas por faixa de deficiência hídrica para os canaviais da safra 2015/16, pois a dinâmica do índice de vegetação difere em função da intensidade da deficiência hídrica.

Outra análise realizada foi a interpretação prévia de áreas sabidamente irrigadas, sob pivôs e registro formal de irrigação. O padrão dessas curvas permitiu identificar outras áreas irrigadas que não tinham padrão de forma tão evidente como um pivô central. As lavouras de cana identificadas como irrigadas também passaram por refinamentos que consideram a época de colheita e o armazenamento de água no solo (inverso da DEF) em função da ocorrência de chuvas no período seco que pode ter impacto semelhante ao da irrigação por salvamento na dinâmica de crescimento e desenvolvimento dos canaviais

Desta forma, as áreas de cana em pivôs centrais e sistemas lineares foram classificadas em: a) irrigação *plena*; e b) *irrigação com déficit*, muito embora foram observadas lavouras de cana com irrigação de *salvamento* e até mesmo *sem irrigação* sob pivôs centrais e sistemas lineares. As áreas de cana fora de pivôs centrais e sistemas lineares foram classificadas em: a) *salvamento*; e b) *sem irrigação*. Entre os canaviais classificados como “sem irrigação”, se encontram também canaviais que receberam algum tipo de irrigação, mas não apresentaram resposta vegetativa significativa, ou seja, a cana não foi responsiva à irrigação.

## RESULTADOS

### Áreas irrigadas de cana-de-açúcar

A Tabela 1 sintetiza os resultados da área de cana irrigada para toda a região Centro-Sul. Ao todo, aproximadamente 1,72 milhões de hectares são irrigados (cerca de 17% da cana cultivada na região), sendo que os estados de São Paulo, Goiás e Minas Gerais possuem as maiores áreas de cultivo de cana irrigada. Do total de cana irrigada, 1,69 milhões de hectares (98,4%) é para salvamento (S)<sup>7</sup> e apenas 27,2 mil hectares (1,58% do total irrigado) é irrigada de forma plena (P) ou com déficit (ID).

A Tabela 1 apresenta a área de cana irrigada por tipo de irrigação. O Estado de São Paulo responde por quase a metade (45,8%) da área com irrigação de salvamento. Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul respondem por 22,3%, 19,4% e 6,6% da área com irrigação de salvamento, respectivamente. Esses quatro estados respondem por 94% da área de irrigação de

<sup>7</sup> Além da aplicação direta de água pura ou de reuso, a irrigação de salvamento considera também a aplicação de vinhaça diluída que, efetivamente, provocou resposta positiva no desenvolvimento do canavial.

salvamento e registram grande quantidade de vinhaça disponível para aplicação na irrigação de salvamento.

Já as áreas de irrigação com déficit estão concentradas em Goiás, com 6.970 hectares (48,3%) e Minas Gerais, com 7.456 hectares (51,7%). No Centro Sul, foram encontradas áreas com irrigação plena apenas em Minas Gerais, com 12.824 hectares.

**Tabela 1.** Área de cana com irrigação nos estados produtores de cana da região Centro-Sul.

Estado		Tipo de irrigação			Total
		Salvamento	Irrigação com déficit	Plena	
SP	[ha]	774.458			774.458
	[%]	100			
GO	[ha]	376.851	6.970		383.821
	[%]	98,2	1,8		
MG	[ha]	321.866	7.456	12.824	342.146
	[%]	94,1	2,2	3,7	
PR	[ha]	41.608			41.608
	[%]	100			
MS	[ha]	112.058			112.058
	[%]	100			
MT	[ha]	34.419			34.419
	[%]	100			
ES	[ha]	24.857			24.857
	[%]	100			
RJ	[ha]	8.796			8.796
	[%]	100			
CS	[ha]	1.694.912	14.426	12.824	1.722.162
	[%]	98,42	0,84	0,74	100

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os principais resultados, pode-se destacar que a deficiência hídrica média dos canaviais na safra 2015/16 foi muito superior à média do período 1997-2012, em decorrência da seca atípica observada entre os anos de 2014 e 2015, que afetou grande parte dos canaviais da região Centro-Sul. Além de permitir a constatação de causa-efeito sobre os canaviais, a deficiência hídrica calculada também foi fundamental no processo de associação das classes de cana aos diferentes tipos de irrigação.

Em relação à classificação dos tipos de irrigação, o estudo adotou a resposta fisiológica das plantas à irrigação como premissa e parâmetro central de discriminação. Assim, canaviais localizados em regiões com baixo déficit hídrico, com irrigação mal manejada ou que



receberam lâminas muito baixas de irrigação, dificilmente são contabilizados nesta metodologia, por não apresentarem resposta mensurável em relação à cana não irrigada.

Os resultados alcançados no levantamento apontam para uma área de cana irrigada de cerca de 1,72 milhões de hectares na safra 2015/16, na região Centro-Sul demonstrando também para a irrigação da cana, a importância dos estados de São Paulo (45,0% da área irrigada), Goiás (22,3%) e Minas Gerais (19,9%) que, em conjunto, respondem por quase 90% da área irrigada de cana na região.

Identificaram-se 1,69 milhões de hectares (98,4% do total). Nesta modalidade de irrigação são aplicadas lâminas relativamente baixas (via de regra entre 20 e 80 mm) e que, em grande parte, está sendo computada também a aplicação de águas já utilizadas pela indústria para diluição de vinhaça. Seu impacto, contudo, não pode ser minimizado, principalmente pela sua presença em áreas onde os balanços hídricos já estão comprometidos.

As bases de dados do projeto, assim como materiais adicionais, encontram-se disponíveis no Portal de Metadados da ANA (<http://www.ana.gov.br/metadados>) e no Portal SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre de Recursos Hídricos ([www.snirh.gov.br](http://www.snirh.gov.br)).

## REFERÊNCIAS

- DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H.; **Yield response to water**. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO-Plant Production and Protection, paper no 33. 1979.
- FERNANDEZ, G. A. V.; SCHERER-WARREN, M.; BIELENKI Jr, C. Taxas de uso em uma série histórica de pivôs centrais em uma bacia do Cerrado. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13-18 abril 2013, INPE, p. 320-331, 2013.
- MARIN, F. R. et al. Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v. 65, n. 1, p. 157-162, 2006.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, vol. 36, 2014, pp. 265-272.
- RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sens**. 2010, 2, 1057-1076.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Tecnology, 1955.

XAVIER, A. C.; CAREY, W. K.; BRIDGET, R. S. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980 - 2013). **International Journal of Climatology**. 2015. DOI: 10.1002/joc.4518