

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

ANDREISE MOREIRA

**CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DE TIPOLOGIAS CAMPESTRES DO RIO
GRANDE DO SUL A PARTIR DE PRODUTOS MODIS
(NDVI, EVI E GPP)**

**PORTO ALEGRE, RS
2018**

ANDREISE MOREIRA

**CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DE TIPOLOGIAS CAMPESTRES DO RIO
GRANDE DO SUL A PARTIR DE PRODUTOS MODIS
(NDVI, EVI E GPP)**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Sensoriamento Remoto do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Sensoriamento Remoto.**

Prof. Dra. Denise Cybis Fontana (orientadora)

Dra. Tatiana Mora Kuplich (co-orientadora)

Orientador de Estágio no Exterior

Dr. Clyde W. Fraisse

PORTO ALEGRE, RS

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Moreira, Andreise

Caracterização fenológica de tipologias campestres do Rio Grande do Sul a partir de produtos MODIS (NDVI, EVI e GPP) / Andreise Moreira. -- 2018.

132 f.

Orientadora: Denise Cybis Fontana.

Coorientadora: Tatiana Mora Kuplich.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Vegetação campestre. 2. Índices de vegetação. 3. Padrão fenológico. 4. Variabilidade climática. I. Fontana, Denise Cybis, orient. II. Kuplich, Tatiana Mora, coorient. III. Título.

Andreise Moreira

**CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DE TIPOLOGIAS CAMPESTRES DO RIO
GRANDE DO SUL A PARTIR DE PRODUTOS MODIS
(NDVI, EVI E GPP)**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Sensoriamento Remoto.**

Aprovado em 02 de abril de 2018

Denise Cybis Fontana, Dr^a. (UFRGS)
(Presidente/Orientadora)

Fernando Luiz Ferreira Quadros, Dr. (UFSM)

Caroline Bremm, Dra. (FEPAGRO)

Laurindo Antonio Guasseli, Dr. (UFRGS)

Porto Alegre, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Doutorado e bolsa do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) e ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo apoio acadêmico, disponibilização de recursos humano e financeiro e instalações no desenvolvimento deste estudo.

À Professora Orientadora Denise Cybis Fontana pela orientação, apoio, incentivo e exemplo profissional e humano. Muito obrigada!

À Co-orientadora Tatiana Mora Kuplich pelas contribuições ao trabalho, pela disponibilidade de uso do espaço do CRS/INPE, mas principalmente pelo incentivo, conselhos, amizade e exemplos.

Ao Professor Clyde Fraisse pela disponibilidade e orientação durante o Doutorado Sanduíche.

Aos professores e funcionários do PPGSR pela excelente contribuição na minha formação.

Aos membros da banca de qualificação Dr. Valério Pillar, Dra. Caroline Bremm e Dra. Tatiana M. Kuplich, pelas contribuições ao projeto de pesquisa.

Aos colegas de laboratório do Agroclimate por todo auxílio prestado. Agradeço, em especial à Ana Wagner pela acolhida, conversas, conselhos, incentivo e amizade, à Daianna Costa por dividir medos, anseios e risadas e ao Daniel Barreto pelas conversas e ajuda com o R.

Aos colegas de laboratório do LEAA, Juliano, Lucimara, Vagner, Eufrásio e Mauro e aos colegas do laboratório de Agrometeorologia, Daniele e Aldemir pelas contribuições na elaboração dos artigos da tese.

À Carline, Eléia e Lúcia por me receberem e acolherem em sua casa em Porto Alegre.

À Daniela W. Barbieri pela amizade nas idas e vindas de Porto Alegre.

À Silvane e Cléber, Ediane e Marco, Gabi Bracinni e Luciana Boldrin pela amizade e apoio, especialmente na fase final da tese.

Ao Henrique S. Pedroso que embora os percalços da vida sempre me apoiou e incentivou.

Aos amigos, colegas e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento da pesquisa.

À minha família, meus pais Dolores e Gema e ao meu irmão Leocádio e sua família por todo apoio, especialmente na fase de finalização do trabalho. Amo vocês!

CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DE TIPOLOGIAS CAMPESTRES DO RIO GRANDE DO SUL A PARTIR DE PRODUTOS MODIS (NDVI, EVI E GPP)

Autor: Andreise Moreira

Orientadora: Denise Cybis Fontana

Resumo: Considerando que estudos sobre fenologia vegetal são importantes para a compreensão do funcionamento e verificação da ocorrência de padrões no ciclo vegetativo das plantas, resultando em melhorias nas atividades de conservação e manejo, o objetivo desta pesquisa foi caracterizar a dinâmica fenológica de diferentes tipologias campestres no estado do Rio Grande do Sul (RS), a partir da relação entre a variabilidade de elementos climáticos intra e interanual e eventos em larga escala e a distribuição espaço-temporal das tipologias predominantes. A área de estudo abrangeu 10 tipologias predominantes de campo no estado do RS. A base de dados orbitais utilizada foi obtida de diferentes produtos relacionados ao estudo da vegetação do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), constando os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e GPP (*Gross Primary Productivity*). Também, foram utilizados dados meteorológicos provenientes da base TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e ERA Interim, para o período de fevereiro de 2000 a dezembro de 2014. O uso de séries temporais de dados NDVI e EVI/MODIS permitiram obter informações sobre a fenologia da vegetação campestre e a definição de padrões diretamente relacionados a variações meteorológicas. A sazonalidade da vegetação campestre apresenta ciclo anual bem marcado, com início e fim da estação de crescimento determinada pelas condições térmicas (temperatura do ar), porém alterado pela disponibilidade hídrica. A relação entre temperatura do ar e vigor vegetal apresentou maior correlação e tem influência direta sobre o início e fim da estação de crescimento (primavera e verão). A precipitação pluvial, no entanto, influencia as condições de crescimento/desenvolvimento das tipologias campestres, especialmente no verão, associado aos períodos de estiagem que tendem a ocorrer com maior frequência. Ambos os índices (EVI e NDVI) apresentam maior variabilidade durante a primavera e o verão, com diminuição da variabilidade durante o outono e inverno. A aplicação da Transformada de Ondaleta mostrou onde e quando ocorreram alterações no padrão fenológico da vegetação campestre e a Transformada Coerência apontou a intensidade (correlação) entre os índices de vegetação e a variabilidade das condições meteorológicas. O agrupamento das tipologias, com uso da técnica de Cluster, revelou seus comportamentos sazonais, sendo que a partir do índice EVI há a possibilidade de identificar diferenças entre as tipologias durante o outono e inverno, enquanto o NDVI apresentou diferença somente no inverno. As métricas fenológicas obtidas do Timesat para as imagens EVI permitiram obter dados importantes sobre o ciclo fenológico da vegetação campestre do RS, com a caracterização do padrão fenológico das tipologias predominantes. O uso de modelos para a estimativa da produtividade da vegetação campestre a partir do EVI revelou dentre as tipologias testadas que a CSR (campos de solos rasos) apresentou maior capacidade de explicar a variabilidade da produtividade dos campos por ser mais suscetível às variações meteorológicas. Os resultados obtidos permitiram confirmar a diversidade entre as tipologias campestres predominantes no RS, expressas por índices de vegetação, tanto no aspecto temporal como espacial. O uso dos índices de vegetação demonstrou potencial no monitoramento do padrão fenológico da vegetação campestre frente a variabilidade climática do RS.

Palavras-chave: Vegetação Campestre. Índices de Vegetação. Padrão Fenológico. Variabilidade Climática.

PHENOLOGIC CHARACTERIZATION OF GRASSLAND TYPOLOGIES OF RIO GRANDE DO SUL BASED ON MODIS PRODUCTS (NDVI, EVI AND GPP)

Author: Andreise Moreira

Adviser: Denise Cybis Fontana

Abstract: Considering that studies on vegetal phenology are important to understand the mechanisms and pattern recognition on the vegetative cycle of plants, resulting in improvements in conservation and management activities, the aim of this research was to characterize the phenological dynamics of different grassland typologies in Rio Grande do Sul State (RS), based on the relationship between the variability of intra-annual and inter-annual climatic elements, large-scale events and the spatio-temporal distribution of predominant typologies. The study area included 10 predominant grassland typologies in RS state. The orbital database used was obtained from different products related to vegetation studies of MODIS sensor (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), presenting the vegetation indices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) and GPP (*Gross Primary Productivity*). Also, meteorological data from TRMM base (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) and ERA Interim were used for the period of February 2000 to December 2014. The use of time series data from NDVI and EVI/MODIS led to information on grassland vegetal phenology and the definition of patterns directly related to meteorological variations. The seasonality of grassland vegetation presents a well marked annual cycle, with the beginning and the end of growing season determined by thermal conditions (air temperature) but altered by water availability. The relationship between air temperature and vegetal vigor presented a strong correlation and influences directly on the beginning and on the end of the growth season (spring and summer). The rainfall, however, influences growth/development conditions of grassland typologies, especially in summer, associated to drought periods that tend to occur more frequently. Both indices (EVI and NDVI) presented a greater variability during spring and summer, with a lesser variability during fall and winter. The application of Ondaleta Transform showed where and when alterations occurred in the phenological pattern of grassland vegetation and the Coherence Transform pointed the intensity (correlation) between vegetation indices and the variability of meteorological conditions. The grouping of typologies, using the Cluster technique, revealed their seasonal behaviors, and from the EVI index there is the possibility of identifying differences between typologies during fall and winter, whereas NDVI showed differences only in winter. The phenological metrics obtained from Timesat to EVI images allowed to obtain important data on the phenological cycle of grassland vegetation of RS state, with a characterization of the phenological pattern. The use of models for estimation of productivity of grassland vegetation based on EVI revealed among the typologies tested that the CSR (shallow soils grasslands) presented greater ability to explain the variability of grasslands productivity because it is more susceptible to meteorological variations. The obtained results allowed for the confirmation of diversity among the grassland typologies predominant in RS state, expressed by vegetation indices, both in temporal and spatial aspects. The use of vegetation indices demonstrated potential on the monitoring of phenological pattern of grassland vegetation considering the climatic variability of RS state.

Keywords: Grassland Vegetation. Vegetation Indices. Phenological Pattern. Climatic Variability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 Área e período de estudo	13
1.4 Fundamentação Teórica	15
1.4.1 Distribuição da vegetação campestre no Rio Grande do Sul.....	15
1.4.2 Caracterização das tipologias campestres.....	16
1.4.3 Sensoriamento remoto e produtos MODIS para estudo da vegetação	21
1.4.4 Séries temporais e sua aplicação em estudos com vegetação campestre	25
1.4.5 Séries temporais e análises fenológicas.....	27
REFERÊNCIAS	29
2 RESULTADOS APRESENTADOS NA FORMA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS	35
2.1 ARTIGO 1 - Dados meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação	35
2.2 ARTIGO 2 – Abordagem ondaleta aplicada em série temporal EVI/MODIS e dados meteorológicos (Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data)	50
2.3 ARTIGO 3 - Seasonal dynamics of vegetation indices as the criterion of grouping of grassland typologies	75
2.4 ARTIGO 4 - Métricas fenológicas da vegetação campestre do Rio Grande do Sul ...	94
2.5 ARTIGO 5 - Indicativo da Produtividade da vegetação campestre a partir de série temporal de <i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI)	111
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	130

1 INTRODUÇÃO

A vegetação campestre do estado do Rio Grande do Sul (RS) está distribuída entre os biomas Mata Atlântica e Pampa. O RS concentra em torno de 75% da vegetação campestre do Brasil e apresenta alta diversidade de espécies vegetais e animais. Os campos no RS são responsáveis por garantir serviços ambientais importantes como a conservação de recursos hídricos e o provimento de recursos energéticos, sendo utilizados como a principal fonte forrageira para a pecuária de corte.

No entanto, vem ocorrendo uma redução das áreas de vegetação campestre devido à expansão da fronteira agrícola no RS iniciada na década de 1970 com a introdução de culturas agrícolas, como arroz, milho, trigo e soja. Mais recentemente, soma-se a esta conversão as extensas áreas de silvicultura, com o plantio de espécies exóticas como *Pinus sp.*, *Acácia spp.* e *Eucalyptus spp.*, assim como a supressão da vegetação campestre por pastagem plantada para o desenvolvimento da pecuária. Mesmo com a diminuição significativa das áreas de vegetação campestre, a atividade agropecuária tem se mantido importante para a economia do Estado, que detém o sexto maior rebanho de bovinos, o segundo maior rebanho de equinos e o maior rebanho de ovinos do território nacional (IBGE, 2015). O rebanho do RS se concentra na área de abrangência do bioma Pampa, mas tem relevante contribuição da região dos campos de altitude, no bioma Mata Atlântica.

Associado às pressões antrópicas, decorrentes de alterações no uso e cobertura da terra, estudos demonstram que ecossistemas e sistemas agrícolas, em diferentes regiões do mundo vêm sendo afetados em função de efeitos causados por variações nos elementos climáticos. De acordo com o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (2014) as tendências de variação nos padrões da precipitação pluvial e elevação da temperatura do ar em escalas regional e global podem influenciar a fenologia, a morfologia e a distribuição geográfica das espécies de plantas, alterando os ecossistemas. O aumento da temperatura do ar está associado ao incremento de dióxido de carbono na atmosfera e um dos fatores que contribuem significativamente para estas emissões são as mudanças causadas no uso e cobertura da terra pelas atividades humanas.

A análise de diferentes formações vegetais pode ser utilizada como indicador da variabilidade causada por mudanças nos elementos do clima. Fatores morfológicos e fisiológicos estão diretamente relacionados à capacidade de desenvolvimento, crescimento e produtividade de espécies vegetais. O estudo da relação entre o ambiente e as condições de temperatura do ar, umidade, insolação e disponibilidade hídrica (elementos climáticos) permite identificar o potencial

de adaptação das espécies quando houver déficit ou excesso nesses fatores. Além disso, ocorrem mudanças características de acordo com as estações do ano.

O uso de técnicas de Sensoriamento Remoto vem sendo empregada em muitos estudos e têm demonstrado resultados capazes de descrever o estado de conservação, produtividade e fenologia da vegetação, assim como para identificar a ocorrência de perturbações condicionadas por alterações nos elementos climáticos. Esses resultados são possíveis, pois o uso de imagens de satélite possibilita conhecer, avaliar e monitorar de modo contínuo os processos dinâmicos da vegetação.

Estudos relacionados à análise fenológica da vegetação são relevantes, visto que a variação nos elementos climáticos pode alterar o início das fases fenológicas, como o período de crescimento, senescência e a distribuição da vegetação. Muitos trabalhos têm utilizado imagens de satélite com o objetivo de estabelecer uma relação entre os elementos do clima e diferentes formações vegetais, sendo que análises espaço-temporais a partir de dados orbitais permitem monitorar os processos dinâmicos da vegetação.

O uso de dados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) permite obter informações sobre extensas áreas, de forma gratuita. Apesar da moderada resolução espacial, este sensor possui alta resolução temporal, o que possibilita o monitoramento da fenologia da vegetação e das alterações causadas por mudanças nos elementos climáticos ao longo do tempo.

Diante desta abordagem, a hipótese de pesquisa considerou que a dinâmica fenológica de diferentes tipologias campestres é influenciada pela variabilidade dos elementos climáticos (precipitação pluvial e temperatura do ar), sendo possível caracterizar o padrão fenológico dos campos no RS por meio de dados obtidos de produtos MODIS relacionados à vegetação, e avaliar as alterações neste padrão consequentes da variabilidade das condições meteorológicas estimadas pela base de dados do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e ERA Interim. A associação do MODIS, TRMM e ERA Interim compõem uma base de dados útil e confiável capaz de auxiliar no entendimento dos impactos de eventos de variabilidade ou de mudanças climáticas sobre o padrão fenológico da vegetação campestre.

A presente pesquisa buscou avaliar a relação entre a fenologia de diferentes tipologias campestres no estado do RS e a variabilidade de elementos climáticos (precipitação pluvial e temperatura do ar), a partir de dados obtidos de produtos do MODIS relacionados à vegetação, como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e GPP (*Gross Primary Productivity*). Os resultados elaborados poderão contribuir para a manutenção das áreas de vegetação campestre nativa, por meio do conhecimento da vulnerabilidade das diferentes tipologias diante das variações nos elementos climáticos e servir como indicador de produtividade

e sustentabilidade da produção pecuária, além da indicação de procedimentos metodológicos em atividades de mapeamento, monitoramento e implementação de estratégias de conservação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Utilizar indicadores biofísicos oriundos dos produtos MODIS para identificar o padrão fenológico médio das diferentes tipologias campestres do estado do Rio Grande do Sul e relacionar sua variabilidade às variáveis meteorológicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a qualidade das estimativas de precipitação pluvial obtidas do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e de temperatura do ar do ERA Interim em condições de clima subtropical utilizando dados meteorológicos observados e índices de vegetação;

- Identificar padrões relacionados à fenologia dos campos do bioma Pampa e Mata Atlântica e a relação com variáveis meteorológicas, em uma série temporal de dados de EVI/MODIS, utilizando a abordagem ondaleta (Transformada ondaleta - TO e Transformada Coerência - TC);

- Caracterizar o padrão médio sazonal e sua variabilidade a partir de séries temporais de índices de vegetação e identificar semelhanças no padrão sazonal de diferentes tipologias campestres;

- Determinar e caracterizar métricas fenológicas para vegetação campestre e avaliar o padrão de distribuição espaço-temporal destas métricas sob influência da variabilidade climática subtropical;

- Elaborar um modelo simplificado para indicativo da produtividade dos campos a partir do índice de vegetação EVI e GPP/MODIS.

1.3 Área e período de estudo

O Rio Grande do Sul (RS) está localizado no extremo sul do Brasil, entre as latitudes 27° 05' e 33° 45' S e longitudes 49° 43' e w 57° 39' W. Abrange 497 municípios e possui área total de 281.737 km² (IBGE, 2014). O estudo teve como foco as áreas campestres do estado do RS, divididas em 10 tipologias campestres, obtidas com base em Hasenack et al. (2010) e Boldrini e Longhi-Wagner (2011). Estes autores classificaram a vegetação campestre em 10 regiões fisionômicas, considerando as características geográficas do Estado e a florística da vegetação (Figura 1).

As 10 tipologias campestres predominantes no RS estão distribuídas em dois diferentes biomas. No bioma Mata Atlântica, em que se destacam os Campos de altitude (CAL), e no bioma Pampa com a presença do Campo litorâneo (CLI), Campo arbustivo (CAR), Campo misto de andropogôneas e compostas (CMAC), Campo com espinilho (CCE), Campo de solos rasos (CSR), Campo com barba de bode (CBB), Campo com areais (CCA), Campo gramínoso (CGR) e Campo misto do Cristalino Oriental (CMC).

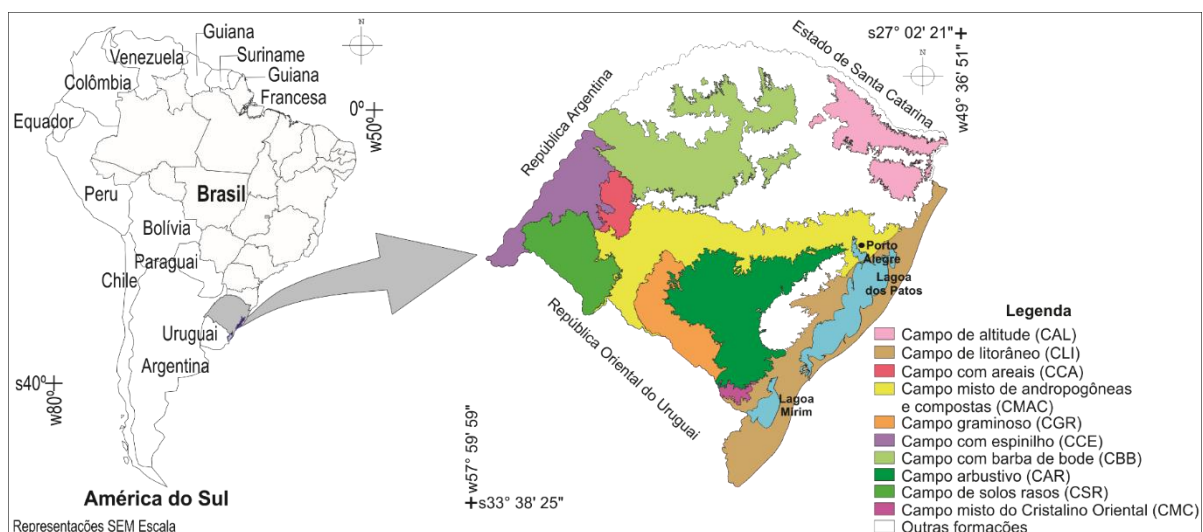


Figura 1. Localização da área de estudo e distribuição das tipologias campestres no RS.

Fonte: Malha Digital, IBGE (2013); Adaptado de Hasenack et al. (2010).

O período de estudo foi delimitado de fevereiro de 2000 a dezembro de 2014 e utilizou uma série temporal de dados orbitais obtidos do sensor MODIS e dados estimados de precipitação pluviométrica oriundos do TRMM e de temperatura do ar do ERA Interim.

Referente aos aspectos físicos geográficos do RS destaca-se do relevo o Planalto Meridional, situado na metade norte do Estado e suas bordas, que correspondem à chamada Serra Geral. A sudoeste encontra-se a Cuesta do Haedo e ao centro tem-se a Depressão Central. Ao sul

localiza-se o Escudo Sul-Rio-Grandense, ou Serra do Sudeste, e a leste tem-se a Planície Costeira (SCP, 2002).

O clima do Estado, segundo o sistema de classificação de Köppen, é temperado ou “C”, tipo úmido ou “Cf”, com as variedades “Cfa” e “Cfb”, sub-tropical e temperado, respectivamente (ALVARES et al., 2013). Quanto à temperatura do ar verifica-se grande variação sazonal com verões quentes e invernos rigorosos. As temperaturas médias variam entre 15 e 18 °C, com mínimas de até -10 °C e máximas de 40 °C (SCP, 2002).

Com relação à precipitação pluvial, o RS apresenta distribuição relativamente equilibrada ao longo de todo o ano. O volume, no entanto, é diferenciado. Na metade sul do Estado a precipitação pluvial média varia entre 1.299 e 1.500 mm e na metade norte entre 1.500 mm e 1.800 mm, com intensidade maior a nordeste do Estado (SCP, 2002). A variabilidade anual da precipitação pluvial para o Rio Grande do Sul é elevada, pois está suscetível aos efeitos de aumento e redução de precipitação provocados pelo fenômeno El Niño e La Niña, respectivamente (JACÓBSEN; FONTANA; SHIMABUKURO, 2004).

1.4 Fundamentação Teórica

1.4.1 Distribuição da vegetação campestre no Rio Grande do Sul

O RS concentra aproximadamente 75% da vegetação campestre do Brasil (OVERBECK et al., 2007), classificada como parte de dois diferentes biomas: Mata Atlântica e Pampa. O Bioma Pampa ocupa cerca de 63% do território do Estado e pode ser encontrado na Depressão Central, Serra do Sudeste e região da Campanha, na metade sul do Estado. Esse tipo de campo é semelhante aos pampas do Uruguai e Argentina (BEHLING et al., 2009).

Os campos do Bioma Mata Atlântica são encontrados na região do Planalto Meridional, e se estendem pelos estados de Santa Catarina e Paraná. Também conhecidos como Campos de Cima da Serra ou Campos de Altitude são formados por extensões de áreas campestres associadas com a floresta de araucária (*Araucaria angustifolia*) (BEHLING et al., 2009), formando mosaicos de vegetação campestre e floresta. Este aspecto natural pode ser observado apenas em algumas áreas, pois as principais atividades desenvolvidas na região são a pecuária e a agricultura, com os cultivos de soja, arroz, milho e trigo (IBGE, 2006).

As formações campestres originais no RS ocupavam aproximadamente 131.000 km² (HASENACK; CORDEIRO; COSTA, 2007), no entanto, devido sua conversão para fins econômicos ou urbanização, estima-se que a área ocupada por campos em 2017, somava em torno de 26%, concentrada nas regiões: Litoral, Campanha, Fronteira Oeste e Sul do Estado (NESPro, 2018).

Em função da expansão das atividades agrícolas e da silvicultura sobre as áreas de campo, a conservação e manutenção da biodiversidade destes biomas são temas atuais (PROBIO, 2010; MMA, 2011), tornando-se cada vez mais necessário o conhecimento da dinâmica fenológica de suas coberturas vegetais, devido às variações dos elementos climáticos que influenciam o desenvolvimento das plantas.

Nos dois biomas, a vegetação campestre apresenta grande biodiversidade e espécies vegetais de alto valor forrageiro, com predomínio de vegetação herbácea. No RS são conhecidas mais de 2.600 espécies de plantas, pertencentes a 89 famílias, com diferentes variedades ou subespécies, sendo característica a coexistência de espécies C₃ e C₄, com diferentes eficiências na produção de biomassa. “Destas, 2.150 espécies ocorrem nos Campos do bioma Pampa e 1.620 nos Campos do bioma Mata Atlântica” (BOLDRINI et al., 2015).

As características geográficas do RS como clima, topografia e heterogeneidade dos solos associadas às variações florísticas locais permitiram classificar a vegetação campestre em regiões fisionômicas (BOLDRINI, 1997). Também, considerando as variáveis: altitude, declividade, solo,

vegetação e uso da terra e a partir da descrição das tipologias campestres elaboradas por Boldrini (2009) e Berreta (2008), definiram-se para o RS e Uruguai unidades espaciais homogêneas, correspondentes a treze sistemas ecológicos das Savanas Uruguaias (HASENACK et al., 2010).

Os sistemas ecológicos correspondentes ao RS são: Campo com Barba-de-bode, Campo com Espinilho, Campo com Areais, Campo Misto com Andropogôneas e Compostas, Campo Litorâneo, Campo Arbustivo, Campo Graminoso, Campo de Solos Rasos e Campo misto do Cristalino Oriental. No Uruguai predominam: Campo com Flechilhas do Cristalino Central, Campo com Flechilhas do Cristalino Meridional, Campo com Flechilhas do Cristalino Ocidental e Floresta Estacional (HASENACK et al., 2010).

A partir deste trabalho, delimitou-se para a elaboração desta análise as tipologias campestres correspondentes ao RS, e acrescentou-se o Campo de Altitude descrito por Boldrini e Longhi-Wagner (2011) (Figura 1).

1.4.2 Caracterização das tipologias campestres

A descrição das tipologias campestres delimitadas para este estudo foi caracterizada principalmente com base na vegetação predominante (HASENACK et al., 2010; BOLDRINI; LONGHI-WAGNER, 2011), mas também considera as características geomorfológicas, climáticas e relacionadas ao manejo e uso da terra (OVERBECK et al., 2015). Assim, tem-se a descrição do:

- **Campo de altitude:** nesta região, a vegetação é representada por grandes extensões de campo, entremeados com mata de araucária e turfeiras. As araucárias (*Araucaria angustifolia*), associadas a outras espécies como o pinheiro-bravo (*Podocarpus lambertii*) e a bracatinga (*Mimosa scabrella*) cobertas por barba-de-pau (*Tillandsia usneoides*), encontram-se grande quantidade de capim-caninha (*Andropogon lateralis*), espécie dominante e característica da área. Outras espécies típicas são capim-mimoso (*Schizachyrium tenerum*), o capim-cabeludo (*Axonopus siccus*) e as carquejas (*Baccharis crispa*, *Baccharis articulata*), além de espécies de diversas famílias, algumas muito vistosas, como as compostas, as leguminosas, as verbenáceas e as solanáceas (BOLDRINI, 2009; BOLDRINI; LONGHI-WAGNER, 2011). No final do inverno, estes campos ficam amarelados devido à quantidade de palha seca que se acumula após o frio intenso, quando o uso tradicional de queimadas é realizado em parte da região. Em geral, os campos nesta região, pertencem a unidade geomorfológica do Planalto Meridional e desenvolvem-se sobre solos rasos, onde a vegetação original ainda não foi substituída por lavouras ou pela silvicultura (OVERBECK et al., 2015).
- **Campo litorâneo:** nesta região, os solos são arenosos e pouco estruturados e pertencem a unidade geomorfológica da Planície Costeira. Há uma presença marcante de espécies prostradas,

estoloníferas ou rizomatosas que cobrem bem o solo. As gramíneas predominam nas áreas de solos bem drenados, e as ciperáceas em solos mal drenados, caracterizando estes campos (BOLDRINI et al., 2010). Nesta região, a vegetação campestre original foi fortemente reduzida e convertida para outros usos (OVERBECK et al., 2015). As principais espécies de gramíneas destes campos são de porte baixo, radicantes e promovem uma boa cobertura do solo, tais como *Ischaemum minus*, *Axonopus parodii*, *A. obtusifolius*, *Paspalum pauciciliatum*, *P. modestum*, *P. jesuiticum*, *P. pumilum* e *Panicum aquaticum*. Cyperaceae é outra família que se destaca nesta formação, formando populações densas, como é o caso de *Eleocharis bonariensis* e *E. viridans*. Por outro lado, algumas espécies apresentam indivíduos isolados, como é o caso de *Pycreus polystachyus* e de *Rhynchospora holoschoenoides*, *R. Barrosiana*, *R. tenuis* e *Scleria distans*. Muitas leguminosas são comuns nesta região, destacando-se *Stylosanthes leiocarpa*, *Indigofera sabulicola*, *Desmodium adscendens*, *D. barbatum*, *D. incanum*, *Adesmia latifolia*, *Vigna longifolia* e *V. luteola*. Nas baixadas mais úmidas são facilmente encontradas *Mimosa bimucronata* (maricá), *Eryngium pandanifolium*, *Baccharis spicata* e *Centella asiática* (HASENACK et al., 2010).

- **Campo com areais:** localizados no centro-oeste do Estado, distribuídos entre as unidades geomorfológicas da Depressão Central e Planalto Meridional, apresentam solos arenosos (Neossolos Quartzarênicos), sujeitos a fortes processos de erosão e arenização que associados às condições climáticas, especialmente associada a períodos de estiagem e déficit hídrico no verão, criam circunstâncias extremas para a sobrevivência das plantas. Em decorrência disto, esses campos apresentam cobertura vegetal baixa e muitas plantas com características associadas à adaptação em condições de estresse hídrico. As gramíneas com rizomas são dominantes e há alta riqueza de espécies da família de compostas (OVERBECK et al., 2015). A tipologia destes campos é determinada por *Axonopus argentinus*, *Elyonurus* sp. (o capim-limão) e *Paspalum nicorae*. Outras espécies encontradas são *Paspalum stellatum*, *Pappophorum macrospermum*, *Paspalum polyphyllum*, *Panicum triholaenoides*, *Jatropha isabelii*, *Acanthospermum australe*, *Vernonia macrocephala* e *Baccharis multifolia*. Uma leguminosa comum nas áreas de arenização é *Lupinus albescens*, importante indicadora para recuperação da fertilidade do solo. Estes campos apresentam uma flora diferenciada das demais tipologias de campo por apresentar elementos com adaptações a um ambiente árido como, por exemplo, *Cereus hildmannianus*, *Parodia ottonis*, *Butia lallemantii*, *Asteropsis macrocephala*, *Trixis verbascifolia*, *Centratherum camporum*, *Noticastrum acuminatum*, *Froelichia tomentosa*, *Baccharis albolanosus* e *Gochnatia cordata*. Muitas espécies são endêmicas desta formação e apresentam uma intensa pilosidade que confere uma coloração acinzentada à paisagem (HASENACK et al., 2010).

- **Campo misto com Andropogôneas e Compostas:** o predomínio desta tipologia ocorre na região central do RS, sobre a unidade geomorfológica da Depressão Central, região de relevo rebaixado

e composto por vales de rios, com a presença de diferentes tipos de solos. Os campos apresentam elevada composição de compostas, entremeadas às gramíneas (BOLDRINI et al., 2010), caracterizado pela presença de dois estratos, um mais baixo, dominado por gramíneas rizomatosas, como o capim-forquilha (*Paspalum notatum*) presente nos topos e encostas das coxilhas e pela grama-tapete (*Axonopus affinis*) e *Paspalum pumilum* nas baixadas úmidas. O estrato mais alto é coberto por touceiras de gramíneas cespitosas, como o capim-caninha (*Andropogon lateralis*), juntamente com outras andropogôneas, como *Andropogon selloanus*, capim-rabo-de-burro (*Schizachyrium microstachyum*) e a macega-estaladeira (*Saccharum angustifolium*) e nas áreas bem drenadas, as barbas-de-bode (*Aristida jubata* e *A. filifolia*) e os caraguatás (*Eryngium* spp.) formam touceiras que compõem o estrato superior da comunidade vegetal. Dentre as leguminosas mais comuns, destaca-se o pega-pega (*Desmodium incanum*). Em campos com sobrepastoreio, a comunidade vegetal torna-se rala com grandes proporções de solo descoberto onde as sementes das compostas, que são numerosas, se instalam, destacando-se a roseta (*Soliva pterosperma*), o alecrim-do-campo (*Vernonia nudiflora*), a maria-mole (*Senecio brasiliensis*), bem como *Senecio selloi*, *S. heterotrichus*, o quitoco (*Pluchea sagittalis*) e a buva (*Conyza boneriensis*) (HASENACK et al., 2010; OVERBECK et al., 2015).

- **Campo graminoso:** predominam solos rasos e pedregosos e os campos desenvolvem-se entre as unidades geomorfológicas Depressão Central e Planalto-Sul-Riograndense ou Serra do Sudeste. A tipologia é dominada por espécies herbáceas, essencialmente gramíneas, com destaque para o capim-forquilha (*Paspalum notatum*), que é rizomatosa, além de outras de hábito cespitoso, como o capim-caninha (*Andropogon lateralis*), a colade-lagarto (*Coelorachis selloana*), o capim-melador (*Paspalum dilatatum*) e barba-de-bode (*Aristida uruguayensis*). Com uma alta participação destacam-se várias espécies hibernais como as flechilhas (*Stipa hyalina*, *S. papposa*, *S. setigera*, *S. philippii*, *S. rosenfurtii*), os cabelos-de-porco (*Piptochaetium bicolor*, *P. stipoides*, *P. uruguense*), *Melica argyrea* e *M. rígida*. Em meio a estas espécies eretas desenvolvem-se ciperáceas em locais muito úmidos, como *Carex phalaroides*, muito comum em meio às gramíneas e *Eleocharis dunensis*. Entre as leguminosas, o trevo nativo (*Trifolium polymorphum*) e as babosas (*Adesmia bicolor*, *A. securigerifolia*, *A. punctata* e *A. latifolia*) são frequentemente encontradas formando manchas devido ao hábito prostrado-estolonífero (HASENACK et al., 2010).

- **Campo com espinilho:** o relevo desta região é caracterizado por área planas e baixas, pertencentes a unidade geomorfológica Planalto Meridional, onde são encontradas manchas de *Paspalum quadrifarium* associadas a outras espécies menos robustas como *Bromus auleticus* (cevadilha), *Stipa papposa*, *S. setigera* (flechilhas), *Phylacanescens* e *Grindelia pulchella*. O estrato inferior é contínuo, formado por uma grande diversidade de gramíneas como *Paspalum alnum*, *P. dilatatum* (capim-melador), *P. pauciciliatum*, *P. jesuiticus*, *P. acuminatum*, *Mnesithea*

selloana (cola-de-lagarto), *Setaria vaginata* e *S. fiebrigii*. Nesta região é possível encontrar leguminosas estoloníferas como *Arachis burkartii* (amendoim-nativo) e *Adesmia bicolor* (babosa-do-campo). Em banhados é comum a presença das gramas-boiadeiras (*Leersia hexandra* e *Luziola peruviana*) além de outras espécies menos frequentes como *Rhynchoryza subulata*, *Coelorachis balansae*, *Aeschynomene montevidensis*, *Rhynchospora scutellata* e *Vicia tephrosioides*. Associadas a essa matriz campestre aparecem arvoretas esparsas de *Vachellia caven* (espinilho), *Prosopis affinis* (nhanduvá), *Prosopis nigra* (algarrobo), *Parkinsonia aculeata* (cina-cina) e *Aloysia gratissima* (erva-santa) (HASENACK et al., 2010).

- **Campo com barba de bode:** distribuídos nas regiões norte e nordeste do Estado, estes campos encontram-se muito descaracterizados pela conversão da vegetação original em agricultura, principalmente para a produção de grãos (soja e milho). Desenvolvem-se sobre a unidade geomorfológica Planalto Meridional, com predomínio de Latossolos, solos argilosos, profundos, bem estruturados e porosos ideais para o desenvolvimento da agricultura como a que predomina na região. Assim, poucas áreas contínuas de campo ainda são encontradas, em sua maior parte presentes na região nordeste. Dentre as gramíneas, a maioria é estival e apresenta metabolismo fotossintético C₄. São poucas as espécies representantes de ciclo hibernar com metabolismo fotossintético C₃ (BOLDRINI et al., 2010). Os campos apresentam dois estratos: no superior predomina a espécie *Aristida jubata* e no inferior gramíneas rizomatosas, destacando-se nas áreas mais secas sobre solos argilosos o capim-forquilha (*Paspalum notatum*) e a grama-missioneira (*Axonopus jesuiticus*) e em solos secos e arenosos, *P. nicorae*. Nos locais úmidos, como nas bordas de banhados vegetam espécies estoloníferas como a grama-tapete (*A. affinis*) e rizomatosas como *Paspalum pumilum*. Além disso, pode-se encontrar representantes de outras famílias que são relativamente frequentes, como por exemplo, *Borreria poaya* de flores azuis, *Staelia thymoides* de flores brancas (Rubiaceae), *Stylosanthes leiocarpa* (Fabaceae), *Melochia chamaedrys* de flores amarelas (Malvaceae), *Glandularia peruviana* (Verbenaceae) e *Waltheria douradinha* (Malvaceae) (HASENACK et al., 2010).

- **Campo arbustivo:** presentes na unidade geomorfológica Planalto-Sul-Riograndense ou Serra do Sudeste, desenvolvem-se sobre solos rasos e pedregosos, denominados de Neossolos Litólicos. Associados a estes ocorrem Argissolos Vermelho-Amarelos e outros solos de cobertura menos extensa (BOLDRINI et al., 2010). O relevo é em parte acidentado e os campos distribuem-se em mosaicos com vegetação arbórea e arbustiva com espécies como: *Mimosa ramulosa*, *Eupatorium buniifolium*, *Baccharis dracunculifolia*, *B. articulata*, *B. pentodonta*, *B. riograndensis*, *B. rufescens*, *Heterothalamus allienus*, *Dodonea viscosa*, *Scoparia ericacea*, além de várias espécies de *Croton* e *Eryngium horridum*. Também, espécies de gramíneas cespitosas eretas são comuns, como as barbas-de-bode (*Aristida jubata*, *A. filifolia*, *A. spegazzini*, *A. circinalis* e *A. venustula*),

Andropogon ternatus, *A. selloanus* e *Stipa filifolia*. É nesta região que as leguminosas estão mais bem representadas tanto no campo, quanto em beiras de estrada, junto da vegetação arbustiva, destacando-se *Lathyrus pubescens*, *Rhynchosia diversifolia*, *Clitoria nana*, *Adesmia punctata*, *A. incana*, *Galactia neesii* e *Eriosema tacuarembense*. Apresenta ainda, muitas espécies endêmicas com destaque para as cactáceas (HASENACK et al., 2010; OVERBECK et al., 2015).

- **Campo de solos rasos:** a vegetação desenvolve-se sobre a unidade geomorfológica Depressão Central, em maioria, e parte do Planalto Meridional mais à oeste, região com predomínio de solos muito rasos, de origem basáltica denominados Neossolos Litólicos, pedregosos, com baixa retenção de umidade e associados ao déficit hídrico no verão (BOLDRINI et al., 2010). Neste ambiente estressante vegetam gramíneas cespitosas de porte baixo como *Aristida murina*, *A. echinulata*, *A. venustula*, *A. uruguayensis*, *Bouteloua megapotamica*, *Chloris grandiflora*, *Danthonia cirrata*, *Eragrostis neesii*, *Eustachys brevipila*, *Microchloa indica*, *Schizachyrium spicatum*, *Tridens hackelii* e *Tripogon spicatus*. Em áreas com rochas expostas encontram-se compostas como *Micropsis spathulata*, *Soliva pterosperma* e *Sommerfeltia spinulosa* e leguminosas como *Adesmia incana*, *Indigofera asperifolia*, *Mimosa burkartii*, *Rhynchosia diversifolia* e *Senna nana*. Destacam-se espécies de outras famílias, como *Lippia vilaflorendana*, verbenácea de flores amarelas, *Nierembergia linariifolia*, solanácea de flores branco-azuladas que forma grandes manchas, exclusiva deste tipo de formação e tóxica para herbívoros, *Convolvulus laciniatus*, convolvulácea de folhas muito recortadas, *Ditaxis acaulis*, euforbiácea densamente pilosa e várias espécies de *Oxalis* spp. (oxalidáceas). Além destas, são comuns também *Baccharis coridifolia* (Asteraceae), *Ammoselinum rosengurtii* e *Eryngium echinatum* (Apiaceae), *Paronychia chilensis* (Caryophyllaceae) e *Dichondra microcalyx* (Convolvulaceae) (HASENACK et al., 2010).

- **Campo misto do Cristalino Oriental:** a vegetação destes campos, distribuída na unidade geomorfológica Planalto-Sul-Riograndense ou Serra do Sudeste, apresenta alta pressão de pastejo com uma constituição marcada por espécies estivais e escassas espécies hibernais. Entre as estivais destacam-se *Cynodon dactylon*, *Stenotaphrum secundatum*, *Sporobolus indicus*, *Andropogon ternatus*, *Axonopus affinis*, *Aristida murina*, *Coelorachis selloana*, *Eragrostis neesii*, *Paspalum notatum*, *P. plicatulum*, *P. dilatatum*, *Botriochloa laguroides* e *Steinchisma hians*. Entre as hibernais destacam-se *Piptochaetium montevidense*, *P. stipoides*, *Briza brizoides*, *B. minor*, *Carex phalaroides*, *Gaudinia fragilis* e *Vulpia australis*. Além destas, aparecem em áreas mais úmidas *Baccharis trimera* e *Adesmia securigerifolia*. Também são comuns as ervas pequenas como *Chevreulia sarmentosa* e *Micropsis spathulata* (HASENACK et al., 2010).

1.4.3 Sensoriamento remoto e produtos MODIS para estudo da vegetação

Técnicas de sensoriamento remoto têm sido aplicadas desde a década de 1960 na extração e monitoramento de parâmetros biofísicos da vegetação principalmente por meio de índices de vegetação (JENSEN, 2009). Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais e podem ser utilizados para monitorar as variações e crescimento da vegetação ao longo de um período e utilizados para estabelecer uma relação entre as variáveis meteorológicas e a influência destas sob a vegetação.

Diversos estudos com base em índices de vegetação analisaram a dinâmica da vegetação em séries temporais (SPANNER et al., 1990; HUETE et al., 2002; ROSEMBACK et al., 2010, WAGNER et al., 2013) obtendo informações sobre a fenologia da vegetação e caracterização de aspectos sobre seu funcionamento como evapotranspiração (MU et al., 2007; MONTENEGRO et al., 2009), balanço de energia e produtividade primária (ZHAO et al., 2005; ZHANG et al., 2014). A caracterização de padrões fenológicos em séries temporais com uso de índices de vegetação permite a identificação e quantificação de anomalias e efeitos de variações nos elementos climáticos ou ambientais nestes ciclos, assim como o estabelecimento de modelos para a previsão de crescimento, desenvolvimento e produtividade.

Os índices de vegetação minimizam a variabilidade causada por fatores externos à vegetação e servem como indicadores do crescimento e vigor da vegetação, mostrando-se com isso, adequados para o monitoramento de mudanças fenológicas nas formações vegetais e áreas agrícolas no Brasil (FONTANA; ALMEIDA; JACÓBSEN, 2007; RIZZI; RUDORFF, 2007; KUPLICH; MOREIRA; FONTANA, 2013).

A partir do ano 2000, imagens e produtos provenientes do sensor MODIS, a bordo da plataforma Terra passaram a ser disponibilizados. Alguns destes produtos, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) – MOD 13; LAI (*Leaf Area Index*) e FPAR (*Fractional Photosynthetically Active Radiation*) – MOD 15; e, GPP (*Gross Primary Productivity*) e NPP (*Net Primary Productivity*) – MOD 17, tem sido utilizados no estudo da vegetação e estão relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa verde, porcentagem de cobertura verde e índice de área foliar (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009; JENSEN, 2009).

Os índices NDVI e EVI são muito utilizados em estudos com diferentes tipos de vegetação, pois permitem a construção de perfis sazonal e temporal da vegetação, caracterizado pela duração do período de crescimento, pico de verde e períodos de senescência determinando o padrão fenológico de diferentes tipologias vegetais.

O NDVI (ROUSE et al., 1973), é dado pela razão entre as reflectâncias das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica em imagens multitemporais (SOARES; BATISTA; SHIMABUKURO, 2007). Por ser mais sensível à presença de clorofila e outros pigmentos da vegetação responsáveis pela absorção da radiação fotossinteticamente ativa, o NDVI está diretamente relacionado à produtividade da vegetação. O NDVI é obtido pela Equação 1:

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (1)$$

sendo ρ_{IVP} a reflectância no infravermelho próximo e ρ_V a reflectância no vermelho.

Por apresentar rápida saturação em seus valores, o NDVI é pouco sensível à detecção de variações no aumento de biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento, ou seja, “o índice estabiliza em um patamar apresentando um mesmo valor, embora a densidade do dossel aumente” (WARDLOW; EGBERT, 2010; ZANZARINI et al., 2013).

Em áreas que possuem maior densidade de biomassa, o EVI apresenta melhor sensibilidade às alterações no dossel em relação ao NDVI. O uso dos dados de EVI surge como alternativa ao efeito de saturação do NDVI. No EVI, elaborado por Huete et al. (1997), o sinal da vegetação é otimizado, melhorando a sensibilidade de detecção em regiões com maiores densidades de biomassa, e reduzindo a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel, sendo mais sensível a variações na estrutura, arquitetura e tipologia do dossel. Seu cálculo é dado pela Equação 2:

$$EVI = G \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(L + \rho_{IVP} + C1 * \rho_V - C2 * \rho_A)} \quad (2)$$

onde L é o fator de ajuste para o solo ($L = 1$), $C1$ e $C2$ são coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera ($C1 = 6$; $C2 = 7,5$) e G é o fator de ganho ($G = 2,5$).

O EVI do produto MOD13Q1 a partir da coleção 5, denominado de EVI2 não utiliza em seu cálculo a reflectância no azul, conforme a Equação 3. Este método foi adotado para evitar uma condição de excesso de correção atmosférica para o EVI, causada por uma alta reflexão da banda azul sobre superfícies com cobertura de nuvem e neve/gelo. Esta situação pode ser agravada com uso de procedimentos de correção atmosférica imperfeitos, resultando em valores anômalos de EVI (SOLANO et al., 2010).

$$EVI2 = 2.5 * \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V + 1)} \quad (3)$$

em que: ρ_{IVP} é a reflectância no infravermelho próximo e ρ_V é a reflectância no vermelho. Os coeficientes adotados no cálculo do EVI2 são: L é o fator de ajuste para o solo ($L = 1$) e G é o fator de ganho ($G = 2,5$).

Estudos relacionados a produtividade da vegetação tem sido frequentemente utilizada na avaliação de ecossistemas e fluxo de carbono (CAO et al., 2004) com base na GPP, proposta por Monteith (1972, 1977) para estimar a produtividade primária a partir da soma total da APAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela Vegetação) que é convertida em biomassa. Monteith (1972) sugeriu que a produtividade de culturas anuais, sob condições ideais de irrigação e adubação, está linearmente relacionada com a quantidade de energia solar absorvida pela vegetação. A GPP é obtida pela Equação 4:

$$GPP = \varepsilon * APAR \quad (4)$$

onde $\varepsilon = \varepsilon_{max} * TMIN_scalar * VPD_scalar$. ε_{max} é a eficiência máxima do uso da luz; $TMIN_scalar$ e VPD_scalar são escalas entre 0 e 1 para reduzir ε_{max} em condições desfavoráveis de baixa temperatura e alto déficit de pressão de vapor. $APAR = IPAR * FPAR$ em que $APAR$ é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida; $FPAR$ é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação e a estimativa de $IPAR$ é dado por $IPAR = (SWRad * 0.45)$, onde PAR (radiação fotossinteticamente ativa incidente na superfície) é estimada por $SWRad$, radiação de ondas curtas, em que 45% (0.45) é fotossinteticamente ativa (RUNNING; ZHAO, 2015; RESTREPO-COUBE et al., 2015).

A GPP fornece uma estimativa do crescimento da vegetação e sua produtividade. Nos últimos anos a produtividade primária tem recebido maior atenção em estudos sobre mudanças climáticas dada sua capacidade em avaliar a quantidade de carbono absorvido pelas plantas no processo de fotossíntese. A GPP é relacionada ao carbono efetivamente extraído da atmosfera pelos diferentes ecossistemas terrestres, assim serve como dado de entrada em modelos climáticos para definir o fluxo dinâmico do carbono na sazonalidade dos diferentes tipos de vegetação (ZHAO et al., 2005; SILVA et al., 2013).

Os produtos MODIS desenvolvidos para avaliar e monitorar o desenvolvimento da vegetação buscam combinar, sob a forma de razões em sua maioria, informações contidas na radiação refletida pelo dossel nas regiões do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Estas regiões espectrais são mais sensíveis a variações causadas por estresse hídrico, mudança de estação e períodos de senescência, por exemplo.

Uma das principais características deste sensor é a disponibilidade dos dados na forma de produtos, destinados ao estudo do balanço de radiação, da vegetação e da cobertura da terra em diferentes níveis de processamento. Para geração de cada produto MODIS, algoritmos específicos são aplicados e resultam em dados disponibilizados na forma de coleções, os quais são amplamente aplicados em estudos diversos.

Quando ocorre o lançamento de uma nova coleção, todas as imagens da coleção anterior são reprocessadas em função da atualização nos algoritmos. Como exemplo, a atualização da coleção 5 resultou na diminuição dos efeitos de nuvens e aerossóis nas imagens, a partir da aplicação de novos filtros e um novo método de composição (DIDAN; HUETE, 2006). A coleção 6 utilizada neste estudo correspondeu aos produtos de GPP de 500m, anteriormente disponibilizados pela coleção 5 na resolução espacial de 1km.

Recentemente, estudos relataram resultados inconsistentes obtidos dos sensores MODIS Terra e Aqua no que se refere à estimativa de concentração de clorofila-a (DJAVIDNIA; MELIN; HOEPFFNER, 2010) e aerossóis (LEVY et al., 2010). Estes resultados estão associados a degradação do sensor e podem afetar a interpretação dos dados ao longo da série e a capacidade de identificação de tendências dependentes do tempo (WANG et al., 2012). Contudo, os erros identificados devido a degradação do sensor permanecem dentro das incertezas calculadas pelo algoritmo de recuperação e as características do sensor (VERMOTE; KOTCHENOVA, 2008; WANG et al., 2012).

O sensor MODIS possui elevada sensibilidade radiométrica (12 bits), medida através de 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. As duas primeiras bandas (620 - 679 nm e 841 - 876 nm) possuem resolução espacial de 250 m no nadir. As 5 bandas seguintes (459 – 479 nm; 545 – 565 nm; 1230 – 1250 nm; 1628 – 1652 nm; e 2105 – 2155 nm) diferem das bandas anteriores pelo tamanho do pixel de 500 m. E, as demais 29 bandas possuem 1 km de resolução espacial (NASA, 2013).

Dadas as características de resolução espacial das imagens MODIS identifica-se ainda o problema de mistura espectral no processo de formação do pixel. A radiação detectada pelo sensor é obtida pela mistura da resposta de diferentes alvos e os efeitos atmosféricos, que podem causar alterações nos dados. Para minimizar o problema de mistura espectral, a combinação das características das imagens (qualidade geométrica, radiométrica e temporal) aliada aos algoritmos de geração de produtos validados confere alta capacidade para o estudo da dinâmica da vegetação e identificação de mudanças e variabilidade com o clima (JUSTICE et al., 2002).

Aliando a disponibilidade e a qualidade dos produtos MODIS relacionados à vegetação é possível elaborar análises espaço-temporais regulares de diferentes tipologias vegetais em escala

regional e global, para fins de identificação e caracterização de padrões fenológicos, capacidade de produção e monitoramento de mudanças no uso e cobertura da terra.

1.4.4 Séries temporais e sua aplicação em estudos com vegetação campestre

Uma série temporal pode ser definida como um conjunto de observações de dados obtidos em intervalos regulares de tempo durante um período específico (MORETTIN; TOLOI, 1985). Box et al. (2016) descrevem uma série temporal como a realização particular de um processo estocástico, que é o conjunto de todas as possíveis trajetórias que se pode observar nos dados estudados.

Uma observação importante e frequente sobre a série temporal é de que ela é estacionária, ou seja, se desenvolve no tempo aleatoriamente em torno de uma média constante, refletindo alguma forma de equilíbrio estável. No entanto, a maioria das séries temporais estudadas apresenta alguma forma de não estacionariedade, caracterizada por tendências, de modo simples aquele em que a série flutua em torno de uma reta, com inclinação positiva ou negativa (tendência linear) (MORETTIN; TOLOI, 2006).

Para a análise de séries temporais dois enfoques podem ser utilizados. A análise pode ser desenvolvida no domínio temporal, com uso de modelos paramétricos (número finito de parâmetros) ou no domínio de frequências por meio de modelos não-paramétricos (número infinito de parâmetros). No domínio das frequências pode-se utilizar a análise espectral, a qual consiste em decompor uma série de dados em componentes de frequências onde a existência do espectro é a característica fundamental (MORETTIN, 1999).

As séries temporais são analisadas a partir de seus principais movimentos descritos como: tendência, ciclo¹, sazonalidade² e variações aleatórias. A partir destes objetiva-se: (i) descrever o comportamento da série de dados por meio de cálculos estatísticos e da representação gráfica; (ii) identificar o processo gerador da série; (iii) estimar valores futuros; (iv) monitorar os valores das séries a fim de verificar alterações nas características da mesma ou identificar periodicidades relevantes nos dados; e (v) avaliar quais os fatores que influenciaram o comportamento da série, buscando definir relações de causa e efeito entre duas ou mais séries (MORETTIN; TOLOI, 2006).

¹ Ciclo: Série de fenômenos que se sucedem numa ordem determinada; que se renovam de forma constante (DICIO, 2018).

² Sazonal: Característico de uma estação; que faz referência às estações; que acontece sempre numa mesma época do ano; relacionado com uma época determinada do ano (DICIO, 2018).

Existem diversas ferramentas para análise de séries temporais de dados de vegetação, incluindo abordagens estatísticas como componentes principais e espectrais. Outras técnicas, como a análise de Fourier e transformada de ondaletas, também vêm sendo utilizadas e demonstradas como adequadas em estudos sobre diferentes tipos de vegetação (MARTINEZ; GILBERT, 2009). A transformada de ondaletas tem sido usada para descrição da dinâmica sazonal da vegetação (PERCIVAL; WANG; OVERLAND, 2004) e das relações entre fatores meteorológicos e fenologia (LI; KAFATOS, 2000) dentre outras.

No Brasil, a influência de variações nos elementos do clima sobre a vegetação também tem sido evidenciada com suporte das ondaletas. Rosembach et al. (2009) aplicaram a técnica de Transformada de Ondaleta para a detecção do comportamento de diferentes coberturas vegetais no sul do Brasil, a partir do NDVI, em termos de escalas temporais (frequências), ou seja, ciclos periódicos e aperiódicos. Foi possível identificar ciclos anuais e semianuais que indicam o impacto de variações nos elementos meteorológicos sobre a cobertura vegetal.

No trabalho de Kuplich, Moreira e Fontana (2013), o perfil temporal do EVI foi construído para o Rio Grande do Sul e retiradas amostras para quatro tipologias vegetais: campo nativo, floresta ombrófila mista, cultivo de soja e de arroz. Essas amostras foram submetidas à transformada de ondaleta, o que permitiu a decomposição da série e apresentação dos dados em relação ao tempo e frequência com que os eventos fenológicos ocorreram. Ciclos intra e interanuais de desenvolvimento da vegetação foram identificados, assim como períodos em que ocorreram anomalias no padrão fenológico.

Com relação a análise temporal dos dados espectrais, em específico para vegetação campestre, Fonseca (2000), avaliou a evolução temporal do NDVI, durante o período de crescimento do *Paspalum notatum* Flüggé var. *notatum* com diferentes níveis de adubação nitrogenada, a partir de medições obtidas com espectrorradiômetro portátil. A autora observou que o aumento ou diminuição de biomassa alteram os valores de NDVI, que tendem a aumentar com o incremento de biomassa, podendo este índice ser utilizado para estimar as variáveis agronômicas: índice de área foliar, matéria seca verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida.

Jacóbsen et al. (2004), avaliaram os efeitos associados a El Niño e La Niña sobre o crescimento e desenvolvimento da cobertura vegetal e sua evolução temporal no RS com dados de NDVI obtidos de imagens do satélite NOAA. Os resultados mostraram que parte da variabilidade interanual do padrão de evolução do NDVI está associada à ocorrência do fenômeno El Niño e La Niña, como consequência principalmente, do efeito deste fenômeno sobre a precipitação pluvial do Estado.

No trabalho desenvolvido por Wagner (2013), a autora descreveu os padrões da dinâmica espaço/temporal dos índices de vegetação NDVI e EVI para o Pampa do RS e Uruguai,

estabelecendo uma relação entre os índices e a variabilidade climática interanual. Os índices NDVI e EVI apresentaram padrões médios temporais similares entre si, com maior variabilidade no verão, picos máximos em março e setembro e mínimos valores no inverno. A relação dos índices com a variabilidade climática atua de forma diferente em cada região e de acordo com a estação do ano, mas associada ao fenômeno El Niño e La Niña.

1.4.5 Séries temporais e análises fenológicas

A fenologia é definida como o padrão sazonal de variação da vegetação na superfície da terra e esta é observável a partir de imagens de sensoriamento remoto com alta resolução temporal, capazes de cobrir extensas áreas sob diferentes ecossistemas. O padrão sazonal da vegetação é sensível às variações das condições meteorológicas e estes registros fenológicos podem ser um substituto útil no estudo da variabilidade dos fatores do clima em escala local, regional e global (TAN et al., 2011).

A fenologia da vegetação e a ocorrência de eventos, como floração e frutificação, são controladas pelo clima e por fatores bióticos, e têm influência direta no balanço de carbono e produtividade de ecossistemas (ABER; MELILLO, 2001). A identificação da fenologia em ciclos ou padrões sazonais em séries temporais de dados de vegetação permite a observação de anomalias e efeitos de mudanças climáticas ou ambientais nesses ciclos. Informações sobre a dinâmica fenológica dos ecossistemas pode contribuir para a compreensão da interação entre a vegetação e o clima, atuando como um indicador de impactos das variações climáticas (SOUDANI et al., 2012).

O registro frequente de imagens por sensores orbitais cobrindo grandes áreas da superfície terrestre permite a construção e a análise de séries temporais de dados de vegetação. A observação e a análise de séries temporais podem auxiliar no reconhecimento de padrões e na detecção de eventuais mudanças ou anomalias associadas a perturbações antrópicas ou naturais. Assim, a utilização de séries temporais de imagens orbitais para detecção de mudanças globais e de cobertura da terra é uma das importantes aplicações atuais dos dados de sensoriamento remoto (MARTINEZ; GILABERT, 2009; FREITAS et al., 2011).

A análise fenológica da vegetação é realizada por meio de séries temporais de índices de vegetação (perfis temporais) e métricas fenológicas que permitem identificar o padrão de desenvolvimento da vegetação determinando o início e fim da estação de crescimento, comprimento da estação, amplitude sazonal (diferença entre o início e o fim da estação de crescimento), entre outros parâmetros. As métricas fenológicas são obtidas através de dados de reflectância da superfície e também de índices de vegetação que permitem identificar parâmetros

fenológicos gerais como início e fim da estação de crescimento, taxa de crescimento e senescência, pico máximo de desenvolvimento e duração do ciclo (REED; WHITE; BROWN, 2003; TIEDEMANN, 2011).

Estudos envolvendo análises fenológicas sob áreas com cobertura de vegetação campestre e o uso de índices de vegetação tem sido desenvolvidas associadas a variabilidade climática e eventos de larga escala como El Niño/La Niña (FABRICANTE; OESTERHELD; PARUELO, 2009; TANNUS; ASSIS; MORELLATO, 2006; ZHANG et al., 2012). Esta tendência se mantém também para os campos da região sul do Brasil (TRENTIN, 2011; KUPLICH; MOREIRA; FONTANA, 2013; WAGNER, 2013; JUNGES et al., 2016).

A obtenção contínua de dados de sensoriamento remoto orbital constitui séries temporais que fornecem informações sobre a reflectância e alterações sobre a vegetação em resposta as mudanças ocorridas na superfície terrestre, seja por influência antrópica, fenológicas naturais ou pela variabilidade climática.

REFERÊNCIAS

- ABER, J.D.; MELILLO, J.M. **Terrestrial Ecosystems**. 2.ed. Michigan, USA: Harcourt Academic Press, 2001. 556 p.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.
- BALSAMO, G. et al. ERA-Interim/Land: A global land surface reanalysis data set. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 389-407, 2015.
- BEHLING, H. et al. Dinâmica dos campos no sul do Brasil durante o Quaternário Tardio. In: PILLAR, V.P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 13-25.
- BERRETA, E. Produção animal em pastagens naturais no Uruguay. In: III Simpósio de forrageiras e produção animal, 2008, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. p. 55-91.
- BOLDRINI, I.I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V.P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 63-77.
- BOLDRINI, I.I. Campos do Rio Grande do Sul: caracterização fisionômica e problemática ocupacional. **Boletim do Instituto de Biociências**, v. 1, n. 56, p. 1-39, 1997.
- BOLDRINI, I.I. et al. **Bioma Pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Pallotti, 2010. 64 p.
- BOLDRINI, I.I.; LONGHI-WAGNER, H.M. Poaceae no Rio Grande do Sul: diversidade, importância na fisionomia e conservação. **Ciência & Ambiente**, v. 1, n. 42, p. 71-92, 2011.
- BOLDRINI, I.I.; OVERBECK, G.; TREVISAN, R. Biodiversidade de plantas. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os Campos do Sul**. Porto Alegre: Rede Campos Sulinos; UFRGS, 2015. p. 53-59.
- BOX, G.E.P. et al. **Time Series Analysis: forecasting and control**. 5. ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2016. 784 p.
- CAO, M. et al. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial Net Primary Productivity 1981 - 2000. **Ecosystems**, v. 7, n. 3, p. 233-242, 2004.
- DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS (DICIO). **Dicionário Online de Português, definições e significados de mais de 400 mil palavras**. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- DIDAN, K.; HUETE, A. **MODIS vegetation index product series: collection 5 change summary**. The University of Arizona, 2006. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/files/MOD13_VI_C5_Changes_Document_06_28_06.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2016.

DJAVIDNIA, S.; MELIN, F.; HOEPFFNER, N. Comparison of global ocean colour data records. **Ocean Science**, v. 6, n. 1, p. 61-76, 2010.

FABRICANTE, I.; OESTERHELD, M.; PARUELO, J.M. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. **Journal of Arid Environments**, v. 73, n. 1, p. 745-753, 2009.

FONSECA, E.L. da. **Caracterização espectral e índices de vegetação em *Paspalum notatum* Flüge var. *notatum* com vistas à modelagem de crescimento**. 2000. 60 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FONTANA, D.C.; ALMEIDA, T.S.; JACÓBSEN, L.O. Caracterização da dinâmica temporal dos Campos do Rio Grande do Sul por meio de imagens AVHRR/NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, p. 69-83, 2007.

FREITAS, R.M. et al. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, n. 1, p. 57-68, 2011.

HASENACK, H. et al. **Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das savanas uruguaias em escala 1:500.000 ou superior e relatório técnico descrevendo insumos utilizados e metodologia de elaboração do mapa de sistemas ecológicos**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Centro de Ecologia/The Nature Conservancy, 2010. 22 p.

HASENACK, H.; CORDEIRO J.L.P.; COSTA, B.S.C. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul. In: II SIMPÓSIO DE FORRAGEIRAS E PRODUÇÃO ANIMAL, 2007, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. p. 15-22.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

HUETE, A.R. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM imagens for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

HUFFMAN, G. et al. **Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG), version 4.4. NASA's Precipitation Processing Center**. 2014. Disponível em: <<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de uso da terra**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/usodaterra/.shtm>>. Acesso em: 11 set. 2015.

_____. **Bases e Referências/Bases cartográficas/Malhas digitais**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

_____. **Cidades@**. Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=431560&search=rio>>. Acesso em: 30 jun. 2017.

_____. **Pesquisa Pecuária Municipal**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3939>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra, Suíça, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2017.

JACÓBSEN, L.O.; FONTANA, D.C.; SHIMABUKURO, Y.E. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 129-140, 2004.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

JUNGES, A.H. et al. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 4, p. 332-337, 2016.

JUSTICE, C.O. et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 3-15, 2002.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. 2.ed. México: Fundo de Cultura Econômica, 1931.

KUPLICH, T.M.; MOREIRA, A.; FONTANA, D.C. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, n. 17, p. 1116-1123, 2013.

LEVY, R.C. et al. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 21, p. 10399-10420, 2010.

LI, Z.; KAFATOS, M. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 3, p.239-247, 2000.

MARTINEZ, B.; GILABERT, M.A. Vegetation dynamics from time series using the wavelet transform. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1823-1842, 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite - Bioma Pampa 2008-2009**. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatrio_tcnico_monitoramento_pampa_2008_2009_72.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2014.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 281, n. 980, p. 277-294, 1977.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v.9, n. 3, p. 747-766, 1972.

MONTENEGRO, A. et al. The net carbon drawdown of small scale afforestation from satellite observations. **Global and Planetary Change**, v. 69, n. 4, p. 195-204, 2009.

- MORETTIN, P.A. **Ondas e Ondaletas**: da análise de Fourier à análise de Ondaletas. São Paulo: USP, 1999. 272 p.
- MORETTIN, P.A.; TOLOI, C.M.C. **Análise de séries temporais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 564 p.
- MORETTIN, P.A.; TOLOI, C.M.C. **Modelos para previsão de séries temporais**. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, 1985. 372 p.
- MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, 2007.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**. Disponível em <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: 12 out. 2013.
- NÚCLEO DE ESTUDOS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BOVINOS DE CORTE E CADEIA PRODUTIVA (NESPro). **Informativo NESPRO & EMBRAPA PEUCÁRIA SUL**: bovinocultura de corte no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/nespro/informativos/4/mobile/index.html#p=1>>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- OVERBECK, G.E. et al. Brazil's neglected biome: the South Brazilian Campos. **Science Direct**, v. 9, n. 2, p. 101-116, 2007.
- OVERBECK, G.E. et al. Fisionomia dos Campos. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os Campos do Sul**. Porto Alegre: Rede Campos Sulinos - UFRGS, 2015. p. 31-39.
- PERCIVAL, D.B.; WANG, M.; OVERLAND, J.E. An introduction to wavelet analysis with application to vegetation time series. **Community Ecology**, v. 5, n. 1, p. 19-30, 2004.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 136 p.
- PROJETO DE CONSERVAÇÃO E UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA BRASILEIRA (PROBIO). **Monitoramento do bioma Pampa 2002 - 2008**. Brasília: CRS/IBAMA, 2010. 34p.
- REED, B.C.; WHITE, M.; BROWN, J.F. Remote Sensing Phenology. In: SCHWARTZ, M.D. (Ed.). **Phenology**: an integrative environmental science. Dordrecht: Springer, 2003. p. 365-381.
- RESTREPO-COUBE, N. et al. MODIS vegetation products as proxies of photosynthetic potential: a look across meteorological and biologic driven ecosystem productivity. **Biogeosciences Discussions**, v. 12, n.1, p. 19213–19267, 2015.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agronômico para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.
- ROSEMBACK, R. et al. Análise da dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil a partir de dados MODIS/TERRA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.2, n. 62, p. 401-416, 2010.

ROSEMBACK, R. et al. Análise de ondaletas aplicada a dados multitemporais de NDVI/MODIS. **Geografia**, v. 34, n. 3, p. 559-575, 2009.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. p. 309-317.

RUNNING, S.W., ZHAO, M. **User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm: version 3.0.** Land Processes Distributed Active Archive Center, 2015. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product_documentation/mod17_user_guide.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2017.

SECRETARIA DA COORDENAÇÃO E PLANEJAMENTO (SCP). **Atlas Socioeconômico: Rio Grande do Sul.** 2. ed. Porto Alegre: SCP, 2002. 112 p.

SILVA, B.B. et al. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo, PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2013.

SOARES, J.V.; BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Histórico e descrição. In: RUDORFF, F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, C. (Org.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil.** São José dos Campos: Parêntese, 2007. p. 1-22.

SOLANO, R. et al. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series) Version 2.00, May 2010 (Collection 5). Disponível em: <https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2012.pdf>. Acesso em: 27 set. 2017.

SOUDANI, K. et al. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 234-245, 2012.

SPANNER, M.A. et al. The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: Relationships with Leaf Area Index. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 2, p. 97-112, 1990.

TAN, B. et al. An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology metrics from MODIS data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 361-371, 2011.

TANNUS, J.L.S.; ASSIS, M.A.; MORELLATO, L.P.C. Fenologia reprodutiva em campo sujo e campo úmido numa área de Cerrado no sudeste do Brasil, Itirapina - SP. **Biota Neotrop**, v. 6, n.3, p. 1-27, 2006.

TIEDEMANN, J.L. Fenología del bosque de las subregiones naturales: Chaco, Semiárido y Chaco Serrano, de Santiago del Estero, Argentina. **Ecología Aplicada**, v. 10, n. 2, p. 51-59, 2011.

TRENTIN, C. **Análise da resposta espectral da vegetação da Área de Proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã em imagens do sensor EOS/MODIS associadas ao solo e aos elementos do clima.** 2011. 72 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-

Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VERMOTE, E.F.; KOTCHENOVA, S. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D23S90, p. 1-12, 2008.

WAGNER, A.P.L. **Dinâmica temporal de Índices de Vegetação no Pampa do Rio Grande do Sul e Uruguai e suas relações com os elementos meteorológicos regionais**. 2013. 160 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WAGNER, A.P.L. et al. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1192- 1200, 2013.

WANG, D.D. et al. Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 119, n. 1, p. 55-61, 2012.

WARDLOW, B.D.; EGBERT, S.L. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: a case study for southwest Kansas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 3, p. 805-830, 2010.

ZANZARINI, F.V. et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013.

ZHANG, Q. et al. Estimation of crop gross primary production (GPP): fAPARchl versus MOD15A2 FPAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 153, p. 1-6, 2014.

ZHANG, X. et al. Long-Term Detection of Global Vegetation Phenology from Satellite Instruments. In: ZHANG, X. (Ed.). **Phenology and Climate Change**. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. p. 297-320.

ZHAO, M. et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n. 2, p. 164-176, 2005.

2 RESULTADOS APRESENTADOS NA FORMA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS

2.1 ARTIGO 1 - Dados meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação

Submetido para a Revista Brasileira de Cartografia

COMUNICAÇÃO ENTRE EDITOR/AUTOR

Editor Assunto: [RBC] Decisão editorial

2017-08-26 Sra. Andreise Moreira:
05:47

Foi tomada uma decisão sobre o artigo submetido à Revista Brasileira de Cartografia, "Dados meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação".

A decisão é: ACEITO

Parabéns pelo ótimo trabalho!

Prof. Alan José Salomão Graça
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
alanjsg@gmail.com
Alan Salomão - Editor Gerente
Conselho Executivo.

Conselho Executivo
Revista Brasileira de Cartografia - RBC
<http://www.lsie.unb.br/rbc>



DADOS METEOROLÓGICOS ESTIMADOS EM CONDIÇÕES DE CLIMA SUBTROPICAL E A RELAÇÃO COM ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Estimated Meteorological Data in Subtropical Climate Conditions and their Relation to Vegetation Indices

**Andreise Moreira¹, Denise Cybis Fontana¹,
Tatiana Mora Kuplich² & Maria Angélica Cardoso²**

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Av. Bento Gonçalves, nº 9500, CEP: 97501-970, Porto Alegre, RS, Brasil
andreisem@gmail.com; dfontana@ufrgs.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
Av. Roraima, CP 5021, CEP: 97105-970, Santa Maria, RS, Brasil
tatiana.kuplich@inpe.br; magcardoso@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste estudo foi analisar a qualidade das estimativas de precipitação pluvial obtidas do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e de temperatura do ar do ERA Interim em condições de clima subtropical utilizando dados meteorológicos observados e índices de vegetação dos campos naturais no sul do Brasil. A coleta de dados estimados correspondeu à coordenada geográfica das estações meteorológicas de superfície no estado do Rio Grande do Sul para o período de 2002 a 2012. Os dados coletados dos índices de vegetação (IV's) foram obtidos a partir de 20 polígonos amostrais para 10 tipologias predominantes de vegetação campestre. A análise dos resultados estatísticos entre o TRMM e o ERA Interim apresentou bom desempenho em relação aos dados observados, com valores de correlação para a precipitação pluvial acima de 0,81 e para a temperatura do ar acima de 0,96 para o período de estudo. Na análise entre os IV's e os dados estimados pelo TRMM a correlação tende a ser superior durante a primavera, o verão e o outono e para a temperatura do ar do ERA Interim destaca-se a melhor representação dos IV's para o inverno. Os resultados obtidos para o TRMM, ERA Interim e os dados observados nas estações meteorológicas são aceitáveis e consistentes e indicam a possibilidade do uso dos dados estimados como alternativa para minimizar a ausência de informações sobre precipitação pluvial e temperatura do ar obtidas em rede de estações de superfície.

Palavras-chave: Estações Meteorológicas, TRMM, ERA Interim, EVI, NDVI.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the quality of rainfall estimates obtained from TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) and air temperature of the ERA Interim in subtropical climate conditions using observed meteorological data and vegetation indices in natural grasslands in southern Brazil. The estimated data collection corresponds to the geographical coordinate of the surface meteorological stations in the state of Rio Grande do Sul for the period from 2002 to 2012. The data collected from the vegetation indices (VI) were obtained from 20 sample polygons to 10 prevailing grassland typologies. The analysis of the statistical results between the TRMM and the ERA Interim presented good performance in relation to the observed data, with correlation values for rainfall above 0.81 and for the air temperature above 0.96 for the study period. In the analysis between the VI and the data estimated by the TRMM the correlation tends to be superior during spring, summer and autumn and for the ERA Interim air temperature highlights the best representation of the VI for the winter. The results obtained for the TRMM, ERA Interim and the data observed in the meteorological stations are acceptable and consistent and indicate the possibility of use of the estimated data as an alternative to minimizing the absence of information on rainfall and air temperature obtained in the network of surface stations.

Keywords: Meteorological Stations, TRMM, ERA Interim, EVI, NDVI.

1. INTRODUÇÃO

A coleta regular e sistemática de dados da superfície terrestre por sensores orbitais permite a construção e a análise de séries temporais com aplicações em diferentes áreas do conhecimento. O uso de séries temporais na detecção de mudanças, tanto de cobertura da terra como de tempo e clima constitui-se uma das importantes aplicações atuais dos dados de sensoriamento remoto (ZHAO *et al.*, 2005; ALEXANDER *et al.*, 2006; BROXTON *et al.*, 2014). Uma das vantagens em utilizar séries temporais de dados meteorológicos é contornar as dificuldades encontradas na aquisição de dados observados em estações meteorológicas de superfície. Por exemplo, a carência de uma densa rede de instrumentos, que muitas vezes é limitada em função de investimentos, ou os problemas técnicos e dificuldade de acesso, os erros de coleta, distribuição espacial inadequada e representação de pequenos espaços geográficos (NÓBREGA *et al.*, 2008).

Como alternativa aos dados observados, estão disponíveis dados estimados, obtidos por satélites meteorológicos e também produzidos por reanálise atmosférica, os quais tornam possível a observação e monitoramento contínuo do tempo e do clima em nível global. Como exemplo de satélites meteorológicos de observação global, atualmente em órbita, destacam-se o GOES e o NOAA - AVHRR (EUA), o Meteosat (Europeu), o MTSAT Japão), o FY-1 e FY-2 (China), o GOMS, o Meteor (Rússia) e o KALPANA (Índia).

Além destes, foi lançado em 1997 o TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), um projeto conjunto entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace and Exploration Agency* (JAXA), com objetivo de monitorar as características da precipitação pluvial sobre os trópicos e sub trópicos, verificar sua influência no clima global e obter informações em regiões com baixa densidade de rede de observações (KUMMEROW *et al.*, 2000). A coleta de dados iniciada pelo TRMM, atualmente é realizada pelo GPM (*Global Precipitation Measurement*), lançado em fevereiro de 2014, o que tem garantido a continuidade da série inicial. Uma das vantagens do TRMM é a distribuição gratuita dos dados e a elaboração de diferentes produtos referente a estimativa de precipitação pluvial diária acumulada (mm/dia) originadas a cada 3 horas.

Validações das estimativas de precipitação pluvial do TRMM têm sido realizadas pelo programa da *NASA Goddard Space Flight Center*, em quatro sítios de observação primária em Terra (Kwajalein Atoll, República das Ilhas Marshall; Melbourne, Flórida; Houston, Texas; e Darwin, Austrália). Nestes sítios, valores observados em pluviômetros e obtidos pelas estimativas do radar do TRMM, obtiveram correlação entre 0,8 e 0,9, o que denota alta qualidade e consistência nos dados estimados (WOLFF *et al.*, 2005). No território brasileiro, Franchito *et al.* (2009) validaram os dados do TRMM a partir de dados observados em estações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os resultados mostraram que as estimativas de precipitação sazonal para o verão e o outono são confiáveis para as 5 regiões brasileiras. Para a Região Sul, valores

significativos de correlação também foram observados durante o inverno.

Outra alternativa para a obtenção de dados meteorológicos estimados é através de séries de reanálise geradas a partir da assimilação de dados meteorológicos obtidos de uma variedade de fontes: estações meteorológicas de superfície, aviões, navios, imagens de satélite, imagens de radar e radiossonda (PARKER, 2016). A técnica de reanálise atmosférica processa, simultaneamente, uma grande variedade de observações, usando as leis físicas contidas nos modelos de previsão do tempo. Como as observações possuem uma distribuição irregular no espaço e no tempo, a assimilação combina essas informações disponíveis com o modelo de previsão para gerar uma nova análise (QUADRO *et al.*, 2012). Sendo assim, o histórico do estado atmosférico pode ser reconstruído dinamicamente (PINTO *et al.*, 2009).

As reanálises meteorológicas consistem em utilizar conjuntos de dados em grade, observados e fornecidos por centros meteorológicos combinados com um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados, fornecendo uma síntese das observações disponíveis em todo o mundo no contexto de um modelo físico (KALNAY *et al.*, 1996). Dentre as séries de dados de reanálise atmosférica em nível global destacam-se o projeto NCEP/NCAR (KALNAY *et al.*, 1996), o MERRA-2 (RIENECKER *et al.*, 2011) e o CFSR (EUA) (SAHA *et al.*, 2010).

Outra série de dados estimados muito utilizada é o ERA Interim, produzida pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para o período de 1979 até o presente (DEE *et al.*, 2011; BALSAMO *et al.*, 2015), disponibiliza um conjunto de dados da terceira reanálise atmosférica global lançada em 2009, apresentando reconhecidas melhorias em relação às reanálises anteriores (ERA-15 (1979-1993) e ERA-40 (1957-2002)). Os dados do ERA Interim têm sido aplicados em diferentes regiões do globo, como por exemplo, no Continente Africano (SYLLA *et al.*, 2009), em bacias hidrográficas da Amazônia, Mississippi e Mackenzie (BETTS *et al.*, 2009), na Irlanda (MOONEY *et al.*, 2010), na região do planalto Tibetano (BAO & ZHANG, 2013) e em Portugal (SOARES *et al.*, 2012), com obtenção de resultados satisfatórios.

No trabalho desenvolvido por Simmons *et al.* (2010) foi analisada a variação da umidade e temperatura do ar e da precipitação pluvial para a Europa, Ásia, África, Austrália e América do Norte e do Sul a partir de dados de reanálise (ERA-40 e ERA Interim) e conjuntos de dados observados mensalmente (WILLETT *et al.*, 2008) em séries de 30 anos. Os autores destacaram que os dados de reanálise são confiáveis e de alta qualidade podendo ser utilizados como recurso para o monitoramento do tempo e do clima em nível global. Para a América do Sul, Solman *et al.* (2013) simularam os valores de precipitação pluvial e temperatura média do ar, utilizando como base os dados de reanálise do ERA Interim para o período de 1990-2008. Os resultados mostraram que os modelos testados são capazes de reproduzir a distribuição espacial média da temperatura do ar e da precipitação pluvial, especialmente para o inverno e o verão.

Apesar do acúmulo já existente, dada a dinâmica da atmosfera e a instabilidade dos ambientes caracterizados por diferentes usos e cobertura da terra, assim como em função da variabilidade de tipos climáticos a nível global, a validação dos dados estimados por satélite ou reanálise comparados aos dados observados ainda é necessária. Inconsistências causadas por mudanças nos sistemas de observações, assimilação e qualidade dos dados, falha no modelo em representar a topografia, complexidade em descrever a dinâmica da atmosfera, entre outros podem induzir a erros (CAI & KALNAY, 2005; NUÑEZ *et al.*, 2008). O dimensionamento dos erros e incertezas dos modelos contribui para um melhor ajuste dos mesmos.

Salienta-se, entretanto, que parte das incertezas encontradas nas avaliações da qualidade das séries como TRMM e ERA Interim decorrem das comparações feitas entre dados estimados em formato de grade com dados de referência provenientes de pontos de medição em estações meteorológicas. Uma alternativa aos dados pontuais poderia ser o uso combinado destes com informações obtidas sobre a cobertura vegetal provenientes de imagens de satélite (área). Alguns tipos de vegetação, especialmente os campos naturais, respondem rapidamente à variação das condições meteorológicas e podem, portanto, ser utilizados como indicador das alterações causadas pelo tempo e clima.

Como o uso de índices de vegetação (IV's) já está consolidado para descrever a vegetação e sua variação espacial e temporal em resposta às alterações climáticas (LOS, 2015), acredita-se que as séries temporais de índices de vegetação do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) podem corroborar a adequação das estimativas do TRMM e do ERA Interim, servindo como indicadoras da variabilidade espacial das condições meteorológicas. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a qualidade das estimativas de precipitação pluvial (TRMM) e de temperatura do ar (ERA Interim) em condições de clima subtropical usando dados meteorológicos observados e índices de vegetação dos campos naturais no sul do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção apresenta as características da área de estudo, a descrição dos dados e procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento do trabalho e alcance dos objetivos propostos.

2.1 Área de estudo

O estado do Rio Grande do Sul (RS) possui área territorial de 281.748 Km², localizado no extremo meridional do Brasil, entre as latitudes 27° 05' e 33° 45' S e longitudes 49° 43' e 57° 39' W. O clima é classificado, conforme Köppen (1931), como temperado úmido ou "Cf", com as variedades "Cfa" (verões quentes) e "Cfb" (verões amenos). Como característica o clima "Cf" não apresenta estação seca. No RS o volume de chuva é, entretanto, diferenciado no território, com variação da precipitação pluvial média entre 1.050 e 1.750 mm na metade sul do Estado e entre 1.550 mm e 2.100 mm na metade norte, especialmente no nordeste do RS (REBOITA *et al.*, 2010).

Quanto à temperatura do ar verifica-se grande variação sazonal com verões quentes e invernos rigorosos, com registro de geada e precipitação eventual de neve nas regiões mais elevadas. As temperaturas médias variam entre 15 e 18°C, com mínimas de até -10°C e máximas de 40°C (SCP, 2002). Com relação às temperaturas médias mensais, o mês mais quente é janeiro (média máxima 27°C) e em julho são observados os valores mais baixos (média mínima 11°C). A região mais fria do RS está localizada nas maiores altitudes, na região nordeste, enquanto a região mais quente situa-se no extremo oeste do Estado (FEPAGRO, 2011).

A vegetação campestre no Estado desenvolve-se sob a influência destas variações meteorológicas o que caracteriza a diversidade da flora formada por diferentes espécies de gramíneas, compostas, ciperáceas e leguminosas com uma variedade de aproximadamente 2.600 espécies de plantas (OVERBECK *et al.*, 2007). A alta variabilidade de espécies de plantas associada a fatores geográficos como relevo, heterogeneidade de solos, distribuição da pluviosidade e temperatura do ar, permitiram classificar a vegetação campestre em 10 regiões fisionômicas homogêneas (HASENACK *et al.*, 2010; BOLDRINI & LONGHI-WAGNER, 2011), (Figura 1), sendo estas regiões utilizadas como base para a extração das amostras de estudo.

2.2 Precipitação pluvial e Temperatura do ar

Foram obtidas duas séries temporais de dados estimados, uma de precipitação pluvial, oriunda do TRMM, e outra de temperatura do ar, oriunda do ERA Interim, ambas para o período de 2002 a 2012.

Dentre os diferentes produtos gerados a partir das estimativas do TRMM, neste estudo foram utilizados dados do algoritmo 3B43 (*TRMM and Others Sources Monthly Rainfall*) que fornece estimativas de precipitação horária (mm/hora), diária (mm/dia) e mensal (mm/mês) em grade de resolução espacial de 0,25° x 0,25°. Neste algoritmo é usada a técnica *TRMM Multisatellite Precipitation Analysis* (TMPA), que consiste em uma combinação de estimativas de precipitação do canal de microondas provenientes do *TRMM Microwave Imager* (TMI), *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I), *Advanced Microwave Scanning Radiometer* (AMSR-E), *Advanced Microwave Sounding Radiometer* (AMSU-B), Canal Infravermelho (IR) através do *Goes Precipitation Index* (GPI) e com informações de precipitação pluvial mensal de superfície, provenientes do *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC) (HUFFMAN *et al.*, 2007).

Para o ERA Interim foram utilizados dados mensais de temperatura do ar a 2 metros da superfície, também em uma grade de resolução espacial de 0,25° x 0,25°. A reanálise produzida utiliza o sistema de assimilação de dados em quatro dimensões 4D-Var com ciclos de análises de 12 horas, ou seja, considera as observações das 12 horas anteriores oferecendo as estimativas prévias necessárias para o próximo ciclo de análise (SARMIENTO-DEVIA *et al.*, 2013). Em cada ciclo, as observações são combinadas com informações prévias disponíveis a partir de um modelo de previsão para estimar o estado da atmosfera global e sua superfície subjacente (DEE *et al.*, 2011). O método 4D-Var realiza

uma interpolação estatística no espaço e tempo entre a distribuição das observações meteorológicas e uma estimativa prévia obtida pelo modelo global do ECMWF, certificando que as observações usadas na dinâmica do modelo são meteorologicamente consistentes (SIMMONS *et al.*, 2006; COSTI, 2011).

A coleta de dados correspondeu à coordenada geográfica das estações meteorológicas selecionadas como fonte de dados de referência (observados) para este

estudo, sendo que para a precipitação pluvial e temperatura do ar foram utilizados, respectivamente dados de 24 e de 21 estações meteorológicas de superfície, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO). A diferença no número de estações se deve a falha na aquisição contínua de dados de temperatura do ar para as estações de Júlio de Castilhos, Maquiné e São Gabriel.

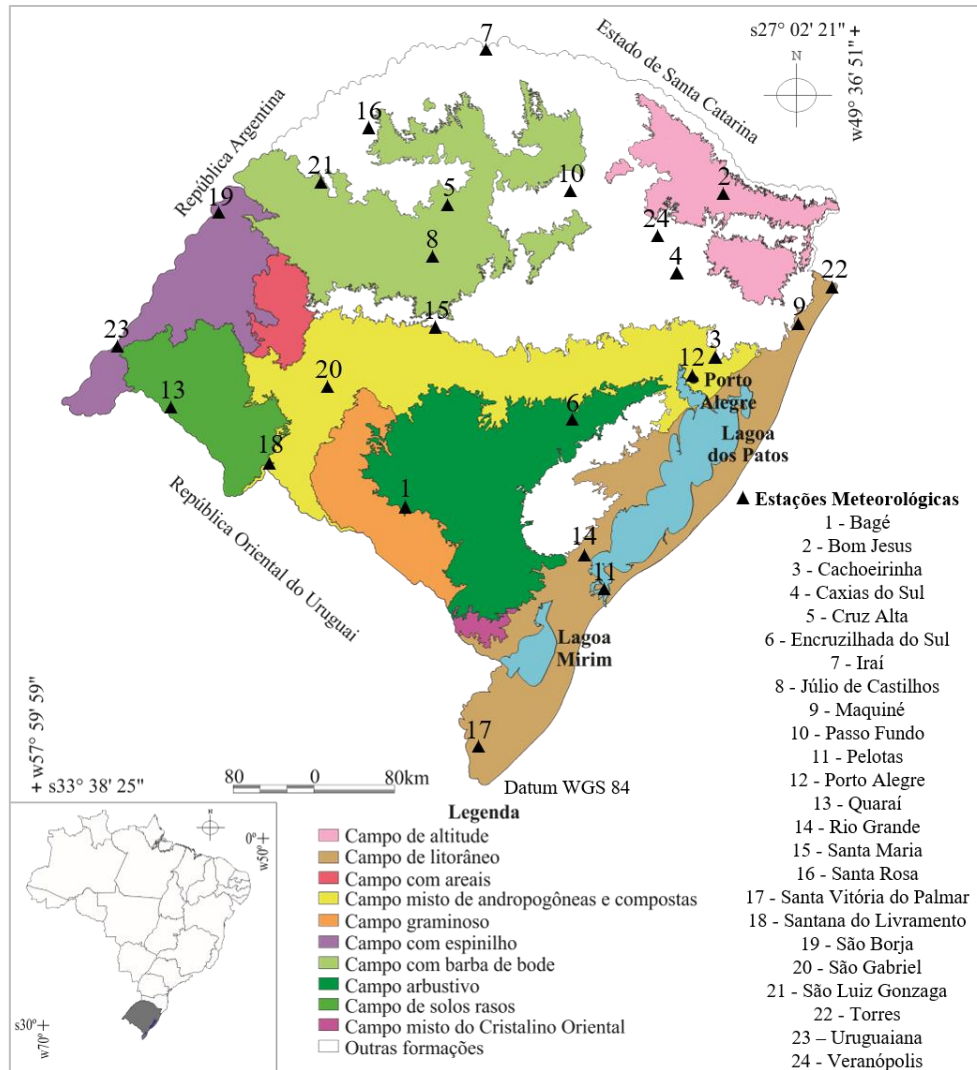


Fig. 1 - Tipologias campestres e distribuição das estações meteorológicas do estado do RS.

Fonte: Malha Digital, IBGE (2013); Adaptado de Hasenack *et al.* (2010).

As estatísticas utilizadas para a avaliação da qualidade dos dados do TRMM e ERA Interim foram aplicadas para o conjunto de toda a série (2002-2012), assim como em períodos mensais e correspondem ao: Coeficiente de Correlação de Pearson (r) (Equação 1), que representa uma medida numérica do grau de concordância (similaridade) entre duas ou mais variáveis; $Viés$ (Equação 2) que indica uma possível tendência dos dados super ou subestimarem os dados; e Coeficiente de Eficiência (EFF) (Equação 3) que avalia a precisão dos dados estimados, podendo variar de negativo até 1 (ajuste perfeito). Para este coeficiente a metodologia é considerada aceitável para valores entre 0,36 e 0,75 e bom para valores acima de 0,75 (COLLISCHONN, 2001).

$$r = \frac{\sum_1^n (Y_{EST} - \bar{Y}_{EST})(Y_{OBS} - \bar{Y}_{OBS})}{(n-1) \sigma_{EST} \sigma_{OBS}} \quad (1)$$

$$Viés = \frac{1}{n} \sum_1^n (Y_{EST} - Y_{OBS}) \quad (2)$$

$$EFF = 1 - \frac{\sum_1^n (Y_{OBS} - Y_{EST})^2}{\sum_1^n (Y_{OBS} - \bar{Y}_{OBS})^2} \quad (3)$$

em que Y_{EST} e Y_{OBS} valores dos dados estimados e observados para o período i ; σ_{EST} e σ_{OBS} observados; \bar{Y}_{EST} e \bar{Y}_{OBS} médias dos dados desvios padrão dos dados estimados e observados e n total de dados.

Os valores obtidos, após a aplicação das estatísticas, foram interpolados e espacializados no software *Surfer* com uso do método de *Kriging*. Optou-

se pelo método de krigagem, pois este utiliza como base a geoestatística, com estimativa de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (CAMARGO *et al.*, 2004). Além disso, a krigagem também considera o valor médio dos dados, chamado de tendência. A partir destas informações, a krigagem realiza a interpolação através da média ponderada dos dados amostrais de forma que o erro esperado seja minimizado (FAZIO, 2013).

2.3 Dados de EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

Foram utilizadas imagens de composição de máximo valor a cada 16 dias de EVI e NDVI do sensor MODIS, produto MOD13Q1, coleção 5, com resolução espacial de 250 m. Os valores de EVI e NDVI foram obtidos a partir de 20 polígonos amostrais para cada uma das 10 regiões fisionômicas homogêneas (HASENACK *et al.*, 2010; BOLDRINI & LONGHI-WAGNER, 2011). Atribuiu-se a cada tipologia o valor médio extraído dos 20 polígonos, os quais apresentaram um número de pixels que variou entre 2.462 a 4.284 pixels. A suficiência amostral foi avaliada pelo método *bootstrap* (EFRON, 1979), considerando 1.000 iterações e 5% de significância estatística, resultando num valor mínimo de 1.500 pixels por tipologia.

O período analisado correspondeu à coleta de dados meteorológicos (2002-2012) totalizando 253 imagens. Os dados de precipitação pluvial do TRMM (soma) e de temperatura do ar do ERA Interim (média) foram organizados em ciclos de 16 dias de forma a tornar compatíveis com as datas das imagens MODIS. Posteriormente, os dados foram organizados por estações do ano: primavera, verão outono e inverno. Foi realizada então análise de correlação entre os três conjuntos de dados: dados meteorológicos observados e estimados e dados de índice de vegetação. Conforme mencionado, os dados EVI e NDVI foram coletados para a coordenada geográfica central da amostra. Posteriormente, estes dados foram agrupados por região de abrangência da tipologia campestre, sendo a média regional obtida considerando os valores de todas as estações meteorológicas presentes na área da tipologia campestre, obtendo-se assim, uma média regional.

Apesar da conhecida superioridade do EVI na representação da fenologia campestre (Junges *et al.*, 2016), o NDVI também foi avaliado neste trabalho por não existir consenso nas relações de ambos os índices com dados meteorológicos, já que diferem ao considerar em seu cálculo os efeitos atmosféricos (EVI) ou não (NDVI). Acredita-se que estas diferenças no cálculo dos índices podem impactar as relações com as estimativas por satélite da precipitação pluvial e temperatura do ar.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção descreve os resultados obtidos a partir da avaliação dos dados meteorológicos estimados e observados e a relação entre os dados meteorológicos e os índices de vegetação EVI e NDVI.

3.1 Relação entre os dados meteorológicos estimados e observados

Observou-se alta correlação entre os dados de precipitação pluvial estimados do TRMM e de temperatura do ar do ERA Interim e os dados observados nas estações meteorológicas do RS (Tabela 1). Considerando o período analisado, obteve-se valores de correlação da precipitação pluvial acima de 0,81 e para a temperatura do ar acima de 0,96. Os resultados obtidos para o TRMM confirmam aqueles encontrados por Collischonn *et al.* (2007) e Viana *et al.* (2010) em séries mais reduzidas.

O Coeficiente de Eficiência (Tabela 1) foi, para a maioria das estações meteorológicas, superior a 0,7 para a precipitação pluvial e próximo a 1 para a temperatura do ar, revelando adequação em relação aos dados obtidos nas estações de superfície. Os dados de temperatura do ar do ERA Interim denotam alta precisão entre os dados estimados e observados, com valores de EFF entre 0,76 e 1,00.

Ao analisar o *Viés* (Tabela 1 e Figura 2c), os dados denotam que o TRMM superestima os valores de precipitação pluvial para a maioria das estações meteorológicas. Já para a temperatura do ar do ERA Interim (Tabela 1 e Figura 3c) os valores tendem a subestimar os dados observados.

Observa-se também que existe variabilidade na distribuição espacial dos dados do TRMM no Estado ao longo do ano, sendo forte a correlação com os dados de superfície para todos os meses do ano e para a maioria das estações meteorológicas (Figura 2a). Somente nos meses de março e dezembro, na estação meteorológica de Maquiné (litoral norte) obteve-se valor de correlação de 0,5. Saldanha *et al.* (2015) observou padrão semelhante ao correlacionar os dados de GPCP (*Global Precipitation Climatology Project*) e os dados observados nesta estação meteorológica. Os autores atribuíram este padrão ao fato da estação de superfície estar localizada próximo ao nível do mar, na encosta da Serra Geral, região em que há grande variação de altitude, entre 20 e 900m, com um microclima diferenciado, que possivelmente não seja captado pela grade do GPCP, assim como também nos dados do TRMM.

Na análise do Coeficiente de Eficiência, os valores em torno de 0 e 1 confirmam a consistência entre os dados estimados e observados para a maioria das estações meteorológicas. A maior variabilidade e menor eficiência entre os dados do TRMM e as estações meteorológicas foi observada durante os meses de fevereiro e março, que correspondem ao final do verão e início de outono (Figura 2b). Mesmo assim, na maior parte das estações o EFF apresentou valores superiores a 0,7. Resultados semelhantes foram obtidos por Saldanha *et al.* (2015) para a precipitação pluvial do GPCP nas estações meteorológicas do RS.

Na análise do *Viés* para os meses do ano observou-se tendência de superestimativa dos valores de precipitação pluvial para a maioria das estações meteorológicas. Esta tendência se mantém, já tendo sido identificada nos estudos de Rozante e Cavalcanti (2008) para a região sul do Brasil e na divisa com a Argentina e o Paraguai. Os autores associam a superestimativa dos valores de precipitação pluvial à formação de nuvens

com topo frio. No entanto, considera-se que os valores de *Viés* encontrados são aceitáveis e consistentes e podem

ser utilizados em locais com baixa rede de instrumentos ou períodos com escassez de dados.

Tabela 1: Coeficiente de Correlação de Pearson (*r*), Coeficiente de Eficiência (EFF) e *Viés* da precipitação pluvial do TRMM e da temperatura do ar do ERA Interim e dados observados nas estações meteorológicas de superfície para o período de 2002 a 2012

Estações Meteorológicas	<i>r</i>		EFF		<i>Viés</i>	
	PP	TA	PP	TA	PP	TA
Bagé	0,92	0,99	0,82	0,96	9,8	-0,24
Bom Jesus	0,91	0,99	0,81	0,85	10,2	0,50
Cachoeirinha	0,81	0,96	0,65	0,84	5,7	-0,52
Caxias do Sul	0,90	0,99	0,80	0,93	8,8	0,14
Cruz Alta	0,90	0,99	0,80	0,95	0,9	-0,27
Encruzilhada do Sul	0,94	0,99	0,85	0,95	11,6	-0,17
Iraí	0,94	0,99	0,85	0,84	15,5	-0,62
Júlio de Castilhos	0,86	-	0,61	-	24,6	-
Maquiné	0,79	-	0,61	-	-3,1	-
Passo Fundo	0,95	0,99	0,87	0,97	14,3	-0,09
Pelotas	0,87	0,99	0,74	0,97	5,8	-0,01
Porto Alegre	0,90	1,00	0,72	0,96	14,1	-0,25
Quaraí	0,94	0,99	0,88	0,99	7,3	-0,69
Rio Grande	0,89	0,99	0,79	0,97	2,3	-0,10
Santa Maria	0,93	1,00	0,74	0,92	18,6	-0,41
Santa Rosa	0,88	0,97	0,74	0,76	12,6	-0,77
Santa Vitória do Palmar	0,93	1,00	0,75	0,98	15,4	0,12
Santana do Livramento	0,95	0,99	0,89	1,00	1,9	-0,09
São Borja	0,91	0,99	0,78	0,84	16,9	-0,64
São Gabriel	0,85	-	0,31	-	29,6	-
São Luiz Gonzaga	0,95	0,99	0,91	0,90	2,8	-0,48
Torres	0,89	0,98	0,69	0,85	17,6	-0,46
Uruguaiana	0,94	0,99	0,84	0,94	13,0	-0,36
Veranópolis	0,85	0,98	0,68	1,00	18,5	0,01

* PP - Precipitação Pluvial; TA - Temperatura do ar; Estações meteorológicas com falhas nos dados (-)

Para a correlação entre os dados de temperatura do ar do ERA Interim e os dados observados em estações de superfície, também ficou evidente a variabilidade na distribuição espacial, com valores de correlação acima de 0,7 para a maioria das estações meteorológicas (Figura 3a). Em trabalho elaborado por Bovolo *et al.* (2012) na região da Guianas, os autores destacam que os dados provenientes do ERA Interim fornecem uma consistente e precisa distribuição espacial da temperatura do ar em séries anuais e mensais de dados, com valores de correlação próximos a 1,0.

Na avaliação do EFF, denota-se maior variabilidade nos dados do ERA Interim quando comparado ao EFF do TRMM. Valores negativos e em torno de zero também foram observados, em específico durante os meses de março e abril e mais frequentemente para a estação meteorológica de Bagé (Figura 3b). Embora os valores obtidos sejam inferiores aos observados para a precipitação pluvial do TRMM, o ajuste entre o ERA Interim e os dados observados são considerados confiáveis para a maioria das estações e

meses do ano e seguem a recomendação de Collischonn (2001), o qual ressalta que valores acima de 0,75 são bons e, valores entre 0,36 e 0,75 são aceitáveis.

Os dados de *Viés* indicam que a temperatura do ar é subestimada pelo ERA Interim na maior parte do RS, com tendência de superestimativa apenas na região de maior altitude a nordeste do Estado (Figura 3c). Jesus (2014), simulou a atuação da passagem de frentes frias sobre a América do Sul através do modelo RegCM4. As simulações foram iniciadas e dirigidas pela reanálise do ERA Interim e, na composição de anomalias de temperatura do ar observou-se que a passagem de frentes frias ao atingir a cidade de Rio Grande, RS induz a intensificação de anomalias negativas de temperatura pelo ERA Interim sobre o Uruguai, Rio Grande do Sul e nordeste da Argentina. Semelhante aos dados do TRMM, os valores encontrados indicam a consistência dos dados estimados e estudos utilizando a grade de dados produzida pela reanálise do ERA Interim podem ser conduzidos.

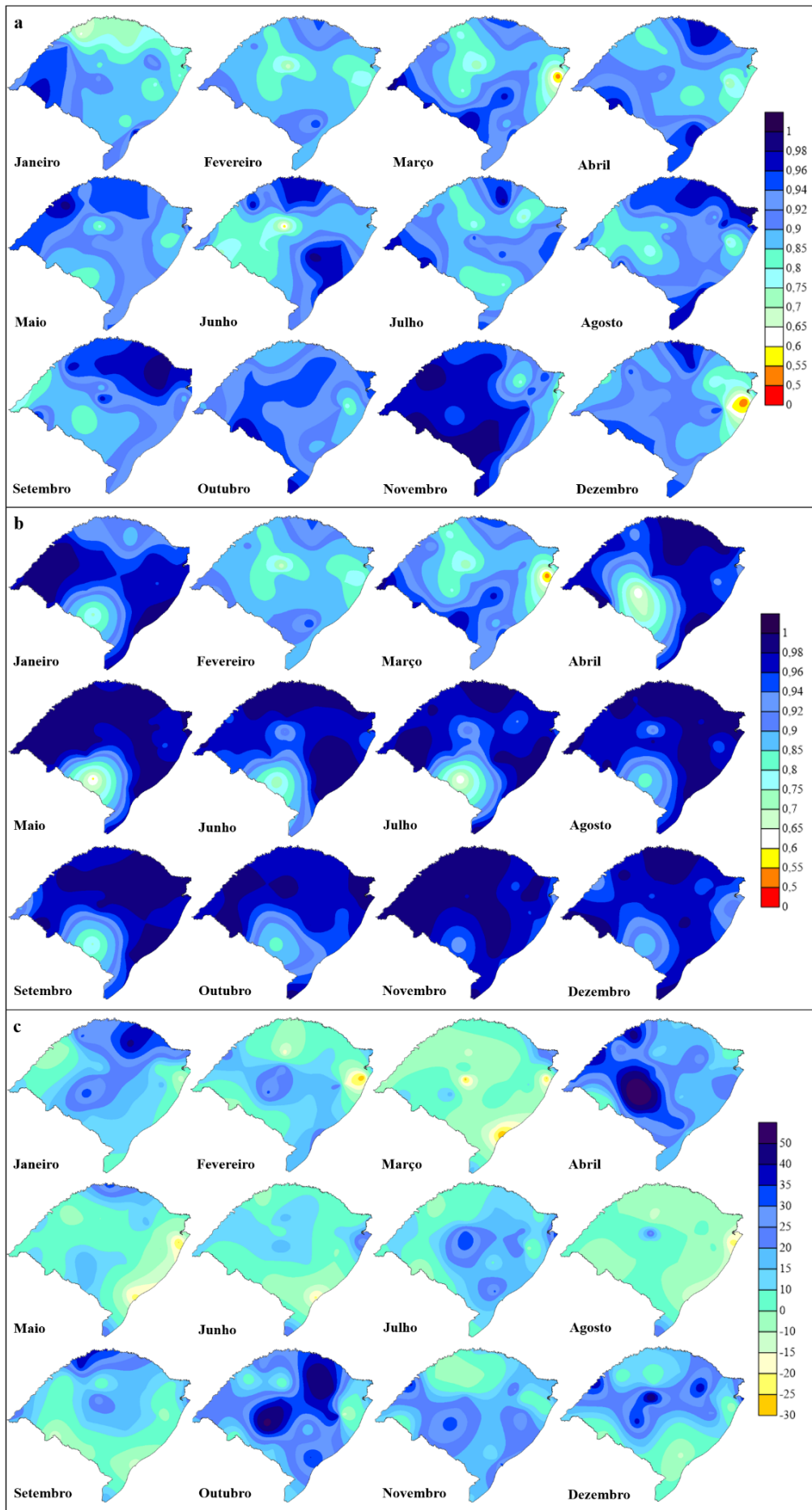


Fig. 2 - Espacialização do Coeficiente de Correlação (a), Coeficiente de Eficiência (b) e *Viés* (c) mensal entre a precipitação pluvial do TRMM e de estações meteorológicas do RS.

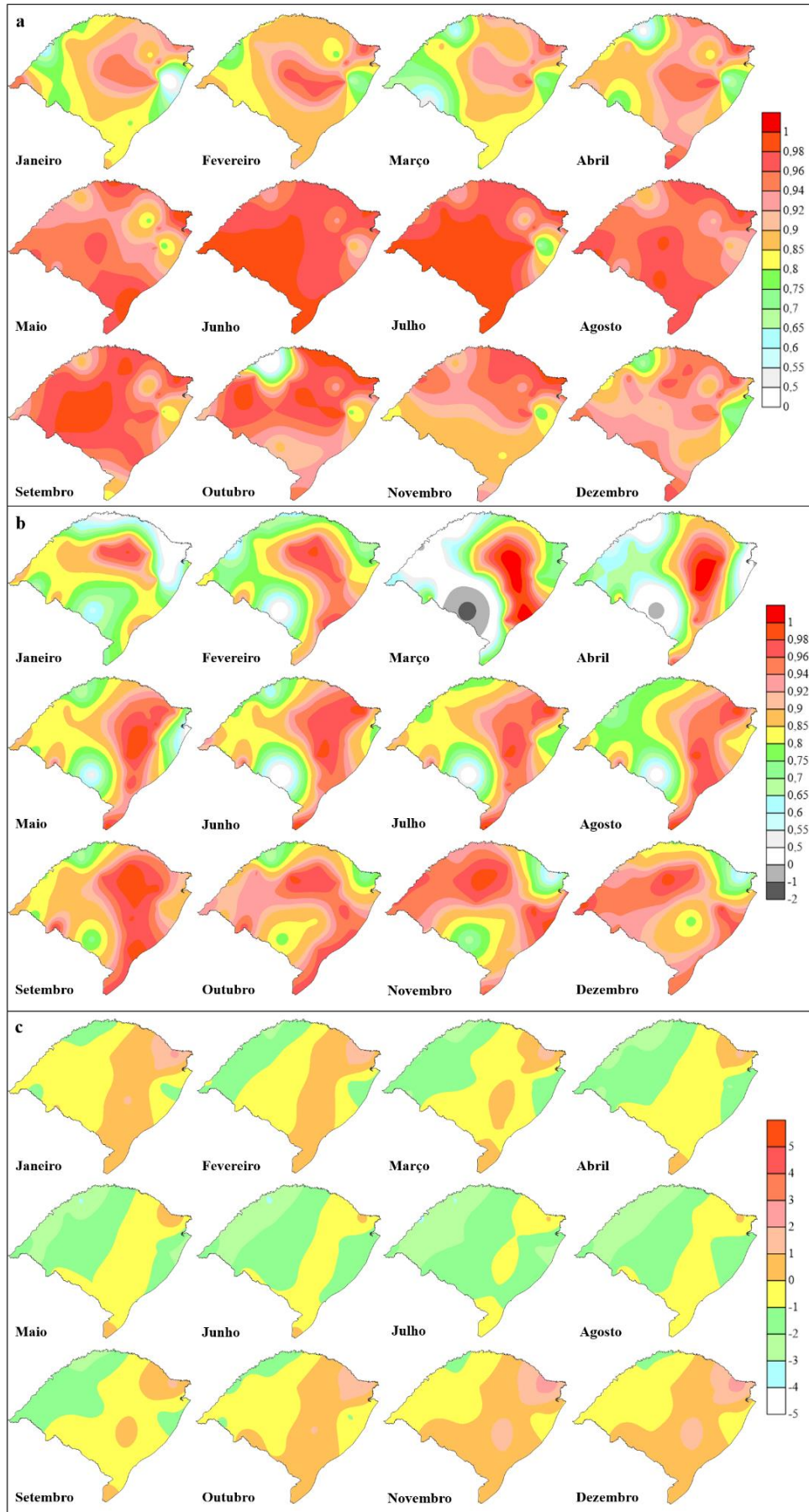


Fig. 3 - Espacialização do Coeficiente de Correlação (a), Coeficiente de Eficiência (b) e *Viés* (c) mensal entre a temperatura do ar do ERA Interim e de estações meteorológicas do RS.

3.2 Relação entre os dados meteorológicos estimados e observados e os índices de vegetação

Existe correlação entre os valores de EVI e NDVI das tipologias campestres do RS e a precipitação pluvial obtida pelo TRMM e aquela observada nas estações meteorológicas, mas com diferenças associadas a estação do ano (Figura 4). Correlações acima de 0,7 predominam tanto no verão como no outono com tendências similares para a maioria das tipologias, apresentando padrão de resposta consistente dos IV's em relação a disponibilidade meteorológica regional. Para ambos os índices de vegetação a exceção foi a tipologia campos litorâneos (CLI), que apresentou baixa ou negativa correlação com o TRMM, principalmente para o índice EVI. Os baixos valores de correlação podem ser influenciados pelas condições meteorológicas características da região litorânea, como a atuação do anticiclone do Atlântico com transporte umidade e formação de nuvens e a passagem dos sistemas frontais durante o inverno que intensificam a pluviosidade (BRITTO *et al.*, 2008).

Quando comparado os dados de EVI e NDVI com os valores médios regionais das estações meteorológicas, este padrão se mantém. Assim, considerando a distribuição espacial das tipologias campestres observa-se que os valores de EVI e NDVI

estão, em sua maioria, associados à variabilidade do regime de precipitação pluvial do Estado, considerada como a principal responsável pelo desenvolvimento da vegetação e produção de biomassa no RS (MATZENAUER *et al.*, 2002).

De acordo com levantamento elaborado por Boschi *et al.* (2011), o comportamento espaço-temporal da precipitação pluvial no RS, entre os decênios de 1987-1996 e 1997-2006, indica que os maiores volumes de chuva são observados na parte norte do Estado, enquanto a metade sul apresenta os menores volumes. Na região central, volumes intermediários de precipitação pluvial foram identificados.

Para a primavera, o verão e outono os coeficientes de correlação foram superiores aos do inverno. Períodos de estiagem ou distribuição irregular da precipitação pluvial determinam a ocorrência de estresse hídrico na vegetação campestre no RS, e são mais frequentes durante o verão refletindo no desenvolvimento/crescimento da vegetação até o início do outono. Durante o final da primavera e no verão, o desenvolvimento da vegetação campestre atinge o pico de reprodução e crescimento, influenciado principalmente pela precipitação pluvial, sendo a falta de água fator limitante do crescimento das pastagens.

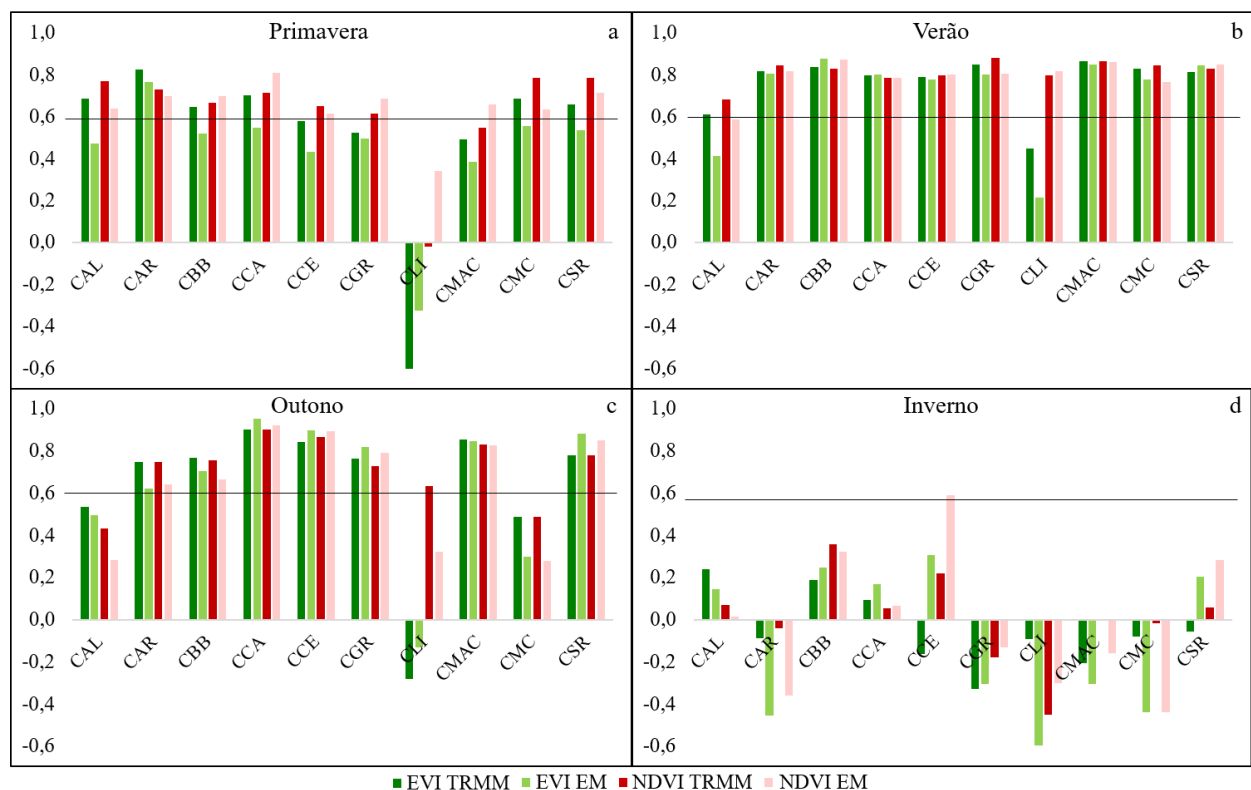


Fig. 4 - Correlação entre o EVI e a precipitação pluvial do TRMM (EVI TRMM) e a precipitação pluvial das estações meteorológicas (EVI EM) e NDVI e a precipitação pluvial do TRMM (NDVI TRMM) e a precipitação pluvial das estações meteorológicas (NDVI EM) para as estações do ano - primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d) - em 10 tipologias de campo (Campo de altitude (CAL), Campo arbustivo (CAR), Campo com barba de bode (CBB), Campo com areais (CCA), Campo com espinilho (CCE), Campo graminoso (CGR), Campo litorâneo (CLI), Campo misto de andropogônias e compostas (CMAC), Campo Misto do Cristalino Oriental (CMC) e Campo de solos rasos (CSR)) predominantes no Rio Grande do Sul no período de 2002 a 2012. Valores acima da linha preta indicam significância no coeficiente de correlação pelo teste t-Student ($p \leq 0.05$).

Já no inverno, as baixas temperaturas, com eventuais ocorrências de geadas contribuem para a redução de crescimento dos campos, associado ao excesso de umidade e menor disponibilidade de radiação solar (TRENTIN, 2015). Dessa forma, o aumento ou diminuição nos valores de EVI e NDVI estão diretamente relacionados à ocorrência de precipitação pluvial, especialmente na metade sul do Estado, que tende a apresentar períodos de deficiência hídrica com maior frequência no final da primavera, verão e início do outono, onde estão distribuídas a maioria das tipologias campestres (CAR, CCA, CCE, CGR, CMAC, CMC e CSR) que apresentaram alta correlação com os dados do TRMM.

Durante o inverno, em decorrência das baixas temperaturas ocorre o período de senescência da vegetação campestre com reflexo na diminuição dos valores de EVI e NDVI (JUNGES *et al.*, 2016). A menor disponibilidade de radiação solar e as baixas

temperaturas tendem a contribuir para uma menor correlação nos valores de EVI e NDVI para todas as tipologias nesta estação do ano.

Na análise entre os IV's e a temperatura do ar observaram-se valores de correlação inferiores aos verificados com a precipitação pluvial, principalmente para o ERA Interim quando comparado às correlações das estações de superfície (Figura 5) e maior variabilidade de resposta entre as tipologias campestres. Para ambos os índices os maiores valores de correlação (>0,5) foram obtidos durante o inverno para a maioria das tipologias, especialmente para os valores médios regionais observados nas estações meteorológicas. Valores inferiores aos obtidos neste estudo, foram observados por Trentin e Fonseca (2011), ao relacionarem a reflectância dos solos nas bandas espectrais (azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio) e a temperatura média do ar.

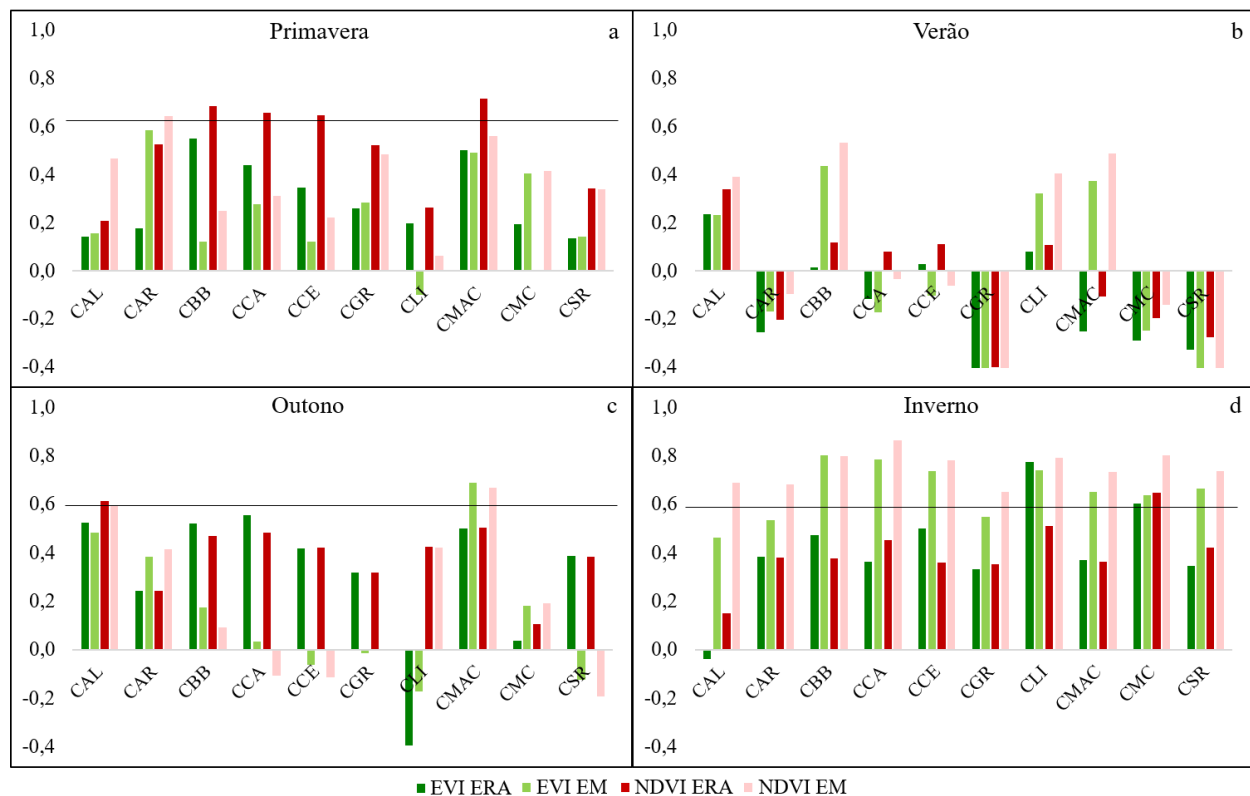


Fig. 5 - Correlação entre o EVI e a temperatura do ar do ERA Interim (EVI ERA) e a temperatura do ar das estações meteorológicas (EVI EM) e o NDVI e a temperatura do ar do ERA Interim (NDVI ERA) e a temperatura do ar das estações meteorológicas (NDVI EM) para as estações do ano - primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d) - em 10 tipologias de campo (Campo de altitude (CAL), Campo arbustivo (CAR), Campo com barba de bode (CBB), Campo com areais (CCA), Campo com espinilho (CCE), Campo gramíneo (CGR), Campo litorâneo (CLI), Campo misto de andropogônias e compostas (CMAC), Campo Misto do Cristalino Oriental (CMC) e Campo de solos rasos (CSR)) predominantes no Rio Grande do Sul no período de 2002 a 2012. Valores acima da linha preta indicam significância no coeficiente de correlação pelo teste t-Student ($p \leq 0.05$).

Ocorre uma inversão no padrão observado em relação à precipitação pluvial que apresentou baixa correlação durante o inverno, indicando que a temperatura do ar atua como fator limitante de crescimento da vegetação campestre. Durante as estações quentes do ano (primavera e verão) ocorre incremento nos valores de EVI e NDVI e diminuição nas estações

mais frias (outono e inverno) (JUNGES *et al.*, 2016; KUPLICH *et al.*, 2013).

Também, observou-se diferença no padrão de correlação entre as tipologias distribuídas na metade norte e sul do RS, influenciado pela variabilidade da temperatura do ar que é determinada em função da altitude e continentalidade. Os valores mais baixos de temperatura são sempre registrados no Planalto

Meridional a nordeste do Estado, onde a correlação com os índices de vegetação e o ERA Interim foi inferior aos obtidos para as tipologias distribuídas na metade sul, onde são registrados os valores mais altos de temperatura do ar que normalmente ocorrem na Depressão Central ou Vale do rio Uruguai na direção centro-oeste (SARTORI, 2003).

Durante o final da primavera, verão e início do outono podem ocorrer períodos de deficiência hídrica no Estado, o que afeta o desenvolvimento/crescimento da vegetação campestre, tornando a precipitação pluvial fator determinante da produção vegetal e consequentemente da relação com os índices espectrais e dados meteorológicos estimados. Em geral, os IV's apresentaram valores de correlação com o TRMM superiores aos obtidos com as estações de superfície, especialmente durante a primavera e o verão para um maior número de tipologias. Assim, a obtenção dos dados em grade pelo TRMM consegue captar de forma mais adequada a relação entre os IV's e a variabilidade da distribuição da precipitação pluvial no Estado.

Já para a temperatura do ar, obteve-se para ambos os índices de vegetação correlações inferiores ao TRMM. Apenas durante o período de senescência no final do outono e início do inverno, a temperatura do ar passa a exercer influência sobre a fenologia da vegetação campestre como evidenciado pela correlação entre as estações meteorológicas e os IV's. Por apresentar um padrão de distribuição espacial mais homogêneo, evidencia-se que o dado obtido nas estações de superfície possui maior precisão em representar a condição média do pixel dada pelos IV's do que os dados obtidos em grade como os do ERA Interim.

Para ambos os IV's os valores de correlação com as variáveis meteorológicas não apresentaram diferenças significativas, indicando que ambos os índices possuem potencialidade de uso em estudos envolvendo a vegetação campestre. Salienta-se que em condições climatológicas como as apresentadas no RS, os dados meteorológicos estimados através de reanálise ou obtidos por satélite podem ser utilizados como fonte alternativa para minimizar falhas ou ausência de informações sobre precipitação pluvial e temperatura do ar em locais com baixa rede de observação.

3. CONCLUSÕES

Os resultados do TRMM e do ERA Interim apresentaram um bom desempenho em relação aos dados observados com diferenças no padrão de distribuição espacial e sazonal para as tipologias campestres. Na análise entre os IV's e os dados estimados pelo TRMM a correlação tende a ser superior durante a primavera, o verão e o outono. Enquanto que para a temperatura do ar do ERA Interim destaca-se a melhor representação dos IV's para o inverno.

Considera-se que os valores encontrados são aceitáveis e consistentes e que a série de dados analisada para o Rio Grande do Sul indica a possibilidade do uso dos dados estimados pelo satélite TRMM e dados de reanálise do ERA Interim como alternativa para minimizar a ausência de informações sobre precipitação pluvial e temperatura do ar obtidas em rede de estações de superfície. Adicionalmente, os dados estimados

podem ser avaliados enquanto forçantes das variações temporais e espaciais nas séries de IV's.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEINS TANK, A.M.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 1-22, 2006.
- BALSAMO, G.; ALBERGEL, C.; BELJAARS, A.; BOUSSETTA, S.; BRUN, E.; CLOKE, H.; DEE, D.; DUTRA, E.; MUÑOZ-SABATER, J.; PAPPENBERGER, F.; DE ROSNAY, P.; STOCKDALE, T.; VITART, F. ERA-Interim/Land: A global land surface reanalysis data set. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 389-407, 2015.
- BAO, X.; ZHANG, F. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. **Journal of Climate**, v. 26, p. 206-214, 2013.
- BETTS, A.K.; KÖHLER, M.; ZHANG, Y. Comparison of river basin hydrometeorology in ERA-Interim and ERA-40 reanalyses with observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. 1-12, 2009.
- BOLDRINI, I.I.; LONGHI-WAGNER, H.M. Poaceae no Rio Grande do Sul: diversidade, importância na fisionomia e conservação. **Ciência & Ambiente**, v. 42, p. 71-92, 2011.
- BOSCHI, R.S.; OLIVEIRA, S.R.M.; ASSAD, E.D. Técnicas de mineração de dados para análise da precipitação pluvial decenal no Rio Grande do Sul. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1189-1201, 2011.
- BOVOLO, C.I.; PEREIRA, R.; PARKIN, G.; KILSBY, C.; WAGNER, T. Fine-scale regional climate patterns in the Guianas, tropical South America, based on observations and reanalysis data. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 1665-1689, 2012.
- BRITTO, F.P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA, M. Regionalização sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, p. 84-99, 2008.
- BROXTON, P.D.; ZENG, X.; SULLA-MENASHE, D.; TROCH, P.A. A Global Land Cover Climatology Using

- MODIS Data. **Journal of applied Meteorology and Climatology**, v. 53, p. 1593-1605, 2014.
- CAI, M.; KALNAY, E. Can reanalysis have anthropogenic climate trends without Model Forcing?. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1844-1849, 2005.
- CAMARGO, E.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (Ed.). **Análise Espacial de Dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 1-37.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.59, p. 93-99, 2007.
- COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. 270p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COSTI, J. **Estimativa do derretimento e descarga de água na porção norte da Península Antártica**. 2011. 91p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M.A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A.C.M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A.J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E.V.; ISAKSEN, I.; KALLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A.P.; MONGE-SANZ, B.M.; MORCRETTE, J.J.; PARK, B.K.; PEUBEY, C.; ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- EFRON, B. Bootstrap methods: another look at the Jackknife. **The Annals of Statistics**, v. 7, p. 1-26, 1979.
- FAZIO, V.S. **Interpolação espacial: uma comparação analítica entre redes RBF e Krigagem**. 2013. 111p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- FRANCHITO, S.H.; BRAHMANANDA RAO, V.; VASQUES, A.C.; SANTO, C.M.E.; CONFORTE, J.C. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 114, n. 2, p. 1-9, 2009.
- HASENACK, H.; WEBER, E.; BOLDRINI, I.I.; TREVISAN, R. **Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das savanas uruguaias em escala 1:500.000 ou superior e relatório técnico descrevendo insumos utilizados e metodologia de elaboração do mapa de sistemas ecológicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Ecologia, The Nature Conservancy, 2010. p. 1-22.
- HUFFMAN, G.J.; BOLVIN, D.T.; NELKIN, E.J.; WOLFF, D.B.; ADLER, R.F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K.P.; STOCKER, E.F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007.
- JESUS, E.M. **Simulações climáticas regionais para o CORDEX sobre a América do Sul e impactos das frentes frias na climatologia simulada**. 2014. 135p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Meteorologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- JUNGES, A.H.; BREMM, C.; FONTANA, D.C.; OLIVEIRA, C.A.O.; SCHAPARINI, L.P.; CARVALHO, P.C.F. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 4, p. 332-337, 2016.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWJAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.
- KÖPPEN, W. **Climatologia: con um estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Economica, 1931. 478 p.
- KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A.T.C.; STOCKER, E.; ADLER, R.F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W.S.; ZIPSER, E.; SMITH, E.A.; WILHEIT, T.T.; NORTH, G.; KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p.1965-1982, 2000.
- KUPLICH, T.M.; MOREIRA, A.; FONTANA, D.C. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. **Revista**

- Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 17, p. 1116-1123, 2013.
- LOS, S.O. Modelling spatial and temporal vegetation variability with the Climate Constrained Vegetation Index : evidence of CO₂ fertilisation and of water stress in continental interiors. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 8, p. 4781-4821, 2015.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MALUF, J.R.T.; BARNI, N.A.; BUENO, A.C.; DIDONÉ, I.A.; DOS ANJOS, C.S.; MACHADO, F.A.; SAMPAIO, M.R. Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul. **Boletim FEPAGRO**, n. 10, 2002. 104 p.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Atlas Climático**: Rio Grande do Sul. In: MATZENAUER, R.; RADIN, B.; ALMEIDA, I.R. Ed(s). Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio, Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), 2011.
- MOONEY, P.A.; MULLIGAN, F.J.; FEALY, R. Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 545-557, 2010.
- NÓBREGA, R.S.; SOUZA, Ê.P.; GALVÍNIO, J.D. Análise da estimativa de precipitação do TRMM em uma Sub-bacia da Amazônia Ocidental. **Revista de Geografia**, v. 25, n. 1, p. 6-20, 2008.
- NUÑEZ, M.N.; CIAPESSONI, H.H.; ROLLA, A.; KALNAY, E.; CAI, M. Impact of land use and precipitation changes on surface temperature trends in Argentina. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 1-11, 2008.
- OVERBECK, G.E.; MÜLLER, S.C.; FIDELIS, A.; PFADENHAUER, J.; PILLAR, V.P.; BLANCO, C.C.; BOLDRINI, I.I.; BOTH, R.; FORNECK, E.D. Brazil's neglected biome: The South Brazilian *Campes*. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 9, n. 2, p. 101-116, 2007.
- PARKER, W.S. Reanalyses and observations: What's the Difference?. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 9, p. 1565-1572, 2016.
- PINTO, L.I.C.; COSTA, M.H.; LIMA, F.Z.; DINIZ, L.M.F.; SEDIYAMA, G.C.; PRUSKI, F. Comparação de produtos de precipitação para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 461-472, 2009.
- QUADRO, M.F.L.; DIAS, M.A.F.S.; HERDIES, D.L.; GONCALVES, L.G.G. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 152-162, 2012.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.
- RIENECKER, M.M.; SUAREZ, M.J.; GELARO, R.; TODLING, R.; BACMEISTER, J.; LIU, E.; BOSILOVICH, M.G.; SCHUBERT, S.D.; TAKACS, L.; KIM, G.; BLOOM, S.; CHEN, J.; COLLINS, D.; CONATY, A.; SILVA, A.; GU, W.; JOINER, J.; KOSTER, R.D.; LUCCHESI, R.; MOLOD, A.; OWENS, T.; PAWSON, S.; PEGION, P.; REDDER, C.R.; REICHLER, R.; ROBERTSON, F.R.; RUDDICK, A.G.; SIENKIEWICZ, M.; WOOLLEN, J. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. **Journal of Climate**, v. 24, p. 3624-3648, 2011.
- ROZANTE, J.R.; CAVALCANTI, I.F.A. Regional Eta model experiments: SALLJEX and MCS development. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 1-20, 2008.
- SAHA, S.; MOORTHI, S.; PAN, H.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; KISTLER, R.; WOOLLEN, J.; BEHRINGER, D.; LIU, H.; STOKES, D.; GRUMBINE, R.; GAYNO, G.; WANG, J.; HOU, Y.; CHUANG, H.; JUANG, H.J.; SELA, J.; IREDELL, M.; TREADON, R.; KLEIST, D.; DELST, P.V.; KEYSER, D.; DERBER, J.; EK, M.; MENG, J.; WEI, H.; YANG, R.; LORD, S.; DOOL, H.V.D.; KUMAR, A.; WANG, W.; LONG, C.; CHELLIAH, M.; XUE, Y.; HUANG, B.; SCHEMM, J.; EBISUZAKI, W.; LIN, R.; XIE, P.; CHEN, M.; ZHOU, S.; HIGGINS, W.; ZOU, C.; LIU, Q.; CHEN, Y.; HAN, Y.; CUCURULL, L.; REYNOLDS, R.W.; RUTLEDGE, G.; GOLDBERG, M. The NCEP climate forecast system reanalysis. **American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015-1057, 2010.
- SALDANHA, C.B.; RADIN, B.; CARDOSO, M.A.S.; RIPPEL, M.L.; FONSECA, L.L.; RODRIGUEZ, F. Comparação dos dados de precipitação gerados pelo GPCP vs observados para o estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 415-422, 2015.
- SARTORI, M.G.B. A dinâmica do clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, v. 1, n. 20, p. 27-49, 2003.
- SARMIENTO-DEVIA, R.A.; LÓPEZ-SCOBAR, Á.V.; MEJÍAS, M.B.; DÁVILLA, P.M.; FRANCO-HERRERA, A. Variabilidad intra-anual del régimen climático en sectores de surgencia en el sudeste del Mar Caribe, usando ERA Interim. **Revista de Biología Marina y Oceanografía**, v. 48, n. 3, p. 471-485, 2013.
- SECRETARIA DA COORDENAÇÃO E PLANEJAMENTO. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SCP, 2 ed., 2002. 112 p.
- SIMMONS, A.J.; WILLET, K.M.; JONES, P.D.; THORNE, P.W.; DEE, D.P. Low-frequency variations in

surface atmospheric humidity , temperature , and precipitation : Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 1-21, 2010.

SIMMONS, A.J.; UPPALA, S.; DEE, D.; KOBAYASHI, S. ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. **ECMWF Newsletter**, v. 110, p. 26-35, 2006.

SOARES, P.M.M.; CARDOSO, R.M.; MIRANDA, P.M.A.; MEDEIROS, J.; BELO-PEREIRA, M. WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. **Climate Dynamics**, v. 39, p. 2497-2522, 2012.

SOLMAN, S.A.; SANCHEZ, E.; SAMUELSSON, P.; DA ROCHA, R.P.; LI, L.; MARENGO, J.; PESSACG, N.L.; REMEDIO, A.R.C.; CHOU, S.C.; BERBERY, H.; LE TREUT, H.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis : model performance and uncertainties. **Climate Dynamics**, v. 41, n. 5-6, p. 1139-1157, 2013.

SYLLA, M.B.; COPPOLA, E.; MARIOTTI, L.; GIORGI, F.; RUTTI, P.M.; DELL'AQUILLA, A.; BI, X. Muliyear simulation of the Africa climate using a regional climate model (RegCM3) with the high resolution ERA-Interim reanalysis. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 231-247, 2009.

TRENTIN, C.B. **Estoques de carbono nas áreas de vegetação campestre da área de proteção ambiental (APA) do Ibirapuitã**. 2015. 98p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

TRENTIN, C.B.; FONSECA, E.L. Monitoramento da fenologia da vegetação campestre do bioma Pampa e sua relação com a temperatura média do ar. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 2011. **Anais**. p. 1628-1635, 2011.

VIANA, D.R.; FERREIRA, N.J.; CONFORTE, J.C. Avaliação das estimativas de precipitação 3B42 e 3B43 do satélite TRMM na Região Sul do Brasil. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, 2010. **Anais**. p. 1-5, 2010.

WILLET, K.M.; JONES, P.D.; GILLET, N.P.; THORNE, P.W. Recent changes in surface humidity: development of the HadCRUH dataset. **Journal of Climatology**, v. 21, p. 5364-5383, 2008.

WOLFF, D.B.; MARKS, D.A.; AMITAI, E.; SILBERSTEIN, D.S.; FISHER, L.; TOKAY, A.; WANG, J.; PIPPITT, J.L. Ground Validation for the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). **American Meteorological Society**, v. 22, p. 365-380, 2005.

ZHAO, M.; HEINSCH, F.A.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n. 2, p. 164-176, 2005.

2.2 ARTIGO 2 – Abordagem ondaleta aplicada em série temporal EVI/MODIS e dados meteorológicos (Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data)

Submetido para a revista ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Ms. Ref. No.: PHOTO-D-17-00457

Title: Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Dear Ms. Andreise Moreira,

Your submission entitled "Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data" will be handled by Guest Editor Carlos Scavuzzo. The reference number of your paper is PHOTO-D-17-00457.

You may check on the progress of your paper by logging on to the Elsevier Editorial System as an author. The URL is <https://ees.elsevier.com/photo/>.

Your username is: andreisem@gmail.com

If you need to retrieve password details, please go to:

http://ees.elsevier.com/photo/automail_query.asp

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Elsevier Editorial System

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Abordagem ondaleta aplicada em série temporal EVI/MODIS e dados meteorológicos

Andreise Moreira,^{a*} Denise Cybis Fontana^a e Tatiana Mora Kuplich^b

^aPrograma de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: andreisem@gmail.com; dfontana@ufrgs.br.

^bInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS), Caixa Postal 5021, 97105-970, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: tatiana.kuplich@inpe.br.

* Correspondência para: A. Moreira. E-mail: andreisem@gmail.com. Endereço: Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

Resumo: A caracterização da fenologia das diferentes tipologias campestres nos campos do Sul do Brasil é essencial para descrever a dinâmica espaço-temporal dos campos e contribuir para ações de gestão sustentável e estratégias de conservação, ameaçados por culturas agrícolas, silvicultura e expansão da exploração pecuária com sobrepastoreio. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi identificar padrões relacionados à fenologia de diferentes tipologias campestres do bioma Pampa e Mata Atlântica na região sul do Brasil e a relação com variáveis meteorológicas, em uma série temporal de dados do EVI/MODIS, utilizando a abordagem ondaleta (Transformada - TO e Coerência - TC). Foi utilizada uma série de dados do EVI/MODIS, de Fevereiro de 2000 a Dezembro de 2014, totalizando 342 imagens, e coletadas amostras de campo para as 10 tipologias campestres predominantes na área de estudo. Valores médios de EVI e da Transformada de ondaleta (TO) indicam quando e onde ocorrem mudanças na dinâmica fenológica dos campos. A Transformada Coerência (TC), aplicada à série temporal EVI/MODIS com (i) precipitação pluvial e (ii) temperatura do ar, ajudou a identificar a correlação entre os dados. Foram identificados dois ciclos bem definidos: anual, variando de 1 a 23 observações, e interanuais, de 92 a 184 observações. As diferentes tipologias campestres mostraram padrões fenológicos semelhantes, embora também observada alguma dependência espacial relacionada com os diferentes solos e a geomorfologia da área de estudo. A influência de fatores abióticos na vegetação campestre e eventos fenológicos foram expressos pelo EVI e apresentaram dependência espacial fortemente ligada às condições meteorológicas (por exemplo, a permanência da umidade após a ocorrência de precipitação pluvial em áreas de solos

rasos) e climáticas. A correlação entre o EVI e a temperatura do ar foi mais forte no ciclo anual para todas as tipologias campestres. Para os ciclos interanuais, os eventos de El Niño e La Niña determinaram maior correlação entre os dados de EVI e a precipitação pluvial.

Palavras-chave: índice de vegetação; vegetação campestre; transformada ondaleta; transformada coerência; precipitação pluvial; temperatura do ar.

1. Introdução

O registro dos eventos biológicos, tais como brotação, floração, frutificação, senescência foliar e queda de folhas caracterizam a fenologia das plantas (Tiedemann, 2011). Estes eventos são geneticamente pré-determinados, mas também fortemente moldados pelas condições climáticas, como temperatura, fotoperíodo e disponibilidade de água (Hmimina et al., 2013; Aber e Melillo, 2001).

A fenologia da vegetação tem sido frequentemente estudada com o uso de índices de vegetação, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), obtidos do sensor orbital MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo dos satélites Terra e Aqua (Paruelo et al., 2001; Huete et al., 2002; Wang e Tenhunen, 2004; Soudani et al., 2012). Os dados coletados por sensores orbitais permitem o entendimento do padrão sazonal presente no ciclo de vida das espécies vegetais, o qual é sensível às variações das condições meteorológicas, sendo relevante a estudos da variabilidade dos fatores do clima em escala local, regional e global (Tan et al., 2011).

O índice EVI é uma importante ferramenta para a construção de perfis sazonais da vegetação, caracterizando a duração do período de crescimento, pico de verde e períodos de senescência. O EVI, quando comparado ao NDVI, apresenta redução da influência atmosférica e do solo na resposta espectral do dossel, utilizando em seu cálculo fatores de correção do solo e de aerossóis da atmosfera (Justice et al., 1998). Também, é mais sensível à variação da estrutura do dossel, incluindo o Índice de Área Foliar (IAF), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Gao et al., 2000; Huete et al., 2002), além de apresentar melhor distinção entre áreas com culturas e solo (Huete et al., 1994; 2002). Adicionalmente, as informações derivadas do EVI possibilitam uma maneira eficiente para realizar o monitoramento espaço-temporal da fenologia da vegetação em diferentes escalas de tempo e espaço (Menzel et al., 2001; Tan et al., 2011).

Técnicas estatísticas que trabalham no domínio da frequência ou do tempo, como análise de Fourier e Transformada de ondaleta, têm sido utilizadas para extração de informações de séries temporais de índices de vegetação e se mostrado adequadas na análise da dinâmica temporal da vegetação (Percival et al., 2004; Bruce et al., 2006), detecção de mudanças (Piao et al., 2012) e na relação entre fatores meteorológicos e fenologia (Li e Kafatos, 2000; Carl et al., 2012; Kuplich et al., 2013).

No entanto, uma das grandes desvantagens da técnica de Fourier (espectro) vem do fato que ela permite desenvolver análises somente da frequência e não no tempo. Isto significa que mesmo capaz de determinar os intervalos ocorridos no domínio da frequência presente em um sinal, não há noção de quando (em que intervalo de tempo) eles ocorrem (Oliveira, 2007). Assim, a TO apresenta vantagem sobre as análises de Fourier por descrever ou representar os dados em diferentes escalas de frequência e tempo, processar uma grande quantidade de dados, identificando semelhanças, padrões e variações em séries temporais. A TO permite analisar sinais irregularmente distribuídos em séries temporais não estacionárias em diferentes escalas de frequência e tempo, ou seja, em três dimensões (tempo, escala e intensidade) (Furon et al., 2008; Santos et al., 2013). Já a TC aparece como uma alternativa interessante para a avaliação de sinais não estacionários, indicando correlação ou semelhança entre duas séries temporais, ideal para a análise aqui apresentada.

Alguns estudos com foco na relação entre a dinâmica da vegetação campestre e variáveis climáticas foram desenvolvidos no sul do Brasil, especialmente para a temperatura do ar e a precipitação pluvial, mostraram que a variabilidade climática influencia na dinâmica sazonal de diferentes tipologias campestres (Trentin, 2011; Wagner et al., 2013). Esta informação é essencial para descrever e entender a dinâmica espaço-temporal dos campos e contribuir para a geração de indicadores de manejo sustentável e estratégias de conservação. Os campos no sul do Brasil estão atualmente ameaçados pela expansão da agricultura, silvicultura e pela produção pecuária intensiva e manejo inadequado, mesmo assim continuam sendo negligenciados (Overbeck et al., 2007; Overbeck et al., 2015),

O objetivo deste estudo foi identificar padrões relacionados à fenologia de diferentes tipologias campestres do bioma Pampa e Mata Atlântica na região sul do Brasil, a partir de uma série temporal de dados do EVI/MODIS e a relação com variáveis meteorológicas, como a precipitação pluvial e a temperatura do ar, utilizando a técnica de Transformada de ondaleta e Transformada Coerência.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo abrangeu áreas de vegetação campestre nativa do estado do Rio Grande do Sul (RS), localizado no extremo meridional do Brasil, entre as latitudes 27° 05' e 33° 45' S e longitudes 49° 43' e 57° 39' W. O RS tem em torno de 65% de sua área coberta por vegetação campestre, presentes no bioma Pampa e Mata Atlântica.

A área de estudo apresenta clima temperado ou “C”, tipo úmido ou “Cf”, com as variedades “Cfa” e “Cfb” (sub-tropical e temperado, respectivamente), conforme a classificação de Köppen (1931). Em regiões de clima “Cfa”, o qual predomina na maior parte do Estado, a precipitação pluvial média anual varia em torno de 1.200-1.600 mm, sem período seco sistemático. O inverno é marcado por temperaturas baixas e ocorrência de geadas, a temperatura média nesta estação é inferior a 16°C e durante o verão as máximas são superiores à 30°C (Nimer, 1990). Já nas regiões de maior altitude, especialmente no nordeste do RS, predomina o tipo climático “Cfb”, em que a precipitação pluvial é elevada (1.550-2.000 mm), não ocorre estação seca e as temperaturas médias anuais variam entre 16 e 22°C (Nimer, 1990). Os verões são amenos e durante o inverno podem ocorrer geadas e neve nas áreas mais elevadas.

A vegetação campestre é rica em espécies de plantas, sendo já conhecidas em torno de 2.600 espécies. Uma característica particular dos campos do RS é a co-existência de espécies C₃ e C₄, com diferentes eficiências na produção de biomassa (Quadros e Pillar 2002; Overbeck et al., 2007), distinguindo a vegetação da região sul do Brasil de outras formações vegetais do Globo, com grande variabilidade produtiva no tempo e no espaço (Burkart, 1975).

Nove diferentes tipologias campestres foram definidas como área de estudo, considerando o domínio da estrutura da vegetação e espécies, tipo de solo e geomorfologia (Boldrini, 1997; Hasenack et al., 2010; Boldrini e Longhi-Wagner, 2011), Figura 1. As tipologias campestres na área de estudo do Pampa são: Campo arbustivo (CAR), Campo com barba de bode (CBB), Campo com areais (CCA), Campo com espinilho (CCE), Campo gramíneo (CGR), Campo litorâneo (CLI), Campo misto de andropogônias e compostas (CMAC), Campo Misto do Cristalino Oriental (CMC) e Campo de solos rasos (CSR). No bioma Mata Atlântica, embora há maior presença de floresta, também é possível encontrar áreas cobertas pelos Campos de altitude (CAL), a última tipologia aqui estudada. Estas tipologias campestres foram a base para a amostragem de dados de EVI, conforme explicado no próximo item.

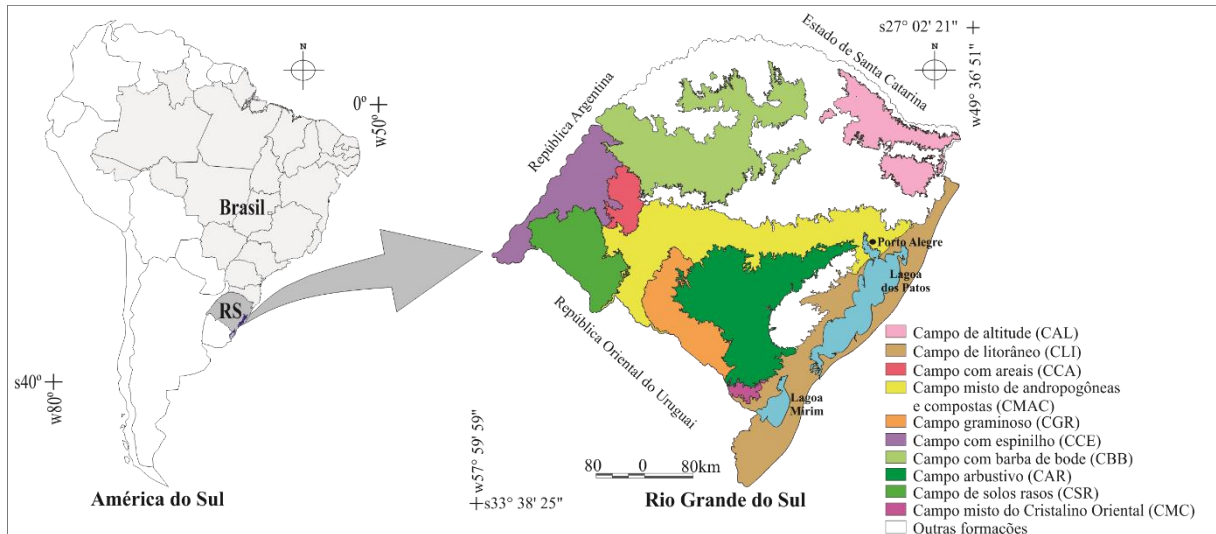


Fig. 1. Tipologias campestres do estado do Rio Grande do Sul (RS), Sul do Brasil.

Adaptado do IBGE (2013) e Hasenack et al., (2010).

2.2 Período de estudo e definição das amostras

Foi utilizada uma série temporal de dados EVI/MODIS, produto MOD13Q1 (coleção 5), com resolução espacial de 250 m e composição de imagens de máximo valor a cada 16 dias. O período analisado compreendeu fevereiro de 2000 a dezembro de 2014, totalizando 342 imagens.

Os valores médios de EVI foram obtidos de 20 polígonos amostrais para cada uma das 10 tipologias campestres. O número de pixels considerado para cada tipologia variou entre 2.462 a 4.284 pixels, definidos como suficientes após a aplicação do método *bootstrap* (Efron, 1979), considerando 1.000 iterações e nível de significância de 5%, que determinou um valor mínimo de 1.500 pixels para a realização das análises. Também, aplicou-se na série temporal de dados EVI o filtro Savitzky-Golay, disponível no programa TIMESAT (Jönsson e Eklundh, 2002; 2004). O objetivo da filtragem foi suavizar os ruídos causados principalmente por nuvens, variabilidade atmosférica e/ou variações angulares (Chen, 2004).

2.3 Precipitação pluvial e Temperatura do ar

Os dados de precipitação pluvial foram obtidos do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), lançado em 1997 em um projeto conjunto entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace and Exploration Agency* (JAXA). O produto utilizado foi o 3B42 (*Daily TRMM and Others Rainfall Estimate - 3B42 V7 derived*), que disponibiliza estimativas de precipitação diária acumulada (mm/dia) originadas a cada 3 horas

em grade de resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ obtidas de dois diferentes sensores: sensor de micro-ondas TMI (*TRMM Microwave Imager*) e sensores infravermelho (IR) (Huffman et al., 2007). Os valores de precipitação pluvial foram acumulados a cada 16 dias e obtida a média com base nos 20 polígonos amostrais para cada tipologia campestre.

Os dados de temperatura do ar foram obtidos do ERA-INTERIM, a mais recente reanálise global atmosférica produzida pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para o período de 1979 até o presente (Dee et al, 2011; Balsamo et al., 2015). Neste estudo, a temperatura do ar coletada a 2m da superfície com grade de resolução horizontal de 0.25° foi utilizada e obtido valores médios para coincidir com o ciclo de 16 dias do EVI e dos dados do TRMM.

2.4 Aplicação da Transformada Ondaleta e Transformada Coerência

A TO foi aplicada na série EVI para identificar variações, em diferentes escalas de frequência e tempo. A TO é definida por dois parâmetros: a escala **a** e a posição **b**, onde **a** e **b** são os valores reais, e **a** > 0. O conjunto de funções base, $\{a, b, \psi(t)\}$, pode ser gerado pela ondaleta mãe, $\psi(t)$, de acordo com Daubechies (1992), Equação (1):

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0, \quad -\infty < b < \infty \quad (1)$$

Os dados de EVI/MODIS variam entre 0 e 1 e satisfazem uma das premissas da TO. Neste trabalho, os valores mínimos e máximos identificados para o EVI (0,21 - 0,57) possibilitam a aplicação da transformada ondaleta contínua que demonstra a relação existente entre as componentes de diferentes frequências em função da escala de tempo do sinal estudado. A transformada ondaleta contínua da função $f(t)$, deve respeitar o conjunto de funções base, $\{a, b, \psi(t)\}$, e é definida pela Equação (2):

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\psi}_{ab}(t) f(t) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\psi}_{ab}\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (2)$$

onde: $f(t)$ é o sinal de entrada, $\bar{\psi}$ é a ondaleta mãe conjugado complexo, a é o parâmetro escala e b é o parâmetro posição, onde a e b são valores reais, e $a > 0$. O termo $1/\sqrt{a}$ é utilizado para normalizar a energia de cada ondaleta (Martínez e Gilabert, 2009).

A escolha da ondaleta contínua DOG (*Derivative of Gaussian*), Equação (3), ocorre porque esta função é frequentemente utilizada como ondaleta mãe, uma vez que proporciona uma melhor resolução no tempo e na frequência e pode ser aplicada para isolar picos ou descontinuidades (Torrence e Compo, 1998) permitindo identificar variações anuais e interanuais no padrão fenológico da vegetação.

$$\frac{(-1)^{m+1}}{\sqrt{\Gamma(m+\frac{1}{2})}} \frac{d^m}{d\eta^m} \left(e^{-\frac{\eta^2}{2}} \right) \quad (3)$$

onde: m é a ordem da derivada e η é um parâmetro de tempo adimensional (Torrence e Compo, 1998).

A TO utilizada neste estudo foi implementada no MatLab, a partir do algoritmo desenvolvido por Torrence e Compo (1998), para a geração dos espectros de potência e espectro de potência global, indicando a relação entre os componentes de diferentes frequências, dependendo da escala de tempo do sinal estudado.

A TC foi aplicada na série temporal de EVI/MODIS com (i) a precipitação pluvial e (ii) a temperatura do ar, para identificar a correlação entre os dados. Esta definição se assemelha ao tradicional coeficiente de correlação (Pearson), e neste trabalho assumiu-se a coerência como um coeficiente de correlação localizado no tempo-frequência (Alcântara, 2010). A TC é obtida pela Equação (4), de acordo com Torrence e Webster (1999).

$$R_n^2(s) = \frac{|s(s^{-1}W_n^{xy}(s))|^2}{s(s^{-1}|W_n^x(s)|^2) \cdot s(s^{-1}|W_n^y(s)|^2)} \quad (4)$$

onde: $R_n^2(s)$ é a função do índice de tempo n e a escala s . S é o operador de suavização. O fator s^{-1} é usado para converter uma densidade de energia, utilizando esta definição, $0 \leq R_n^2(s) \leq 1$. Na TC duas series são usadas: X e Y , com a transformada ondaleta descrita por $W_n^x(s)$ e $W_n^y(s)$, onde n é o índice de tempo e s é a escala.

A TC aplicada as séries temporais de dados de EVI x precipitação pluvial e EVI e temperatura do ar foram representadas em um diagrama tempo-frequência, denominado escalograma ou espectro de potência (Mallat, 2009), no qual a escala de cores variando do azul (baixa correlação ou 0) até o vermelho (alta correlação ou 1), representam o coeficiente da ondaleta.

Observa-se ainda, nos espectros gerados pela TC, também a direção das setas, as quais indicam a diferença de fase entre os sinais: setas para a direita (\rightarrow) indicam que as séries estão completamente em fase, ou seja, o aumento de um sinal é correlacionado com o aumento do outro, o mesmo se aplica quando um sinal diminui. As setas para a esquerda (\leftarrow) indicam que as séries estão em fase completamente oposta, acusando correlação inversa (o aumento de um sinal é correlacionado com a diminuição do outro, e vice-versa).

3. Resultados e Discussão

Os valores médios de EVI para 2000-2014 (Fig. 2) mostrou a dinâmica da fenologia campestre para as 10 tipologias, com um padrão sazonal ao longo da série caracterizado pelo aumento de valores durante as estações quentes do ano (primavera e verão) e diminuição nas estações mais frias (outono e inverno).

Alterações na distribuição do perfil sazonal e temporal entre os anos analisados (Fig. 2) pode estar associada a variabilidade climática ou condicionada pela variação florística e de valor forrageiro induzido por diferentes substratos (solos rasos e fundos, com afloramentos rochosos) e/ou regimes de pastejo (Porto e Pillar, 2002; Quadros e Pillar, 2002). Além disso, as diferentes tipologias campestres consideradas variam estruturalmente e em relação às espécies e tipos funcionais (Overbeck et al., 2015). Ainda, a média dos perfis temporais de EVI sugerem que o padrão sazonal da fenologia da vegetação é condicionado pela temperatura do ar (T) e a precipitação pluvial influencia a variabilidade do crescimento/desenvolvimento da vegetação, principalmente durante o verão e final do outono, com a falta de água limitando o crescimento dos campos.

Estudos anteriores utilizando perfis temporais de índices de vegetação já demonstraram a associação da temperatura do ar e o crescimento da vegetação em diversas regiões do globo. Especificamente, para a vegetação campestre do estado do RS no Brasil, Fontana et al. (2007), atribuíram a diminuição nos valores de NDVI de imagens do AVHRR/NOAA, com a redução do crescimento vegetal à baixa temperatura do ar e redução da insolação durante o inverno. Wagner (2013), ao analisar a dinâmica temporal dos índices de vegetação do MODIS (NDVI e EVI) da vegetação campestre no Bioma Pampa no Brasil e no Uruguai, identificou que o padrão temporal do vigor vegetativo dos campos é determinado pelas condições climáticas da região, contudo a variável climática que limita o crescimento/desenvolvimento dos campos é dependente da estação do ano e relacionada às exigências bioclimáticas de cada tipologia vegetal.

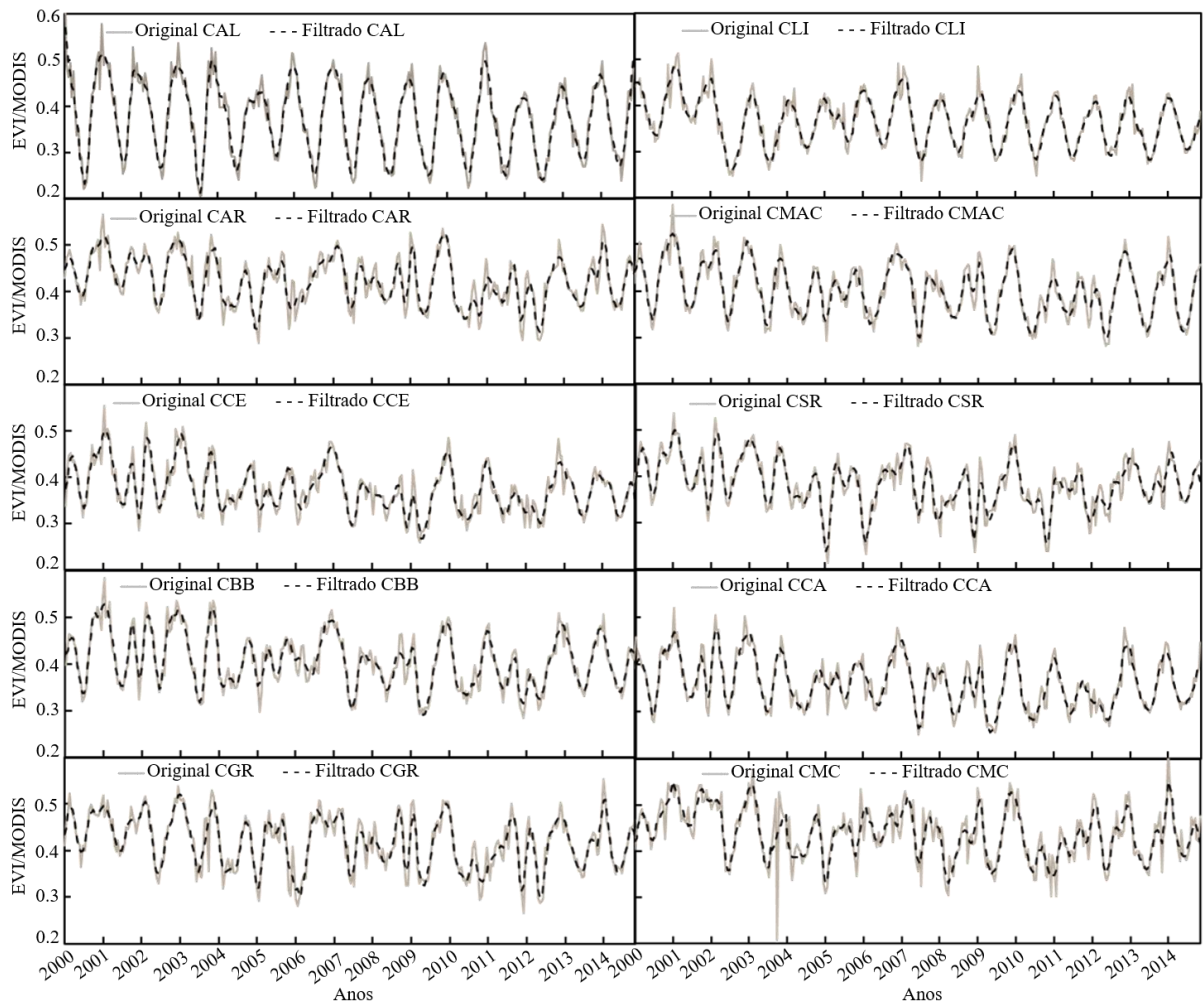


Fig. 2. Perfil médio de EVI, original e filtrado, para as tipologias campestres do RS: Campo de altitude (CAL); Campo litorâneo (CLI); Campo arbustivo (CAR); Campo misto de andropogôneas e compostas (CMAC); Campo com espinilho (CCE); Campo de solos rasos (CSR); Campo com barba de bode (CBB); Campo com areais (CCA); Campo graminoso (CGR) e Campo misto do Cristalino Oriental (CMC) para o período de 2000 a 2014.

Há diferenças na dinâmica fenológica entre as tipologias que estão associadas à variabilidade climática em RS. Nos campos do bioma Mata Atlântica (CAL), os verões são amenos e a precipitação pluvial elevada e com distribuição similar ao longo do ano. Já no Bioma Pampa, a amplitude térmica é maior, e os valores de precipitação pluvial diminuem em direção ao sul e interior do continente, o que influencia na distribuição e composição das espécies (Overbeck et al., 2015), e conseqüentemente na dinâmica fenológica das diferentes tipologias.

Em direção ao sul do RS, onde predomina o clima subtropical, ocorre um aumento das gramíneas com metabolismo fotossintético C_3 que se desenvolvem durante as estações mais frias, do outono até a primavera (Overbeck et al., 2015; Boldrini et al., 2015). Com o aumento

da temperatura do ar e maior disponibilidade de radiação solar, durante a primavera e o verão, as gramíneas C₄ florescem, mudando o aspecto da vegetação e contribuindo para o aumento nos valores de EVI. No sentido leste-oeste da área de estudo, há redução nos valores médios de precipitação pluvial e aumento de períodos de estiagem no verão, onde predominam espécies adaptadas à estas condições (Overbeck et al., 2015).

Além das características climáticas, deve-se considerar na análise do padrão fenológico da vegetação campestre também o relevo, o solo e os efeitos causados pelas diferentes formas de manejo dos campos. Conforme Overbeck et al. (2015), o manejo é fundamental para definir as diferentes fisionomias campestres locais. A vegetação campestre no RS evolui sob a influência do fogo e regimes de pastejo, com a vegetação campestre adaptada a estas condições, tendo desenvolvido estruturas que permitem resistir ao fogo ou ao pastejo e se regenerar rapidamente após estes distúrbios.

Uma forma mais objetiva de caracterizar a sazonalidade da vegetação campestre das 10 tipologias é analisar os resultados da TO com a geração do espectro de potência (Fig. 3). Na parte superior do espectro de potência, entre 1 e 23 repetições, encontra-se bem marcado o ciclo anual da série de dados. Neste, os picos de energia que estão acima da linha em branco que cruza a série possuem 95% de significância estatística.

O padrão fenológico anual, para as tipologias CAL e CLI, é caracterizado pelo incremento nos valores de EVI durante as estações quentes (primavera e verão) e diminuição nas estações frias (outono e inverno) (Fig. 2). Este padrão é apresentado no espectro de potência (Fig. 3) e demonstrado pela pequena variação no eixo y (1 a 23 observações), considerando o período de estudo de 2000 a 2014.

A tipologia CAL apresentou pico de energia de menor intensidade entre o final do ano de 2004 e início de 2006, no ano de 2012 e entre 2013-2014. Especialmente, nos anos de 2004 e 2012, esta variação no padrão anual pode ser relacionada à baixa ocorrência de precipitação pluvial na área de estudo (DISME/INMET e CPPMet/UFPel, 2004; 2012). A tipologia CLI apresentou picos fracos entre 2000-2001, 2004 a 2007, 2008-2009 e 2012-2013. Picos inter- anuais, em torno de 92 e 184 observações, para CLI, também foram identificados nos anos de 2000-2001, 2003 até início de 2005 e 2006-2007. Estas alterações no padrão, possivelmente, estão associadas à variabilidade das condições meteorológicas da área de estudo, semelhante ao observado por Roseback et al. (2009).

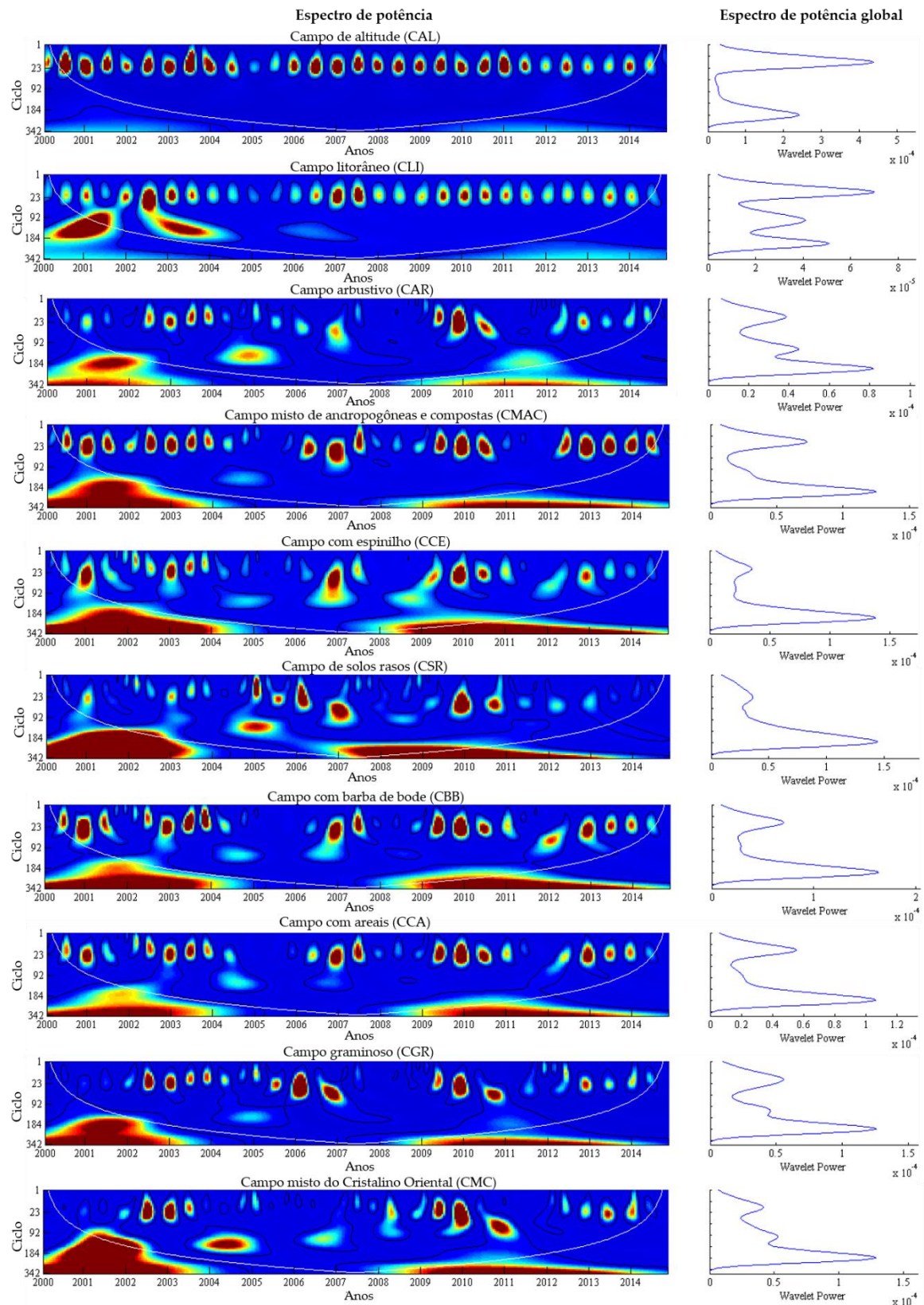


Fig. 3. Espectro de potência (tons de azul ao vermelho indicam a intensidade dos eventos - de baixa a alta intensidade) e espectro de potência global para a série temporal de dados de EVI/MODIS, de 2000 a 2014, para diferentes tipologias campestres do sul do Brasil.

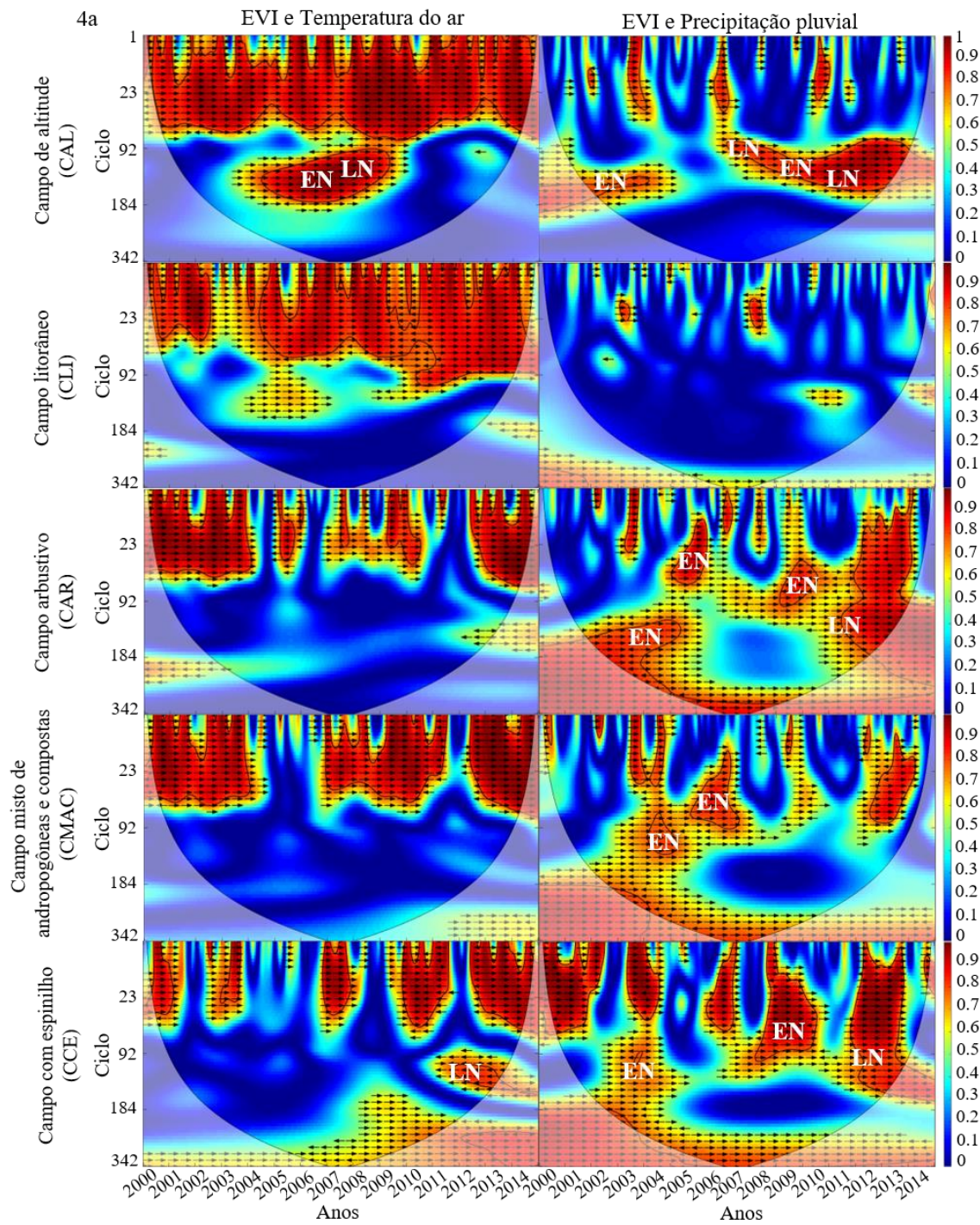
Para as tipologias remanescentes de campo (CAR, CMAC, CCE, CSR, CBB, CCA, CGR e CMC) picos inter-anuais (entre 92 e 184 observações – eixo y) encontram-se bem marcados (picos com alta intensidade aparecem em vermelho) no espectro de potência e espectro de potência global (Fig. 3). Estas alterações, em relação às tipologias CAL e CLI, são resultado da variação das condições meteorológicas (precipitação pluvial e temperatura do ar), associada as estações mais chuvosas ou mais secas (Li e Kafatos, 2000) que influenciam o crescimento/desenvolvimento vegetal e causam alteração no padrão fenológico.

No RS, alterações na precipitação pluvial e temperatura do ar estão em parte associadas a eventos de larga escala, como El Niño ou La Niña. Estudos mostraram que durante eventos de El Niño ocorre aumento nos valores médios de precipitação pluvial e temperatura do ar, sendo o oposto verificado durante eventos de La Niña (Berlato e Fontana, 2003; Jacóbsen et al., 2004; Moreira et al., 2015). No entanto, segundo Wagner (2013), as perturbações nas condições climáticas atuam de forma diferente em cada região da área de estudo e de acordo com a estação do ano, influenciando distintamente nas tipologias campestres aqui estudadas.

Com a aplicação da TC, o padrão geral foi observado novamente, com dois ciclos bem definidos: anual, que varia entre 1 e 23 observações e o ciclo interanual que varia entre 92 e 184 observações. Estes ciclos são representados pelo eixo y no espectro de potência e se distribuem ao longo da série de tempo (2000-2014) no eixo x (Fig. 4).

No ciclo anual, ocorre alternância no gradiente da escala de cores (do azul ou coeficiente ondaleta $< 0,5$ para vermelho ou coeficiente ondaleta $> 0,5$), indicando que existe variação na intensidade e sentido da correlação entre as variáveis ao longo do ano (sazonalidade). Já no ciclo interanual a variação do azul para o vermelho é bem definida e evidencia que fenômenos em larga escala tem influência nas relações entre as variáveis.

A temperatura do ar apresentou alta coerência com o EVI, principalmente para o período anual e para a maioria das tipologias campestres (CAL, CLI, CCA, CMAC, CGR, CBB, CAR e CMC) (Fig. 4 e Tabela 1). Os elevados valores de coerência indicam que as séries apresentam variações na mesma frequência e alta correlação, em que o aumento ou diminuição da temperatura do ar condiciona o aumento ou diminuição nos valores de EVI. Considerando a já conhecida associação entre o EVI e a densidade de biomassa verde (Huete et al., 2002; Jin et al., 2014), assume-se que a temperatura do ar atua como um dos fatores determinantes da dinâmica fenológica das diferentes tipologias campestres da área de estudo no sul do Brasil.



Continua na próxima página

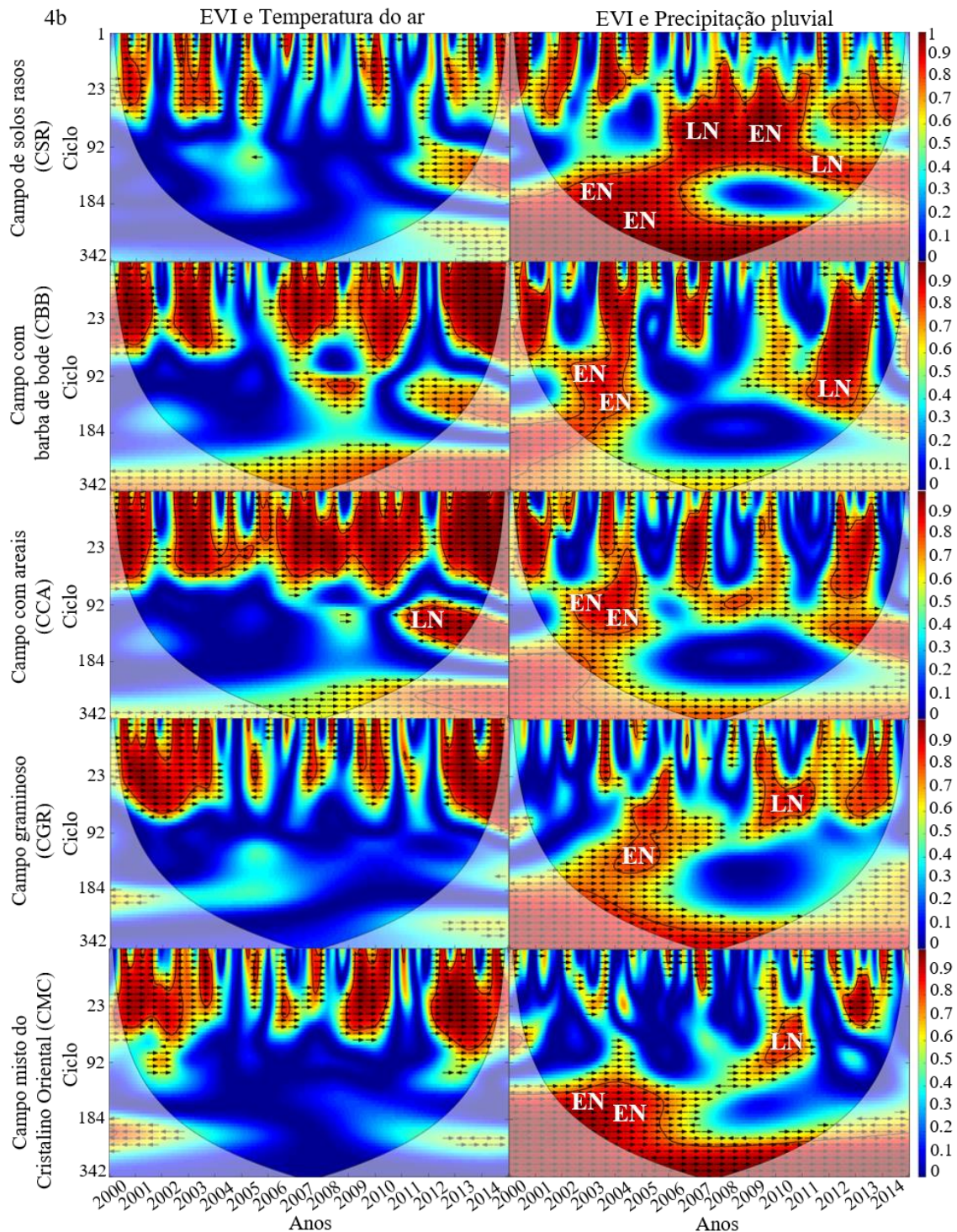


Fig. 4. Espectro de potência da ondaleta coerência (escala de cor) e diferença de fase da ondaleta (setas) entre a série de EVI/MODIS, temperatura do ar e precipitação pluvial para 10 tipologias campestres do Rio Grande do Sul, Brasil. *EN* e *LN* representam eventos de El Niño e La Niña (CPC/NOAA, 2016). Escala de cor: azul (baixa correlação ou 0) ao vermelho (alta correlação ou 1). Setas indicam a diferença de fase entre as séries: setas para a direita (\rightarrow) indicam que as séries estão completamente em fase e setas para a esquerda (\leftarrow) indicam que as séries estão em fase completamente oposta.

Tabela 1. Correlação entre a temperatura do ar e o valor médio anual de EVI para 10 tipologias campestres do Rio Grande do Sul. Cor cinza indica correlação significativa pelo teste t de Student ($p \leq 0.05$).

Ano	CAL	CLI	CAR	CMAC	CCE	CSR	CBB	CCA	CGR	CMC
2000	0.82	0.88	0.84	0.84	0.68	0.66	0.80	0.87	0.71	0.43
2001	0.81	0.89	0.90	0.89	0.75	0.76	0.85	0.85	0.88	0.87
2002	0.86	0.80	0.83	0.82	0.29	0.29	0.46	0.53	0.84	0.80
2003	0.88	0.81	0.94	0.97	0.93	0.91	0.95	0.97	0.93	0.81
2004	0.82	0.89	0.68	0.74	0.36	0.57	0.52	0.82	0.61	0.60
2005	0.81	0.78	-0.82	-0.21	0.34	-0.62	0.02	0.44	-0.79	-0.80
2006	0.87	0.92	-0.30	0.43	0.21	-0.40	0.54	0.74	-0.43	0.62
2007	0.84	0.88	0.76	0.85	0.86	0.64	0.87	0.90	0.74	0.65
2008	0.91	0.93	0.38	0.73	0.29	-0.54	0.70	0.80	0.28	0.48
2009	0.92	0.85	0.69	0.87	0.39	0.13	0.78	0.79	0.60	0.85
2010	0.87	0.87	0.75	0.88	0.89	0.40	0.88	0.89	0.72	0.79
2011	0.89	0.92	0.24	0.73	0.84	-0.35	0.66	0.89	-0.61	-0.44
2012	0.89	0.86	0.53	0.67	0.40	-0.03	0.27	0.61	0.48	0.80
2013	0.91	0.92	0.87	0.93	0.89	0.66	0.92	0.92	0.87	0.87
2014	0.92	0.86	0.82	0.93	0.85	0.63	0.93	0.96	0.84	0.74

Durante o inverno há redução da biomassa disponível em função da menor disponibilidade de temperatura do ar, assim como pela ocorrência de eventos adversos como as geadas. Já na primavera e verão, com o aumento da temperatura do ar e maior disponibilidade de radiação solar, ocorre incremento na biomassa consequência do crescimento de gramíneas C₄ (Boldrini, 1998; Overbeck et al., 2015).

No verão podem ocorrer períodos de estiagem, causando estresse hídrico na vegetação e limitando o desenvolvimento das gramíneas. Durante o inverno, em geral a questão hídrica não é limitante ao crescimento das plantas (Ávila et al., 1996; Fontana e Berlato, 1997). O ciclo anual, para a precipitação pluvial é mais fraco em relação a temperatura do ar, no entanto, nos anos 2003, 2009 e 2012, para a maioria das tipologias campestres, foram observadas correlações entre a precipitação pluvial e o EVI (Fig. 4 e a Tabela 2). Como resultado, há uma maior variabilidade da resposta das tipologias campestres à precipitação pluvial, conforme expresso pela série temporal de EVI, quando comparada ao comportamento sazonal da temperatura do ar. Correlações elevadas encontradas entre o EVI e os dados do ERA Interim (não mostrados) sinalizam que a diferente resolução espacial dos dados (250m x ~ 25km, respectivamente) não impediu ou dificultou a análise aqui apresentada.

Tabela 2. Correlação entre a precipitação pluvial e o valor médio anual de EVI para 10 tipologias campestres do Rio Grande do Sul. Cor cinza indica correlação significativa pelo teste t de Student ($p \leq 0.05$).

Ano	CAL	CLI	CAR	CMAC	CCE	CSR	CBB	CCA	CGR	CMC
2000	-0.18	-0.08	0.05	0.16	0.40	0.39	0.19	0.24	0.20	0.11
2001	0.09	0.08	0.01	0.19	0.58	0.35	0.49	0.46	0.11	0.01
2002	-0.03	0.10	0.12	0.03	0.51	0.55	0.38	0.34	0.11	0.13
2003	0.49	0.38	0.57	0.51	0.51	0.52	0.60	0.48	0.56	0.30
2004	0.09	-0.10	-0.06	0.29	0.57	0.37	0.55	0.43	0.11	-0.05
2005	-0.21	-0.40	0.31	0.16	0.12	0.33	0.20	0.13	0.36	0.32
2006	0.41	0.02	0.15	0.29	0.43	0.25	0.38	0.40	0.12	0.06
2007	0.18	0.01	0.28	0.39	0.46	0.46	0.34	0.50	0.38	0.28
2008	0.16	-0.26	-0.21	-0.15	0.34	0.33	0.14	0.01	-0.11	0.00
2009	-0.24	-0.10	0.50	0.46	0.63	0.57	0.54	0.53	0.50	0.40
2010	0.36	0.13	0.32	0.35	0.45	0.63	0.32	0.31	0.46	0.34
2011	-0.13	-0.03	0.01	-0.05	0.12	0.26	0.14	0.01	0.26	0.17
2012	0.11	-0.10	0.42	0.43	0.51	0.38	0.56	0.52	0.39	0.37
2013	-0.12	0.04	0.30	0.30	0.52	0.38	0.37	0.45	0.23	0.22
2014	0.07	0.09	0.25	0.16	0.15	0.36	-0.23	-0.09	0.36	0.35

A relação entre a série de EVI e a precipitação pluvial para as diferentes tipologias pode ser associada a posição geográfica. Na região oeste e sudoeste do RS onde as fisionomias CCE, CSR e CCA estão distribuídas, a vegetação campestre frequentemente é submetida a déficit hídrico no verão (Berlato e Fontana, 2003). O déficit hídrico é consequência de totais de precipitação pluvial menores do que no restante do Estado e associado ao predomínio de solos rasos formados a partir de rochas eruptivas e pouco férteis (Overbeck et al., 2015), contribuindo para a variabilidade observada nos ciclos anual e interanual. Nas regiões onde períodos de estiagem podem ocorrer no verão (por exemplo, 2004 e 2012), como a nordeste e ao longo do litoral do RS (presença das tipologias CAL e CLI), baixa coerência foi observada entre o EVI e a precipitação pluvial, especialmente para o ciclo anual.

Como demonstrado em diferentes trabalhos (Fontana e Berlato, 1997; Berlato e Fontana, 2003; Jacóbsen et al., 2004; Wagner, 2013), o fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul) produz anomalias positivas (El Niño) e negativas (La Niña) de precipitação pluvial, mas também de temperatura do ar sobre a área de estudo, alterando o crescimento e a produtividade das diferentes espécies vegetais.

Nossos resultados confirmam a variabilidade das condições de precipitação pluvial sobre a área de estudo para os ciclos anual e interanual. Para o ciclo anual, períodos de estiagem podem ser um agravante de interferência e enfraquecimento do ciclo. Para o período interanual, diversos eventos de El Niño ou La Niña, embora não regular, influenciam fortemente os ciclos

sazonais (92 a 184 observações). A maioria das tipologias campestres (CAL, CAR, CMAC, CCE, CSR, CBB, CCA, CGR e CMC) foram afetadas por estes eventos e apresentaram alta coerência nos ciclos interanuais. A única tipologia campestre que não apresenta ciclo interanual bem marcado, entre o EVI e a precipitação pluvial e a temperatura do ar, é a CLI (campo litorâneo), que ocorre em uma área com precipitação pluvial bastante regular (valores médios anuais em torno de 1.200 mm, de acordo com Brito *et al.*, 2008).

Embora a temperatura do ar tenha demonstrado alta correlação com o EVI no ciclo anual, foram as anomalias de precipitação pluvial, que durante eventos de El Niño (2002-2003, 2004-2005, 2006-2007 e 2009-2010 – representado por *EN* na Fig. 4) e La Niña (2000-2001, 2007-2008, 2010-2011 e 2011-2012 – representado por *LN* na Fig. 4) (CPC/NOAA, 2016) apresentaram alta coerência para a maioria das tipologias campestres: CCE, CSR, CAR, CBB, CCA, CGR, CMAC e CMC (Fig. 2). Também, destaca-se que mesmo em anos considerados neutros (sem ocorrência de eventos El Niño e La Niña), mas com ocorrência de precipitação pluvial acima da normal climatológica, especialmente em 2014 (DISME/INMET e CPPMet/UFPel, 2014), resultou em alta correlação com o EVI.

5. Conclusões

A abordagem ondaleta é adequada para revelar alguns padrões fenológicos da vegetação campestre como os apresentados pela série temporal de EVI, assim como, a resposta dos campos à alta variabilidade climática da área de estudo, onde predomina o clima subtropical úmido.

A abordagem mostrou que a influência de fatores abióticos sobre a fenologia da vegetação campestre, expressa pelo EVI, é espacialmente dependente e fortemente relacionada as condições meteorológicas, principalmente relacionada à temperatura do ar, que determina o padrão fenológico da vegetação e à precipitação pluvial, que influencia na variabilidade de crescimento e desenvolvimento da vegetação, especialmente nas estações quentes.

A fenologia campestre apresenta ciclo anual com início e fim da estação de crescimento determinada pelas condições térmicas (temperatura do ar), mas alterado pela disponibilidade de água. A relação entre a temperatura do ar e o vigor vegetativo possui forte correlação e determina o início e fim da estação de crescimento (primavera e verão). A precipitação pluvial, no entanto, influencia o crescimento e desenvolvimento dos campos, especialmente durante períodos de estiagem.

A correlação entre o EVI e a temperatura do ar é mais forte no ciclo anual para a maioria das tipologias campestres. No entanto, para o ciclo interanual, eventos de El Niño e La Niña determinaram forte correlação entre os dados de EVI e a precipitação pluvial.

Estudos futuros, com foco na quantificação de diferenças na dinâmica fenológica da vegetação campestre poderão contribuir para um melhor entendimento dos efeitos das mudanças climáticas e a criação de ações de conservação da biodiversidade e melhoramento do manejo pecuário sobre os campos.

Agradecimento

A autora agradece a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de Doutorado.

Referências

- Aber, J.D., Melillo, J.M., 2001. Terrestrial ecosystems. Academic Press: San Diego.
- Alcântara, E.H., 2010. Sensoriamento remoto da temperatura e dos fluxos de calor na superfície da água do reservatório de Itumbiara (GO), PhD Thesis, 164pp. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, Brasil.
- Ávila, A.M.H., Berlato, M., Silva, J., Fontana, D.C., 1996. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Gaúcha. 2, 149-154.
- Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., Rosnay, P., Stockdale, T., Vitart, F., 2015. ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. Hydrology and Earth System Sciences. 19, 389-407. doi: 10.5194/hess-19-389-2015
- Berlato, M.A., Fontana, D.C., 2003. El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre.
- Boldrini, I.I., 1997. Campos do Rio Grande do Sul: caracterização fisionômica e problemática ocupacional. Boletim do Instituto de Biociências. 56, 1-39.
- Boldrini, I.I., 2009. A flora dos campos do Rio Grande do Sul, in: Pillar, V.P. (Ed.), Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade. MMA, Brasília, Brasil, pp. 63-77.

- Boldrini, I.I., Longhi-Wagner, H.M., 2011. Poaceae no Rio Grande do Sul: diversidade, importância na fisionomia e conservação. *Ciência & Ambiente*. 42, 71-92.
- Boldrini, I.I., Overbeck, G., Trevisan, R., 2015. Biodiversidade de plantas, in: Pillar, V.P., Lange, O. (Eds.), *Os Campos do Sul. Rede Campos Sulinos*, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, pp. 51-56.
- Brito, F.B., Barletta, R., Mendonça, M., 2008. Variabilidade Espacial e Temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*. 3, 37–48. doi: 10.5380/abclima.v3i0.25408
- Bruce, L.M., Mathur, A., Byrd, J.D., 2006. Denoising and Wavelet-Based Feature Extraction of MODIS Multi-Temporal Vegetation Signatures. *GIScience & Remote Sensing*. 43, 170-180. doi: 10.2747/1548-1603.43.1.67
- Burkart. A., 1975. Evolution of grasses and grasslands in South America. *Taxon*. 24, 53-66.
- Carl, G., Doktor, D., Koslowsky, D., Kühn, I., 2012. Phase difference analysis of temperature and vegetation phenology for beech forest: a wavelet approach. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 27, 1221–1230. doi: 10.1007/s00477-012-0658-x
- Chen, J., Jonsson, P., Tamura, M., Gu, Z.H., Matsushita, B., Eklundh, L., 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*. 91, 332-344. doi: 10.1016/j.rse.2004.03.014
- Climate Prediction Center (CPC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 2016. Southern Oscillation Index (SOI) - Data. <http://www.cpc.noaa.gov/data/indices/soi/> (accessed 16.11.10).
- Daubechies, I., 1992. Ten Lectures on Wavelets - The Continuous Wavelet Transform. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. 61, 17–52. doi: 10.1137/1.9781611970104
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., Van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kallberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of

the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 137, 553-597. doi: 10.1002/qj.828

Distrito de Meteorologia (DISME), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas (CPPMet), Universidade Federal de Pelotas (UFPel). 2004; 2012; 2014. Boletim Climático. <http://www.inmet.gov.br/clima/boletimRioGrandeDoSul/> (Acesso 18.04.20).

Efron, B., 1979. Bootstrap methods: another look at the Jackknife. *Annals of Statistics*. 7, 1-26.

Fontana, D.C., Berlato, M.A., 1997. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 5, 127-132.

Fontana, D.C., Almeida, T.S., Jacobsen, L.O., 2007. Caracterização da dinâmica temporal dos Campos do Rio Grande do Sul por meio de imagens AVHRR/NOAA. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 15, 69–83.

Furon, A.C., Riddle, C.W., Smith, R., Warland, J.S., 2008. Wavelets analysis of wintertime and spring thaw CO₂ and N₂O fluxes from agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*. 48, 305-317. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.03.006

Gao, X., Huete, A.R., Ni, W., Miura, T., 2000. Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. *Remote Sensing of Environment*. 74, 609-620. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00150-4

Hasenack, H., Weber, E., Boldrini, I.I., Trevisan, R., 2010. Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das savanas uruguaias em escala 1:500.000 ou superior e relatório técnico descrevendo insumos utilizados e metodologia de elaboração do mapa de sistemas ecológicos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Ecologia, The Nature Conservancy, Rio Grande do Sul.

Hmimina, G., Dufrene, E., Pontailier, J.Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., Grandcourt, A., Burban, B., Flechard, C., Granier, A., Gross, P., Heinesch, B., Longdoz, B., Moureaux, C., Ourcival, J.M., Rambal, S., Saint Andre, L., Soudani, K., 2013. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*. 132, 145-158. doi: 10.1016/j.rse.2013.01.010

- Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83, 195-213. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2
- Huete, A.R., Justice, C., Liu, H., 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS – EOS. *Remote Sensing of Environment*. 49, 224-234. doi: 10.1016/0034-4257(94)90018-3
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., Wolf, D.B., 2007. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*. 8, 38-55. doi: 10.1175/JHM560.1
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2013. Malha Digital. <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referencias/bases-cartograficas/malhas-digitais.html/> (Acesso 14.12.12).
- Jacóbsen, L.O., Fontana, D.C., Shimabukuro, Y.E., 2004. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 19, 129-140.
- Jin, Y., Yang, X., Qiu, J., Li, J., Gao, T., Wu, Q., Zhao, F., Ma, H., Yu, H., Xu, B., 2014. Remote Sensing-Based Biomass Estimation and Its Spatio-Temporal Variations in Temperate Grassland, Northern China. *Remote Sensing*. 6, 1496–1513. doi: 10.3390/rs6021496
- Jönsson, P., Eklundh, L., 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 40, 1824-1832. doi: 10.1109/TGRS.2002.802519
- Jönsson, P., Eklundh, L., 2004. TIMESAT - A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*. 30, 833–845. doi: 10.1016/j.cageo.2004.05.006
- Justice, C.O., Vermote, E.F., Townshend, J.R.G., Defries, R., Roy, P.D., Hall, D.K., Salomonson, V., Privette, J.L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Mynemi, B., Nnyazikhin, Y., Running, W.S., Nemani, R.R., Wan, Z., Huete, A.R., Leeuwen, W.V., Wolfe, R.E., Giglio, L., Muller, J.P., Lewis, P., Barnsley, M., 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 36, 1228-1249. doi: 10.1109/36.701075
- Köppen, W., 1931. *Climatologia*. Fundo de Cultura Econômica, México.

- Kuplich, T.M., Moreira, A., Fontana, D.C., 2013. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 10, 1116-1123. doi: 10.1590/S1415-43662013001000014
- Li, Z., Kafatos, M., 2000. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*. 71, 239-247. doi: 10.1016/S0034-4257(99)00034-6
- Mallat, S., 2009. *A wavelet tour of signal processing: the sparse way*. Academic Press, Elsevier, Burlington, MA, USA
- Martínez, B., Gilabert, M.A., 2009. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *International Journal of Remote Sensing*. 113, 1823-1842. doi: 10.1016/j.rse.2009.04.016
- Menzel, A., Estrella, N., Peter, F., 2001. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology*. 7, 657-666.
- Moreira, A., Fontana, D.C., Kuplich, T.M., 2015. Aplicação de ondaleta em série temporal NDVI/MODIS para avaliação da fenologia de fisionomias campestres no Rio Grande do Sul. In XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, PB 25 Apr. - 29 Apr. 2015. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, Brasil.
- Nimer, E., 1990. Clima, in: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Ed.), *Geografia do Brasil: Região Sul*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 151-187.
- Oliveira, H.M.de., 2007. *Análise de Fourier e Wavelets: sinais estacionários e não estacionários*. Editora Universitária, Recife, Brasil.
- Overbeck, G.E., Boldrini, I.I., Carmo, M.R.B., Garcia, E.N., Moro, R.S., Pinto, C.E., Trevisan, R., Zannin, A., 2015. Fisionomia dos Campos, in: Pillar, V.P., Lange, O. (Eds.), *Os Campos do Sul*. Rede Campos Sulinos: UFRGS, Porto Alegre, Brasil, pp. 31-39.
- Overbeck, G.E., Müller, S., Fidelis, A., Pfadenhauer, J., Pillar, V.P., Blanco, C.C., Boldrini, I.I., Both, R., Forneck, E., 2007. Brazil's neglected biome: The South Brazilian Campos. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 9, 101-116. doi: 10.1016/j.ppees.2007.07.005
- Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G., Sala, O.E., 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*. 4, 683-698. doi: 10.1007/s10021-001-0037-9

- Percival, D.B., Wang, M., Overland, J.E., 2004. An introduction to wavelet analysis with application to vegetation time series. *Community Ecology*. 5, 19–30. doi: 10.1556/ComEc.5.2004.1.3
- Piao, Y., Yan, B., Guot, S., Guant, Y., Li, J., Cai, D. 2012. Change detection of MODIS Time Series using a Wavelet Transform. *ICSAI - International Conference on Systems and Informatics*. 1, 2093-2097. doi: 10.1109/ICSAI.2012.6223465
- Porto, M.L., Pillar, V.D., 2002. Os campos sulinos: sustentabilidade e manejo. *Ciência & Ambiente*. 24, 119–138.
- Quadros, F.L.F., Pillar, V.D., 2002. Transições floresta-campo no Rio Grande do Sul. *Ciência & Ambiente*. 24, 109-118.
- Rosembach, R., Ferreira, N.J., Shimabukuro, Y.E., Conforte, J.C., 2009. Análise de ondaletas aplicada a dados multitemporais de NDVI/MODIS. *Geografia*. 34, 559-575.
- Santos, C.A.G., Freire, P.K.M.M., Torrence, C., 2013. A transformada wavelet e sua aplicação na análise de séries hidrológicas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 18, 271-280. doi: 10.21168/rbrh.v18n3.p271-280
- Soudani, K., Hmimina, G., Delpierre, N., Pontailier, J.Y., Aubinet, M., Bonal, D., Caquet, B., Grandcourt, A., Burban, B., Flechard, C., Guyon, D., Granier, A., Gross, P., Heinesh, B., Longdoz, B., Loustau, D., Moureaux, C., Ourcival, J.M., Rambal, S., Saint André, L., Dufrêne, E., 2012. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. *Remote Sensing of Environment*. 123, 234-245. doi: 10.1016/j.rse.2012.03.012
- Tan, B., Morisette, J.T., Wolfe, R.E., Gao, F., Ederer, G.A., Nightingale, J., Pedelty, J.A., 2011. An Enhanced TIMESAT Algorithm for estimating vegetation phenology metrics from MODIS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 4, 361-371. doi: 10.1109/JSTARS.2010.2075916
- Tiedemann, J.L., 2011. Fenología del bosque de las subregiones naturales: Chaco Semiárido y Chaco Serrano, de Santiago del Estero, Argentina. *Ecología Aplicada*. 2, 51-59. doi: 10.21704/rea.v10i1-2.413
- Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 79, 61-78. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

Torrence, C., Webster, P.J., 1999. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system. *American Meteorological Society*. 12, 2679-2690. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2

Trentin, C.B., 2011. Análise da resposta espectral da vegetação da área de proteção ambiental (APA) do Ibirapuitã em imagens do sensor EOS/MODIS associadas ao solo e aos elementos do clima. Dissertação de Mestrado, 73pp. UFRGS: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Wagner, A.P., 2013. Dinâmica temporal de Índices de Vegetação no Pampa do Rio Grande do Sul e Uruguai e suas relações com os elementos meteorológicos regionais. Tese de Doutorado, 160pp. UFRGS: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Wagner, A.P., Fontana, D.C., Fraise, C., Weber, E., Hasenack, H., 2013. Temporal trends of vegetation indices on Pampa grasslands in Brasil and Uruguay. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 48, 1192–1200. doi: 10.1590/S0100-204X2013000900002

Wang, Q., Tenhunen, J.D., 2004. Vegetation mapping with Multitemporal NDVI in North Eastern China Transect (NECT). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 6, 17-31. doi: 10.1016/j.jag.2004.07.0

2.3 ARTIGO 3 - Seasonal dynamics of vegetation indices as the criterion of grouping of grassland typologies

Submetido para a revista Scientia Agricola

Decision Letter (SA-2017-0173.R2)

From: naumannHD@missouri.edu

To: andreisem@gmail.com

Subject: Scientia Agricola - Decision on Manuscript ID SA-2017-0173

Body: September 21, 2017

Dear Ms. Moreira:

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "Seasonal dynamics of vegetation indices as the criterion of grouping of grassland typologies" in its current form for publication in the Scientia Agricola.

Thank you for your fine contribution. On behalf of the Editors of the Scientia Agricola, we look forward to your continued contributions to the Journal.

Sincerely,
Dr. Harley Naumann
Associate Editor, Scientia Agricola
naumannHD@missouri.edu

SA-2017-0173

Running title: Seasonal dynamics of grassland

Manuscript category: Animal Science and Pastures

Seasonal dynamics of vegetation indices as the criterion of grouping of grassland typologies

Andreise Moreira^{1*}, Carolina Bremm², Denise Cybis Fontana¹, Tatiana Mora Kuplich³

¹Federal University of Rio Grande do Sul, State Center for Remote Sensing and Meteorology Research, Graduate Program in Remote Sensing, Av. Bento Gonçalves, 9500 – 91501-970 – Porto Alegre, RS – Brazil.

²Agricultural and Livestock Research Foundation, R. Gonçalves Dias, 570 – 90130-060 – Porto Alegre, RS – Brazil.

³National Institute for Space Research/Southern Regional Space Research Center, C.P. 5021 – 97105-970 – Santa Maria, RS – Brazil.

*Corresponding author <andreisem@gmail.com>

Edited by: Harley D. Naumann

Received May 13, 2017

Accepted September 21, 2017

ABSTRACT: This study aimed to characterize the average seasonal pattern of the vegetation in southern grassland in Brazil, and their variability from time series of vegetation indices. It also sought to identify similarities in the seasonal pattern of different grassland typologies. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI) images from Feb to Dec, 2000 to 2014, were analyzed for 10 regions. The grassland typologies studied showed EVI and NDVI profiles consistent with the seasonal dynamics of grassland vegetation under the influence of a subtropical climate, with highest values in the indices during the warm seasons of the year (spring and summer) and lowest in the colder seasons (autumn and winter). Considering the values of EVI and NDVI, grassland typologies were allocated to four groups with similar temporal profiles. Among the groups formed from the EVI index it is possible to identify differences between grassland typologies during the autumn and winter, while the NDVI showed differences only in winter as compared to the other seasons.

Keywords: MODIS, EVI, NDVI, phenology, grassland vegetation

Introduction

Characterized by the occurrence of repetitive biological events and its relationship to variations in abiotic and biotic environments (Lieth, 1974; Vanschaik et al., 1993), the phenology is used as an ecological parameter for monitoring the growing season (seasonal) of plants and reflects the relationship of plant growth to the environment (Zhang et al., 2003). The monitoring of the season, which includes the periods of growth and senescence, can be performed through temporal series of spectral vegetation indices obtained by orbital sensors, such as the EVI (Enhanced Vegetation Index) and the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) MODIS (Huete et al., 2002; Zhang et al., 2003; Soudani et al., 2012). The analysis of time series of vegetation indices (VI's) make it possible to continuously monitor the dynamic processes of various terrestrial ecosystems and their relationships with different components of the geographical environment, such as climate, soil, and topography, at different scales, from regional to global (Tan et al., 2011).

Grassland vegetation consists of dominant ecosystems in many countries and it is paramount to preserve water resources and carbon accumulation in the soil. It also serves as fodder source for pastoral activity and offers scenic attractions with major tourism potential, among other environmental services (Pillar et al., 2012). In Brazil, about 75 % of the grassland vegetation can be found in the state of Rio Grande do Sul, in the Pampa and Atlantic Forest

biomes, known as Southern Grassland. Its conservation rates, however, are very low. It is estimated that 54 % of the original grassland vegetation has been converted to agriculture, forestry, or urbanization, and only 0.33 % of the grasslands are currently protected in conservation units (Overbeck et al., 2007; Overbeck et al., 2013).

These data indicate the importance of monitoring the remaining areas, which can be accomplished with the use of spectral vegetation index data. Researches have already addressed the spatio-temporal dynamic of the southern grassland vegetation and its relationship to climate variability (Scottá and Fonseca, 2015; Junges et al., 2016). However, there is a lack of research aimed at identifying and characterizing patterns of seasonal variation in southern grasslands of Brazil. In this context, the research aimed to characterize the average seasonal pattern of the vegetation in southern grassland in Brazil, and its variability from time series of vegetation indices; It also sought to identify similarities in the seasonal pattern of different grassland typologies.

Materials and Methods

Study area

The research included 10 physiognomic regions with predominance of grassland vegetation in the state of Rio Grande do Sul (RS), which has a land area of 281,748 square kilometers, located in the extreme south of Brazil, between latitudes 27°05' and 33°45' S and longitudes 49°43' and 57°39' W and maximum altitude around 1400 m.

The grassland typologies of the southern grassland result from the combination of geographical factors, such as relief, heterogeneity of soils, distribution of rainfall, and air temperature, which associated with the floristic variation made it possible to classify the grassland vegetation in 10 homogeneous regions (Figure 1). These regions were selected for sample collection.

The southern grasslands are developed under the influence of temperate climate "C", humid type "Cf" with the varieties "Cfa" and "Cfb", subtropical and temperate, respectively, according to the Köppen classification system (Alvares et al., 2013). Regarding rainfall, it is well distributed throughout the year, without a dry season. Total annual precipitation is 1,455 mm - monthly totals are between 102 mm (Mar) and 154 mm (June). Average monthly temperatures vary from 13 °C (July) to 24 °C (Jan) (Junges et al., 2016).

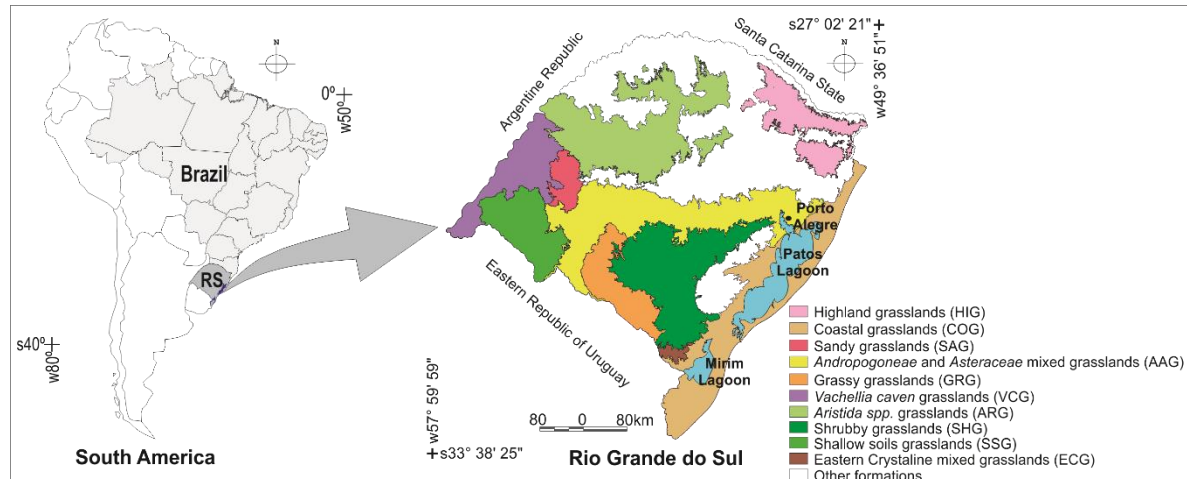


Figure 1 – Grassland typologies in the study area of Rio Grande do Sul state, Southern Brazil; Source: Adapted from Hasenack et al. (2010).

It is estimated that the floristic composition has around 2,600 species of plants (Overbeck et al., 2007), which presents a diverse flora and consists of several species of grasses, *Asteraceae*, *Cyperaceae* and leguminous plants (Hasenack et al., 2010) with high degree of endemism that is due to the influence of both tropical floras of Central Brazil and temperate floras from South America (Pillar et al., 2012). Such characteristics make it possible to find the coexistence of C_3 and C_4 species in the same southern grasslands environment, stressing the importance of conserving this ecosystem (Boldrini et al., 2015).

Seasonal pattern of the grassland vegetation

To assess the seasonal dynamics of the 10 grassland typologies, images of maximum value composition were used every 16 days from two spectral indices, the EVI and the NDVI, obtained by MODIS sensor, MOD13Q1 product, 5 collections, with spatial resolution of 250 m. A total of 342 images were collected from Feb 2000 to Dec 2014. The values of EVI and NDVI were obtained from 20 sample polygons for each grassland vegetation typology of RS. With the objective of characterizing the grassland vegetation for each typology, the sample areas represented by polygons were collected based on a classification mask of use and land cover (Hasenack et al., 2010), considering only the grassland class and with a minimum of 1 km² area. Following these requirements, the distribution of the polygons used sought to cover the entire perimeter of the typology and to avoid concentrating sample collection. Because the sample polygons were defined based on a classification mask of use and land cover elaborated from Landsat images, with 30 m spatial resolution, and considering only the grassland class, it

was possible to have a larger control so that the samples had no influence from other types of cover.

The average value extracted from the 20 polygons was attributed to each of the 10 typologies (Figure 1). The number of pixels considered for each typology ranged between 2462-4284 pixels. This number proved to be sufficient for the preparation of the analysis, and the sample adequacy was assessed by the *bootstrap* method (Efron, 1979), considering 1,000 iterations and 5 % level of significance ($p \leq 0.05$), which was determined to be a minimum of 1,500 pixels per typology.

The Savitzky-Golay filter, from the TIMESAT program (Jönsson and Eklundh, 2004), was used to smooth the noise mainly caused by clouds, atmospheric variability and/or angular variations (Chen et al., 2004) present in the time series of EVI and NDVI/MODIS images.

To characterize the seasonal variation of the vegetation, four polynomial models (linear, quadratic, cubic and quartic) between the average values of EVI and NDVI of grassland typologies and the days of the year were tested. The years 2000-2014 were used as a measure of variability for adjustment of the models. Significant models in the 5 % level of significance were compared by statistical criteria (R^2 , Bias-corrected Akaike Information Criterion (AICc) and Bayesian Information Criterion (BIC)) for selecting the best model adjusted for each grassland typology. Analyses were performed using the SAS statistical software (v. 9.4).

The Ward's method (Ward Jr., 1963) was applied to the cluster analysis to verify the similarities between the 10 grassland typologies and the seasonal patterns of EVI and NDVI and then characterize them in homogeneous groups. The statistical program JMP (v. 12) was used for the Cluster analysis.

Finally, the data of EVI and NDVI of the groups formed for the grassland typologies were subjected to analysis of variance in the 5 % level of significance, to compare the temporal dynamics of the grassland vegetation between the seasons of the year. The group of effects, the season and their interaction were included in the model. The averages were compared using Tukey's test ($p \leq 0.05$). For this analysis, the statistical program JMP (v. 12) was used.

Results and Discussion

The analysis of the seasonal average variation of EVI and NDVI of the 10 grassland typologies showed two distinct patterns (Figure 2 and 3), namely: (A) increase in EVI and NDVI values during the warm seasons (spring and summer) and decrease in colder seasons

(autumn and winter), (B) increase in values during the warm seasons (spring and summer), but decreased values of EVI and NDVI for late spring and early summer.

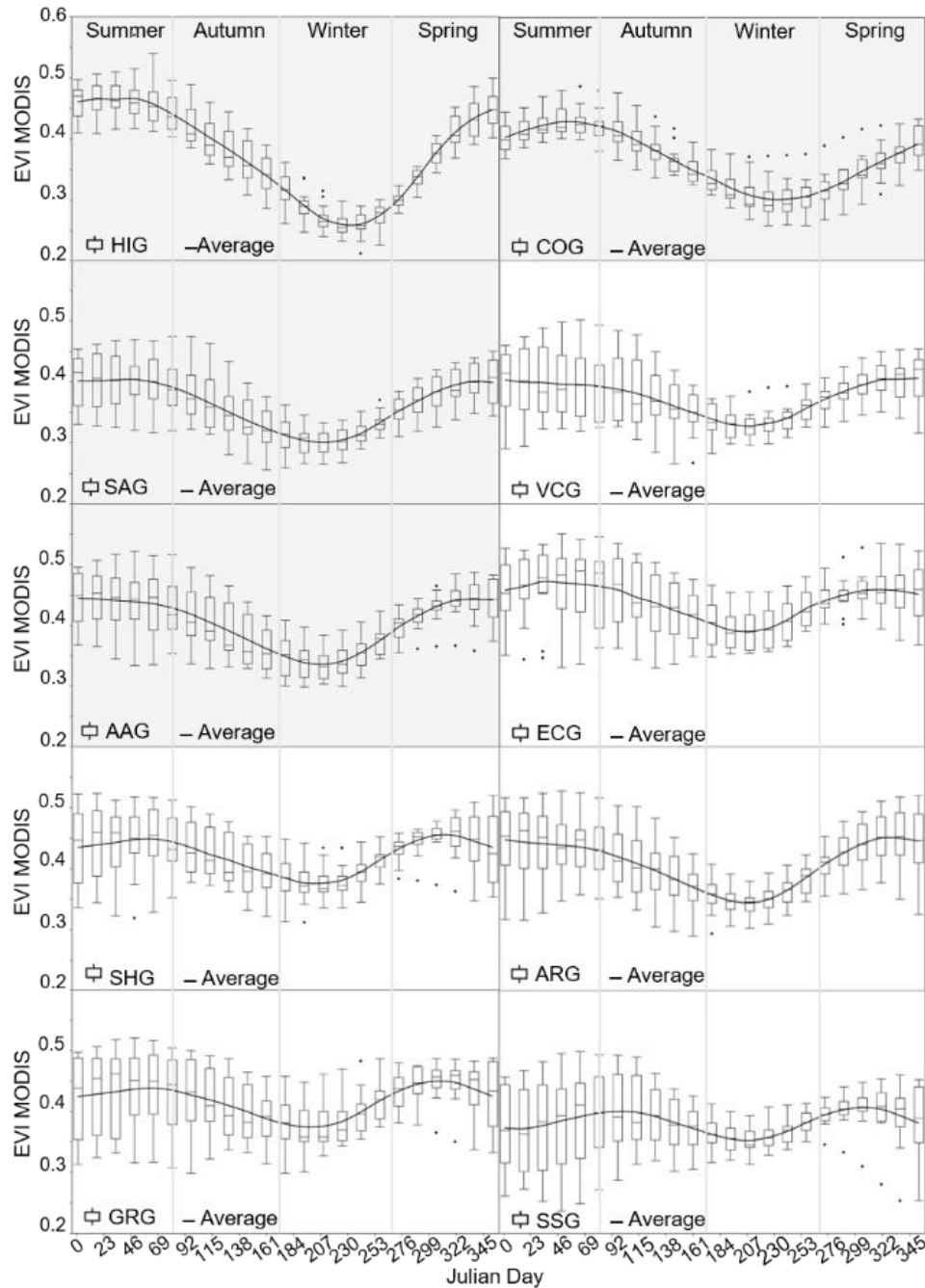


Figure 2 – Average values of EVI/MODIS of grassland typologies in RS (Phenological pattern A - color gray: Highland grasslands (HIG), Coastal grasslands (COG), Sandy grasslands (SAG), *Andropogonean* and *Asteraceae mixed* grasslands (AAG). Phenological pattern B: *Vachellia caven* grasslands (VCG), *Eastern crystalline mixed* grasslands (ECG), Shrubby grasslands (SHG), *Aristida* spp. grasslands (ARG), Grassy grasslands (GRG) and Shallow soils grasslands (SSG)) for the 2000-2014 period.

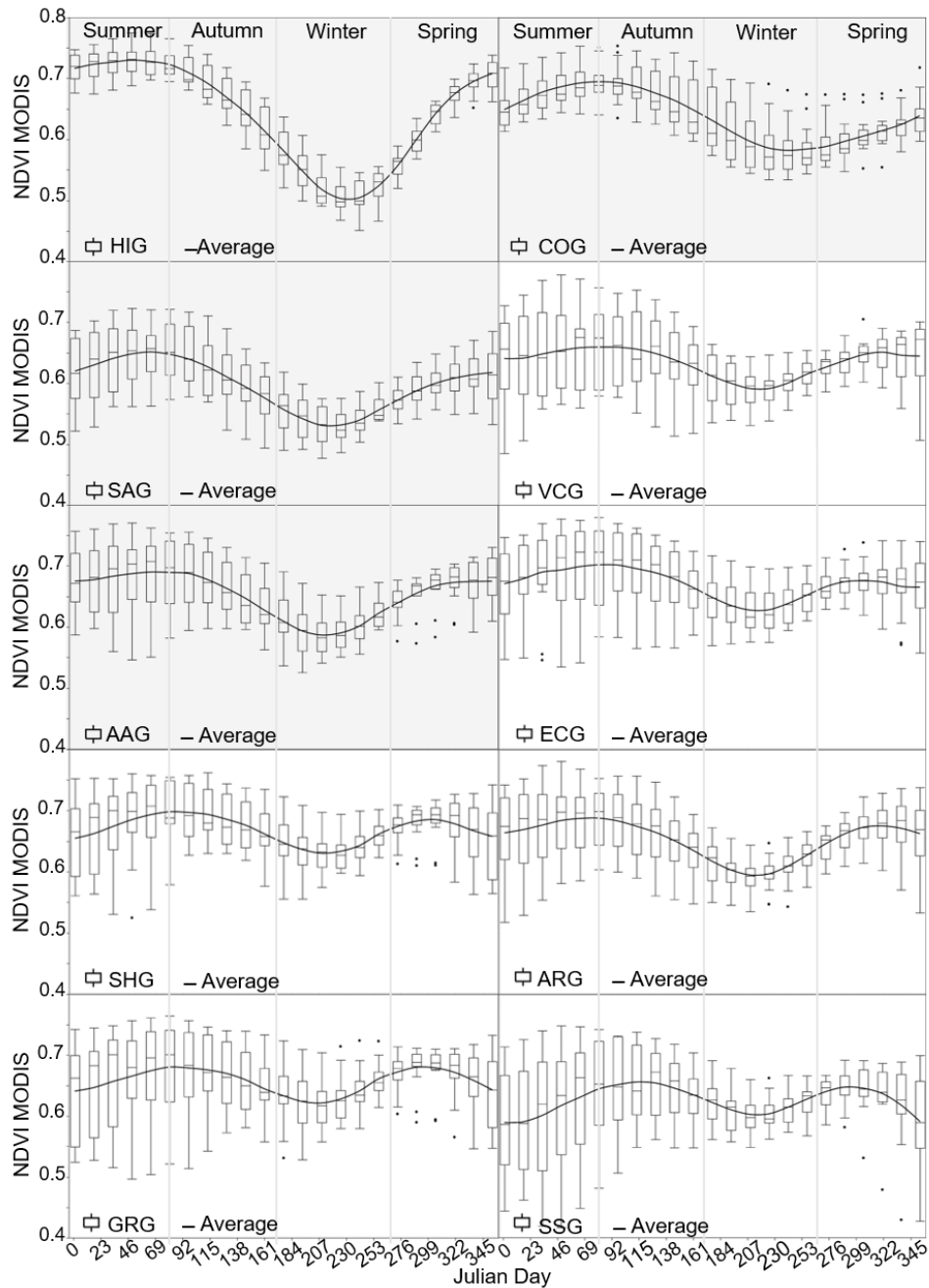


Figure 3 – Average values of NDVI/MODIS of grassland typologies in RS (Phenological pattern A - color gray: Highland grasslands (HIG), Coastal grasslands (COG), Sandy grasslands (SAG), *Andropogonean* and *Asteraceae mixed* grasslands (AAG). Phenological pattern B: *Vachellia caven* grasslands (VCG), *Eastern crystalline mixed* grasslands (ECG), Shrubby grasslands (SHG), *Aristida* spp. grasslands (ARG), Grassy grasslands (GRG) and Shallow soils grasslands (SSG)) for the 2000-2014 period.

For the grassland typologies, highland grasslands (HIG), coastal grasslands (COG), sandy grasslands (SAG) and *Andropogonean* and *Asteraceae mixed* grasslands (AAG) the

seasonal pattern (A) was observed, with an increase in values during the warm seasons of the year (spring and summer) and decrease in colder seasons (autumn and winter). From these grassland typologies, the characteristic temporal profile of the HIG typology stands out, where the grasslands are developed on basaltic soils, interspersed with forests, especially the Forest of Araucaria (*Araucaria Angustifolia*) and peat bogs (Overbeck et al., 2015). Plants that grow forming clumps are predominant in these grasslands, with dominance of standing tussock species and summer cycle, which demonstrates further development during the spring and summer. In autumn and winter, low temperatures reduce grassland growth and infer on the grassland a yellowish tinge, which is the consequence of frequent winter frosts (Pillar et al., 2012; Boldrini et al., 2015). In this season, the lowest values of EVI and NDVI were observed for the HIG typology, which also requires more time to resume the increase in the values of vegetation indices from the spring.

The coastal grasslands (COG) have a standard similar to the lime, but with EVI and NDVI values that denote less seasonal variation. These grasslands are developed on sandy soils, mostly with low water retention. The vegetation near the coast consists mostly of prostrate, rhizomatous or stoloniferous species. Toward the mainland, where there is an accumulation of organic matter in the soil and better drainage, it is also possible to find leguminous plants (Pillar et al., 2012; Overbeck et al., 2015).

The grassland typologies with pattern (A) showed less variability in index values (visible in the smaller boxplots). The greater variability occurred in the late spring, during the summer and autumn, and especially for the SAG and AAG typologies. The SAG, located in the central-western portion of RS, develops on sandy soils subject to erosion and formation of sandbanks (Overbeck et al., 2015). When the vegetation is removed by erosion caused by water or wind, sandbanks are formed. Thus, the vegetation that develops on this substrate is important for setting the sandy soil and for an underground structure also capable to withstand water stress, which occurs mainly during the summer (Pillar et al., 2012). In general, the vegetation cover is low, prevailing grasses with rhizomes and there is a high diversity of *Asteraceae* species (Overbeck et al., 2015).

On the other hand, the AAG typology, located in the center of RS, develops on different types of soil and vegetation and is characterized by the presence of two layers, the lower, dominated by rhizomatous grasses, and the highest, composed of clumps of tussock grass (Overbeck et al., 2015). Thus, the high variability in the EVI and NDVI values during the summer, observed in the SAG and AAG typologies are possibly associated with floristic

characteristics of the vegetation that need to adapt to the occurrence of water stress and also to the high temperatures during this season.

The other grassland typologies, shrubby grasslands (SHG), *Aristida* spp. grasslands (ARG), *Vachellia caven* grasslands (VCG), grassy grasslands (GRG), *Eastern crystalline mixed* grasslands (ECG) and shallow soils grasslands (SSG) are prevalent in a region called Pampa and demonstrate seasonal pattern (B), with increases in values during the warm seasons (spring and summer), but with a slight decrease in the EVI and NDVI values during the late spring and early summer (Figure 2 and 3). The highest variability was also observed in this period and extended until the autumn. This can be associated with the floristic and soil characteristics that predominate in the south, southwest and northwest parts of the state. The grassland typologies are formed by different floristic compositions, mainly influenced by geomorphological and climate characteristics, associated with land use and management (Overbeck et al., 2015).

In the southern half of RS, in the Pampas region, the grasslands are developed on two types of soil: shallow and deep. The shallow soils, found mainly in the west and southwest of the state, are formed from volcanic rocks and the grassland vegetation is often subjected to water deficit during summer. The ARG, VCG and SSG typologies predominate in this region, where it is possible to find many endemic grasses that are characteristically erect, which leaves much soil and rock exposed. Due to the soil conditions, the native vegetation has experienced little transformation for other uses (Pillar et al., 2012).

In the southeastern part of RS, the deep and fertile soils are predominant. Due to this fact, part of the original grassland vegetation is being converted into soybean, corn and rice crop areas. Thus, the remaining grassland vegetation, characterized by the SHG, ECG and GRG typologies, mainly develops on shallow and stony soils. In this region, as a result of low temperatures in winter, there is a high presence of hibernate grasses (Overbeck et al., 2015). Erect tussock species are common, while leguminous and shrubby vegetation are found next to the roads. The region also has many endemic cacti (Boldrini et al., 2015).

Another peculiarity of this region is the joint presence of temperate, subtropical and tropical climate characteristics, as well as C₃ and C₄ species with different efficiencies in production of biomass. Due to a predominance of subtropical climate in the state, there is a greater occurrence of grasses with C₃ photosynthetic metabolism, which are most productive during colder seasons, from autumn until early spring (Overbeck et al., 2015; Boldrini et al., 2015).

With the increase in air temperature and greater incidence of solar radiation during the spring and summer, the C₄ grasses flourish, changing the appearance of the vegetation and

contributing to the increase in the values of EVI and NDVI. The diversity of the C₃ species likely contributed to the seasonal pattern B in the typology of southeastern Pampa (SHG, ECG and GRG typologies).

In the east-west direction of RS, there is also a reduction in the average values of rainfall and increased drought periods in the summer, dominated by species adapted to these conditions (Overbeck et al., 2015). This factor also contributes to the reduction in EVI and NDVI values observed during the late spring and early summer. Still, the reduction in EVI and NDVI values during the colder seasons (autumn and winter) have lower values than the HIG, COG and SAG typologies. This characteristic is determined by the greater capacity of the species that make up the SHG, ARG, VCG, GRG, ECG and SSG typologies to withstand low temperatures and less sunlight during the winter period, which is characteristic of C₃ species.

A time series cluster analysis was used to identify relatedness of grassland typologies according to seasonal patterns identified from the EVI and NDVI (Figure 4). The grassland typologies, HIG and COG (Group 1) and SHG, GRG and ECG (Group 3), for both indices, formed similar groups both in the average seasonal profile and proximity in spatial distribution (Figure 5A and C and Figure 6A and C), which is a consequence of the similarities in soil type, climate and composition of plant species, among others.

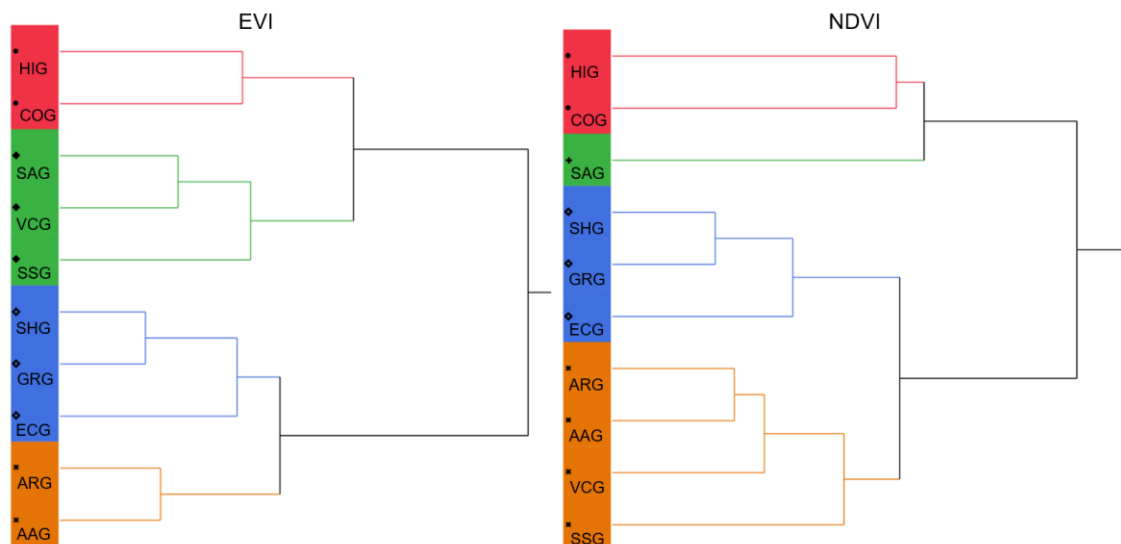


Figure 4 – Cluster analysis for EVI and NDVI indices/MODIS of the grassland typologies of RS: Highland grasslands (HIG), Coastal grasslands (COG), Sandy grasslands (SAG), *Andropogonean* and *Asteraceae mixed* grasslands (AAG), *Vachellia caven* grasslands (VCG), *Eastern crystalline mixed* grasslands (ECG), Shrubby grasslands (SHG), *Aristida* spp. grasslands (ARG), Grassy grasslands (GRG) and Shallow soils grasslands (SSG) for the period 2000-2014.

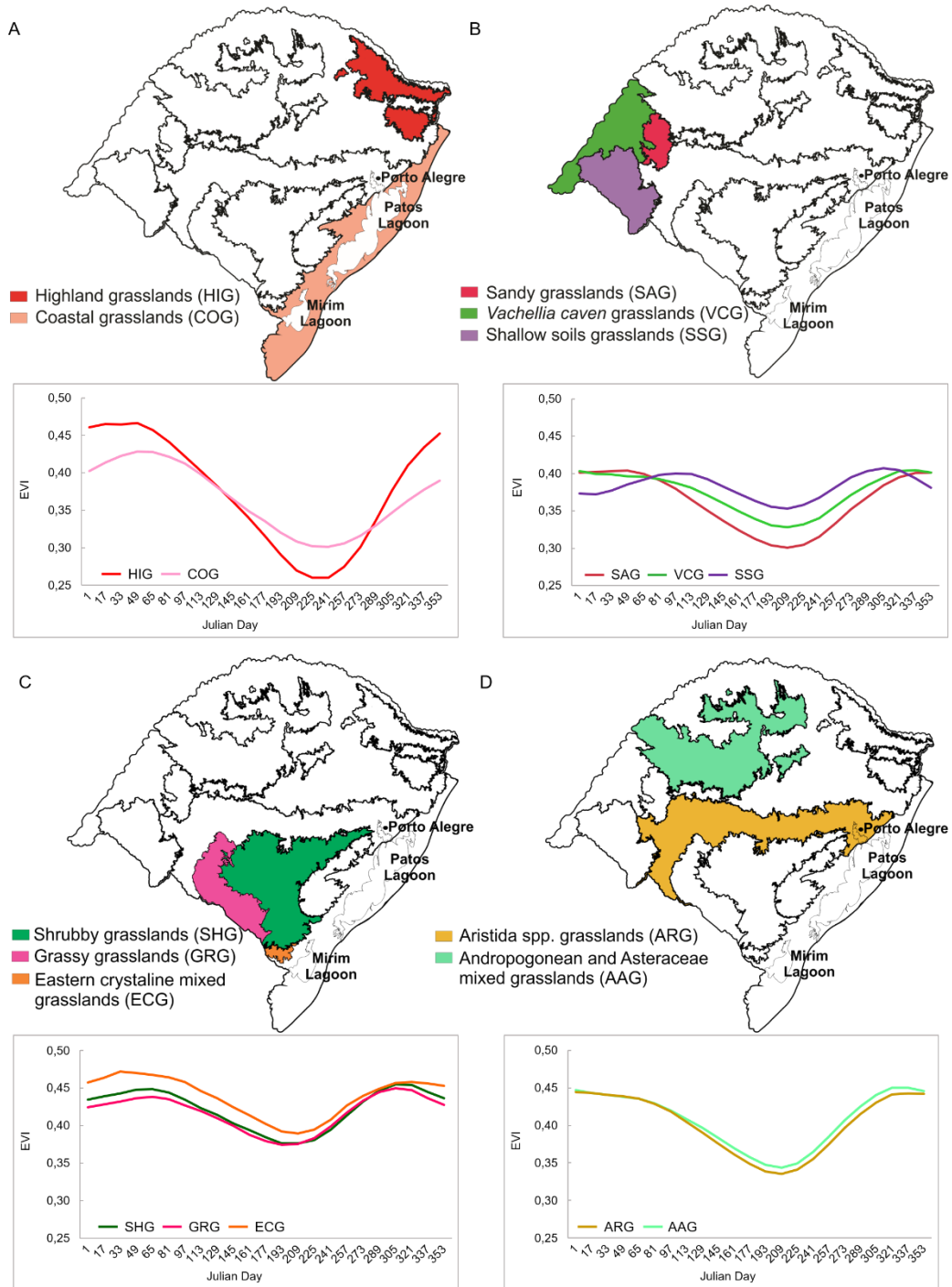


Figure 5 – Average values and spatial distribution of the EVI groups (A, B, C and D) to grassland typologies in RS, 2000-2014 period.

Between the EVI and NDVI indices, distinct clusters for the remaining grassland typologies were identified. For the EVI index, the Group 2 is formed by the SAG, VCG and SSG typologies and Group 4 by ARG and AAG typologies (Figure 5B and D). As for the NDVI index, the SAG typology differs from others (Figure 6B) and Group 4 is formed by the ARG,

AAG, VCG and SSG typologies (Figure 6D). This difference in the groups can be associated with the ability of spectral indices to detect differences in the spectral pattern of the targets.

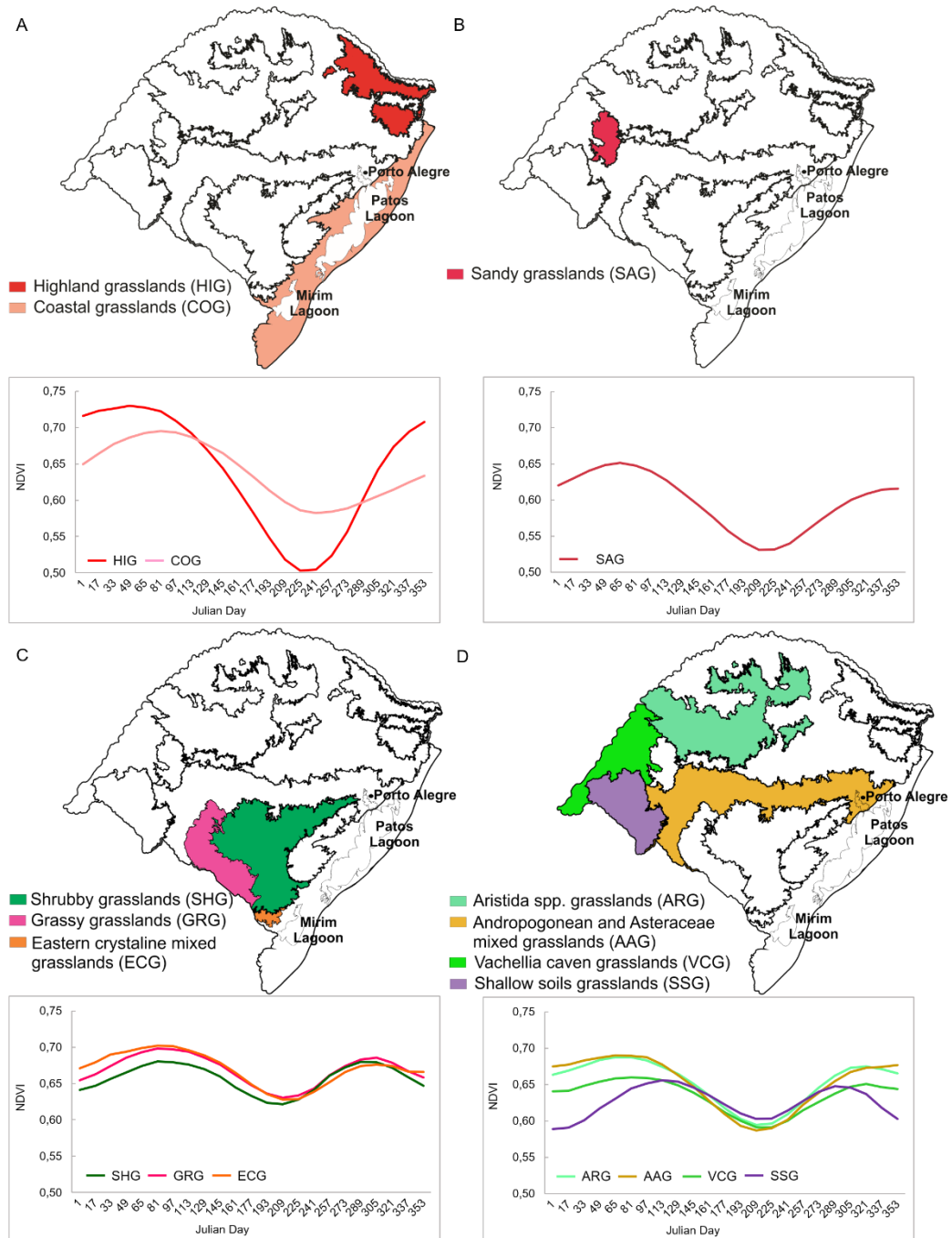


Figure 6 – Average values and spatial distribution of the NDVI groups (A, B, C and D) to grassland typologies in RS, 2000-2014 period.

The NDVI index is given by the ratio between the reflectance of the bands of red and near infrared, being more sensitive to the presence of chlorophyll and other pigments responsible for absorption of solar radiation in the band of red (Gao et al., 2000), which makes

it possible to highlight and identify changes in the seasonal profile of the vegetation cover. The EVI, however, has also increased sensitivity to structural and architectural changes in the typology canopy with higher density of biomass compared to NDVI, mitigating the effects of the atmosphere and soil (Huete et al., 2002).

Despite the formation of distinct groups, the spectral indices demonstrated the ability to identify the similarities and differences associated with onset and duration of the growing season, green peak and senescence periods, which were used to determine the phenological pattern of grassland typologies. The characterization of this pattern may allow for the detection of anomalies that indicate stress or even favorable growth conditions in the grassland, even though the information is generated in spatio-temporal form.

For both vegetation indices, it was possible to distinguish the seasons in which there was an increase in biomass, growth period and leaf weight gain of the species, which began in the spring and reached a maximum value in the late summer to early autumn. Both indices demonstrated a decline at the end of autumn with the onset of the cold season, followed by the lowest values of EVI and NDVI observed in associated with plant senescence. In all groups, for both EVI and NDVI (Table 1 and 2), the summer was the season with the highest values while the winter presented the lowest values, all statistically different from the other seasons. This shows that the seasonal variation of the grassland vegetation phenology is strongly influenced by the availability of solar radiation and air temperature.

Table 1 – Average values per group and season and Coefficient of Variation (CV) of the Enhanced Vegetation Index (EVI) of the grassland typologies of RS: Highland grasslands (HIG), Coastal grasslands (COG), Sandy grasslands (SAG), *Andropogonean* and *Asteraceae mixed* grasslands (AAG), *Vachellia caven* grasslands (VCG), *Eastern crystalline mixed* grasslands (ECG), Shrubby grasslands (SHG), *Aristida* spp. grasslands (ARG), Grassy grasslands (GRG) and Shallow soils grasslands (SSG) for the 2000-2014 time series.

Season	Group 1 (HIG, COG)		Group 2 (SAG, VCG, SSG)		Group 3 (SHG, GRG, ECG)		Group 4 (ARG, AAG)	
	Avg.	CV (%)	Avg.	CV (%)	Avg.	CV (%)	Avg.	CV (%)
Spring	0.37 ^c	5.97	0.39 ^a	1.81	0.45 ^a	1.39	0.43 ^a	1.36
Summer	0.44 ^a	6.98	0.39 ^a	2.97	0.45 ^a	3.89	0.44 ^a	0.09
Autumn	0.39 ^b	0.67	0.37 ^b	4.44	0.42 ^b	3.41	0.40 ^b	0.81
Winter	0.30 ^d	8.06	0.34 ^c	7.65	0.39 ^c	2.12	0.35 ^c	1.82

Averages followed by different letters in the column indicate significant differences by Tukey's test ($p \leq 0.05$).

Table 2 – Average values per group and season and Coefficient of Variation (CV) of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the grassland typologies of RS: Highland grasslands (HIG), Coastal grasslands (COG), Sandy grasslands (SAG), *Andropogonean* and *Asteraceae mixed* grasslands (AAG), *Vachellia caven* grasslands (VCG), *Eastern crystalline mixed* grasslands (ECG), Shrubby grasslands (SHG), *Aristida* spp. grasslands (ARG), Grassy grasslands (GRG) and Shallow soils grasslands (SSG) for the 2000-2014 time series.

Season	Grupo 1 (HIG, COG)		Grupo 2 (SAG)		Grupo 3 (SHG, GRG, ECG)		Grupo 4 (ARG, AAG, VCG, SSG)	
	Avg.	CV (%)	Avg.	CV (%)	Avg.	CV (%)	Avg.	CV (%)
Spring	0.63 ^c	3.94	0.60 ^b	2.82	0.67 ^a	0.47	0.65 ^a	2.56
Summer	0.70 ^a	5.08	0.64 ^a	2.04	0.67 ^a	2.21	0.65 ^a	5.33
Autumn	0.68 ^b	0.24	0.62 ^{ab}	4.48	0.68 ^a	1.61	0.66 ^a	1.56
Winter	0.56 ^d	8.68	0.54 ^c	2.09	0.64 ^b	0.56	0.61 ^b	0.99

Averages followed by different letters in the column indicate significant differences by Tukey's test ($p \leq 0.05$).

Previous studies using time profiles of vegetation indices have shown this association in different regions of the globe. Specifically, for the grassland vegetation in Rio Grande do Sul, Junges et al. (2015) analyzed images of NDVI and EVI/MODIS for natural grassland experimental units and attributed the decrease in NDVI and EVI values to the low air temperature and solar radiation during winter, which is associated with a reduction in plant growth. Also, the temporal profiles showed increased NDVI and EVI during spring because of summer species regrowth, slightly decreased values in summer, especially in years when there was a water deficit, and increased values in the autumn associated with the beginning of winter forage development.

For spring and summer, there were differences according to the group and analyzed index, but, more often, summer presented higher EVI and NDVI values. However, the EVI showed greater capacity to differentiate between groups, for the autumn. For the NDVI, autumn showed values similar to the spring and autumn seasons in groups 2, 3 and 4. Only Group 1 (Table 1 and 2) showed a difference in average values between the four seasons, with a coefficient of variation (CV) with the highest value for the winter. Group 3, composed of the same typologies for both indices, has higher CV values in summer and autumn, when there were also the major differences between the average values over the seasonal profile (Figure 5C and 6C). This shows that the air temperature and the greater availability of solar radiation during the spring and summer shape the seasonality of the grassland vegetation. It was also possible to observe that, during the summer, periods of drought and lower water availability are

more frequent, contributing to increased variability in the values of vegetation indices this season.

A factor other than temperature that influences the difference in CV value during the autumn is that C₃ species begin to regrow. Another difference in CV can be attributed to variation in rainfall. Drought periods or irregular distribution of rainfall determines the occurrence of water stress in the grassland vegetation in RS and are more frequent during the summer reflecting in the development/growth of vegetation until the beginning of autumn.

The southern grasslands are composed of complex ecosystems, with high floristic biodiversity, conditioned by the richness of plant species with the ability to resist or adapt to weather changes and forage value induced by different substrates (shallow soils and backgrounds, with rocky outcrops, etc.) and/or grazing regimes (Pillar et al., 2012), showing the difficulty in discriminating the different grassland typologies. The diversity of these grasslands was characterized by EVI and NDVI indices.

Conclusion

The typologies studied show consistent EVI and NDVI profiles with the seasonal dynamics of grassland vegetation under the influence of subtropical climate, with higher indices values during the warm seasons (spring and summer) and lower values during colder seasons (autumn and winter). Both indices have higher variability during the spring and summer, with a decrease during the autumn and winter.

Different groups were formed, showing the different sensitivities of the analyzed indices associated with the spectral bands used in the preparation of indices, resulting in different potentials to identify variation in the seasonal dynamics of the typologies. The results suggest that the grassland formation in Rio Grande do Sul can be grouped into 4 typological groups according to EVI and NDVI vegetation indices.

The analysis presented here makes it possible to confirm the diversity of the grassland typologies of the southern grassland, expressed by vegetation indices in both temporal and spatial aspects. The grouping of typologies demonstrated their seasonal behavior, signaling distinct management needs in current and future conservation activities.

Acknowledgments

We thank the Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel (CAPES), for granting a PhD Scholarship to 1st. author.

References

- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711-728.
- Boldrini, I.I.; Overbeck, G.; Trevisan, R. 2015. Biodiversity of plants = Biodiversidade de plantas. p. 51-56. In: Pillar, V.P.; Lange, O., eds. The southern grasslands. Network southern grasslands = Os campos do Sul. Rede Campos Sulinos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil (in Portuguese).
- Chen, J.; Jönsson, P.; Tamura, M.; Gu, Z.; Matsushita, B.; Eklundh, L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment* 91: 332-344.
- Efron, B. 1979. Bootstrap methods: another look at the Jackknife. *The Annals of Statistics* 7: 1-26.
- Gao, X.; Huete, A.R.; Ni, W.; Miura, T. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment* 74: 609-620.
- Hasenack, H.; Weber, E.; Boldrini, I.I.; Trevisan, R. 2010. Map of Ecological Systems of the Ecoregion of the Uruguayan Savannas on Scale 1:500,000 or Higher and Technical Report Describing Inputs Used and Methodology for Drawing up the Ecological Systems Map = Mapa de Sistemas Ecológicos da Ecorregião das Savanas Uruguaias em Escala 1:500.000 ou Superior e Relatório Técnico Descrevendo Insumos Utilizados e Metodologia de Elaboração do Mapa de Sistemas Ecológicos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Ecologia. Porto Alegre, RS, Brazil (in Portuguese).
- Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83: 195-213.
- Jönsson, P.; Eklundh, L. 2004. TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences* 30: 833-845.
- Junges, A.H.; Bremm, C.; Fontana, D.B.; Oliveira, C.A.O.; Schaparini, L.P.; Carvalho, P.C.F. 2016. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. *Scientia Agricola* 73: 332-337.

- Lieth, H. 1974. Purpose of a phenology book. p. 3-19. In: Lieth, H., ed. Phenology and seasonality modeling. Springer, Berlin, Germany.
- Overbeck, G.E.; Müller, S.C.; Fidelis, A.; Pfadenhauer, J.; Pillar, V.D.; Blanco, C.C.; Boldrini, I.I.; Both, R.; Forneck, E.D. 2007. Brazil's neglected biome: the south Brazilian campos. Perspectives in plant ecology. Evolution and Systematics 9: 101-116.
- Overbeck, G.E.; Hermann, J.M.; Andrade, B.O.; Boldrini, I.I.; Kiehl, K.; Kirmer, A.; Koch, C.; Kollmann, J.; Meyer, S.T.; Müller, S.C.; Nabinger, C.; Pilger, G.E.; Trindade, J.P.P.; Vélez-Martin, E.; Walker, E.A.; Zimmermann, D.G.; Pillar, V. 2013. Restoration ecology in Brazil: time to step out of the forest. *Natureza & Conservação* 11: 92-95.
- Overbeck, G.E.; Boldrini, I.I.; Carmo, M.R.B.; Garcia, E.N.; Moro, R.S.; Pinto, C.E.; Trevisan, R.; Zannin, A. 2015. Grasslands physiognomy = Fisionomia dos campos. p. 31-39. In: Pillar, V.P.; Lange, O., eds. The southern grasslands. Network southern grasslands = Os campos do sul. Rede campos sulinos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil (in Portuguese).
- Pillar, V.; Boldrini, I.I.; Bencke, G.; Medeiros, R. 2012. Southern grasslands = Campos do sul. p. 200-235. In: Sacarano, F.R.; Santos, I.L.; Martins, A.C.I.; Silva, J.M.C.; Guimarães, A.L.; Mittermeir, R.A., eds. Brazilian biomes: portraits of a plural country = Biomas Brasileiros: retratos de um país plural. Conservação Internacional, Rio de Janeiro, RJ, Brazil (in Portuguese).
- Pillar, V.; Tornquist, C.G.; Bayer, C. 2012. The southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes and greenhouse gases and some options for mitigation. *Brazilian Journal of Biology* 72: 673-681.
- Scottá, F.C.; Fonseca, E.L. 2015. Multiscale trend analysis for pampa grasslands using ground data and vegetation sensor imagery. *Sensors* 15: 17666-17692.
- Soudani, K.; Hmimina, G.; Delpierre, N.; Pontauiller, J.Y.; Aubinet, M.; Bonal, D.; Caquet, B.; Grandcourt, A.; Burban, B.; Flechard, C.; Guyon, D.; Granier, A.; Gross, P.; Heinesh, B.; Longdoz, B.; Loustau, D.; Moureaux, C.; Ourcival, J.M.; Rambal, S.; Saint André, L.; Dufrêne, E. 2012. Ground-based network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. *Remote Sensing of Environment* 123: 234-245.
- Tan, B.; Morisette, J.; Wolfe, R.; Esaias, W.; Gao, F.; Ederer, G.; Nightingale, J.; Nickeson, J.E.; Ma, P.; Pedely, J. 2011. Modis vegetation phenology metrics estimated with an enhanced timesat algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 4: 361-371.

- Vanschaik, C.P.; Terborgh, J.W.; Wright, S.J. 1993. The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 24: 353-377.
- Ward Jr., J.H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association* 58: 236-244.
- Zhang, X.; Friedl, M.A.; Schaaf, C.B.; Strahler, A.H.; Hodges, J.C.F.; Gao, F.; Reed, B.C.; Huete, A. 2003 Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment* 84: 471-475.

2.4 ARTIGO 4 - Métricas fenológicas da vegetação campestre do Rio Grande do Sul

Métricas fenológicas da vegetação campestre do Rio Grande do Sul

Andreise Moreira^a, Denise Cybis Fontana^a, Tatiana Mora Kuplich^b,
Laurindo Antonio Guasselli^a

^a Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves 9500, 91501-970, Porto Alegre, Brasil

^b Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS), Caixa Postal 5021, CEP 97105-970, Santa Maria, RS, Brasil

Resumo: Considerando que o estudo da fenologia vegetal permite estabelecer relações entre o padrão fenológico da vegetação e as alterações causadas pela variabilidade climática, o objetivo deste trabalho foi determinar e caracterizar métricas fenológicas para as tipologias predominantes de vegetação campestre no Rio Grande do Sul (RS) e avaliar o padrão de distribuição espaço-temporal destas métricas sob influência da variabilidade climática subtropical. A obtenção das métricas fenológicas foi realizada com base na série temporal do índice de vegetação EVI/MODIS para o período de 2001 a 2014, por meio do Timesat. Foram extraídas 11 métricas fenológicas: início, fim, data de máxima atividade fotossintética e duração do ciclo vegetativo, nível de base, valor máximo, amplitude sazonal, taxa de crescimento (derivada esquerda) e taxa de senescência (derivada da direita) e produtividade total (integral maior) e vegetação sazonalmente ativa (integral menor) caracterizando a fenologia das tipologias campestres. Os resultados permitiram identificar a presença de um padrão de distribuição espacial entre as métricas fenológicas com o agrupamento das tipologias CBB, CCA, CSR, CAR, CGR, CMAC e CMC, na região centro-sul e para as tipologias CAL, CLI e CCE, à nordeste, ao longo do litoral e no extremo oeste do Estado, respectivamente. Também, observou-se que o padrão fenológico da vegetação campestre do RS é marcado pela sazonalidade da vegetação associada, principalmente à variação da temperatura do ar.

Palavras-chave: EVI, Timesat, tipologias campestres, fenologia.

1. Introdução

A fenologia é um fenômeno sazonal determinado pela relação das plantas com o clima e por fatores bióticos e abióticos que influenciam o ritmo de crescimento e desenvolvimento da vegetação (LIETH, 1974). A partir do estudo da fenologia é possível caracterizar as diferentes fases do crescimento e desenvolvimento das plantas, tanto a fase vegetativa (germinação, emergência, crescimento da parte aérea e das raízes) quanto a reprodutiva (florescimento, frutificação e maturação), definindo as épocas de ocorrência e as respectivas características (CÂMARA, 2006).

Mudanças fenológicas podem refletir a resposta da vegetação a alterações e a variabilidade climática atuando como um indicador de impactos das variações do clima (SOUDANI et al., 2012) com efeito significativo na produtividade dos ecossistemas. Estudos

sobre a resposta da fenologia da vegetação às mudanças climáticas em diferentes escalas temporais e espaciais são importantes para compreender e prever a dinâmica futura e adaptação dos ecossistemas frente as alterações dos elementos climáticos (ZHANG et al., 2015).

O uso de satélites e imagens orbitais tornaram-se importantes ferramentas para a avaliação de padrões da fenologia da vegetação e a detecção de mudanças ou anomalias associadas a perturbações naturais ou antrópicas (TIEDEMANN, 2011), com a capacidade de fornecer informações temporalmente contínuas e em diferentes escalas, desde local até global (ZHANG et al., 2003). O uso de séries temporais de índices de vegetação possibilita determinar métricas fenológicas como início e fim da estação de crescimento, taxa de crescimento e senescência, pico máximo de desenvolvimento e duração do ciclo que definem o padrão de desenvolvimento da vegetação (REED et al., 2003).

Estudos relacionados a definição de métricas fenológicas para a vegetação campestre ainda são pouco desenvolvidos e, em sua maioria, tem como base o uso de índices de vegetação (EVI e NDVI) e a relação com a variabilidade do clima e eventos em larga escala como El Niño e La Niña (ZHANG et al., 2006; PARUELO, 2008; HERMANCE et al., 2015), com a definição somente das fases de início e fim de crescimento e pico vegetativo. O mesmo é observado nos trabalhos elaborados sobre a vegetação campestre no Sul do Brasil, com destaque para o bioma Pampa (TRENTIN, 2011; SCOTTÁ, 2013; WAGNER, 2013; JUNGES et al., 2016). Em maioria, os trabalhos desenvolvidos não utilizam uma metodologia capaz de abranger grandes áreas e que possibilitem análises espaço-temporais de forma contínua e de diferentes métricas fenológicas.

As séries temporais de índices de vegetação, obtidas por sensoriamento remoto, possibilitam a definição de métricas fenológicas capazes de fornecer informações sobre o comportamento da vegetação em resposta as mudanças ocorridas na superfície terrestre, seja por influência antrópica, fenológicas naturais ou pela variabilidade climática ao longo do tempo e em diferentes escalas espaciais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi determinar e caracterizar métricas fenológicas para as tipologias predominantes de vegetação campestre no Rio Grande do Sul e avaliar o padrão de distribuição espaço-temporal destas métricas sob influência da variabilidade climática subtropical.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo

A área de estudo abrangeu 10 tipologias campestres predominantes no estado do Rio Grande do Sul (RS) (latitudes 27° 05' e 33° 45' S e longitudes 49 43' e 57° 39' W). A definição das tipologias foi realizada com base no Mapa de Sistemas Ecológicos das Savanas Uruguaias (HASENACK et al., 2010) e na descrição fisionômica elaborada por Boldrini e Longhi-Wagner (2011) (Figura 1).

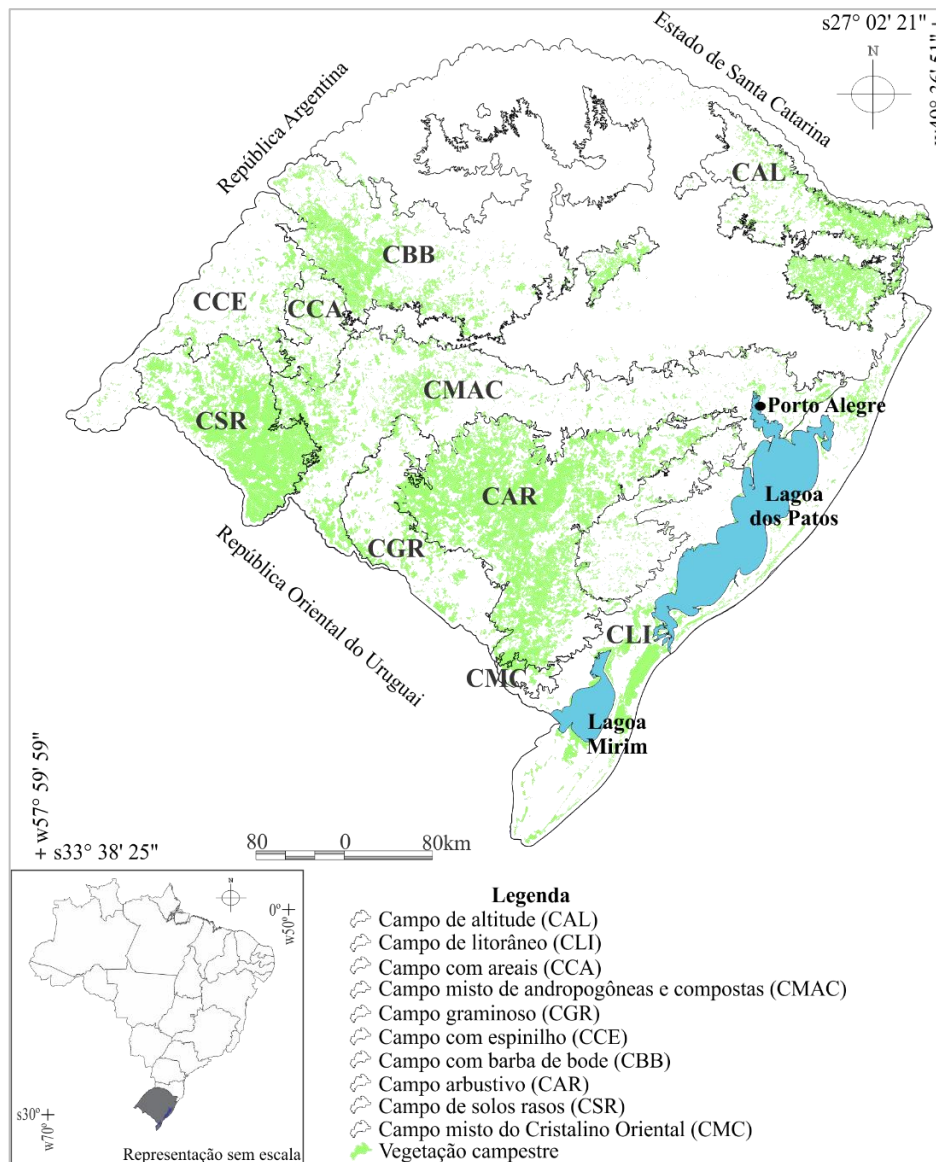


Figura 1. Máscara de campos e localização das tipologias campestres.

Fonte: Adaptado de Hasenack et al. (2010) e Weber et al. (2009).

2.2 Dados meteorológicos

Foram obtidas duas séries temporais de dados estimados, uma de precipitação pluvial, oriunda do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), e outra de temperatura do ar, proveniente do ERA Interim, ambas para o período de 2001 a 2014. A coleta de dados

correspondeu à coordenada geográfica central obtida em 20 polígonos amostrais para cada tipologia campestre.

Para a estimativa dos valores de precipitação pluvial do TRMM, foram utilizados os dados do algoritmo 3B43 (*TRMM and Others Sources Monthly Rainfall*) que fornece estimativas de precipitação horária (mm/hora), diária (mm/dia) e mensal (mm/mês) em grade de resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Os valores diários de precipitação pluvial foram acumulados a cada 16 dias, obtidos a partir do valor médio dos 20 polígonos amostrais para cada uma das 10 tipologias campestres do RS. Ao final, do valor acumulado a cada 16 dias foi obtido a média para cada estação do ano.

Os valores de temperatura do ar correspondem ao ERA Interim, uma base de dados de reanálise global atmosférica produzida e disponibilizada pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para o período de 1979 até o presente (BERRISFORD et al., 2011; BALSAMO et al., 2015). Os dados são adquiridos a 2 metros da superfície em uma grade de resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Os valores de temperatura do ar seguiram o mesmo processamento dos valores de precipitação pluvial, porém obteve-se a média de valores diários organizados em ciclos de 16 dias.

A organização dos dados em ciclos de 16 dias foi realizada com o objetivo de compatibilizar as séries de dados meteorológicos com a série de dados do índice de vegetação EVI disponibilizada pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*).

2.3 Processamento das imagens e geração das métricas no Timesat

Para a extração das métricas fenológicas das tipologias campestres foi utilizado o programa Timesat criado por Jönsson e Eklundh (2002); Jönsson e Eklundh (2004), aplicado na análise de séries temporais de dados de satélite, permitindo a extração de informações sazonais da vegetação (JÖNSSON e EKLUNDH, 2003; GAO et al., 2008; PRABAKARAN et al., 2013).

Foi considerada a série temporal entre janeiro de 2001 e dezembro de 2014, totalizando 322 imagens de EVI/MODIS. Foi realizado um pré-processamento convertendo os arquivos .tif para .bin (binary files) e a resolução radiométrica de 8 para 16 bits através de linguagem de programação “*Interactive Data Language*” (IDL).

Também, foi utilizada uma série temporal de imagens de *Pixel Reliability* (Confiabilidade do pixel) para a ponderação dos pesos na filtragem da série temporal. Os pixels com melhor qualidade recebem pesos maiores e os de qualidade inferior recebem pesos menores ou nulo, conforme Jönsson e Eklundh (2004).

No processamento das imagens aplicou-se o filtro *Savitsky-Golay*, dado pelo cálculo de regressão polinomial local. O filtro *Savitsky-Golay* baseia-se na definição da origem do sinal, da largura e do ponto central do intervalo. A partir disso, remove-se o ponto central do conjunto de pontos do intervalo e ajusta-se através do método de mínimos quadrados, um polinômio de grau variável aos pontos restantes. Este polinômio é utilizado para estimar o valor do ponto removido e em sequência deslocar o intervalo para o ponto seguinte do sinal original. Obtido o valor do primeiro ponto, repete-se o processo anterior (CERQUEIRA et al., 2000).

Para a série de dados analisada foram extraídas do Timesat onze métricas fenológicas: início, fim, data de máxima atividade fotossintética e duração do ciclo vegetativo, nível de base, valor máximo, amplitude sazonal, derivada esquerda e direita e integral maior e menor, caracterizando a fenologia das tipologias campestres (Tabela 1). Foram geradas métricas fenológicas para cada ano e obtido, ao final, os valores médios de cada métrica fenológica para o período entre 2001 e 2014.

Tabela 1. Descrição das métricas fenológicas extraídas no Timesat.

	Métrica Fenológica	Unidade	Descrição
1	Início do ciclo vegetativo	Período*	Início da estação
2	Fim do ciclo vegetativo	Período	Fim da estação
3	Data de máxima atividade fotossintética	Período	Período aproximado de máxima atividade fotossintética
4	Duração do ciclo vegetativo	Dias	Intervalo entre o início e o fim da estação
5	Nível de Base	IV**	Mínima atividade fotossintética
6	Valor Máximo	IV	Máxima atividade fotossintética
7	Amplitude Sazonal	IV	Variação sazonal da atividade fotossintética
8	Derivada da Borda Esquerda	Dia/IV	Taxa de variação de crescimento da vegetação
9	Derivada da Borda Direita	Dia/IV	Taxa de variação de senescência da vegetação
10	Integral Maior	Dia/IV	Produtividade total da vegetação
11	Integral Menor	Dia/IV	Vegetação sazonalmente ativa

Fonte: Adaptado de Jönsson e Eklundh (2004); 2012; Petorelli et al. (2005); Tan et al. (2011); Teles (2015).

* Período: corresponde ao mês do ano; ** IV: valor do índice de vegetação EVI que varia de 0 a 1.

Para destacar as áreas de vegetação campestre, após a obtenção das métricas fenológicas, aplicou-se a imagem média uma máscara de campos (Figura 1), elaborada por Weber et al. (2009). A máscara inclui os campos: seco, úmido, com afloramentos rochosos e campos do litoral.

3. Resultados e Discussão

3.1 Variabilidade sazonal dos dados espectrais e meteorológicos

O padrão de crescimento e desenvolvimento da vegetação campestre no RS segue padrão de variação similar ao da temperatura do ar. Durante a primavera e o verão ocorre o aumento da temperatura do ar e, também são observados os maiores valores de EVI (~0,42). De maneira inversa, a diminuição da temperatura do ar no outono e inverno está associada aos menores valores de EVI (~0,37) (Figura 2A e Tabela 2). Este padrão caracteriza a fenologia da vegetação campestre em todo o RS (SCOTTÁ; FONSECA, 2015; JUNGES et al., 2016).

Tabela 2. Valores médios de EVI, Temperatura do ar e Precipitação pluvial por estação do ano para as 10 tipologias campestres predominantes no RS para o período de 2001 a 2014.

		Tipologias campestres									
		CAL	CAR	CBB	CCA	CCE	CGR	CLI	CMAC	CMC	CSR
EVI*											
Primavera		0,38	0,44	0,43	0,38	0,39	0,44	0,35	0,43	0,45	0,39
Verão		0,46	0,44	0,44	0,40	0,40	0,43	0,42	0,44	0,47	0,38
Outono		0,39	0,42	0,40	0,36	0,37	0,41	0,39	0,39	0,44	0,39
Inverno		0,28	0,39	0,36	0,31	0,34	0,39	0,31	0,35	0,40	0,36
Temperatura**											
Primavera		18,5	19,2	20,7	20,6	20,9	19,2	19,5	19,7	19,1	19,8
Verão		21,8	23,4	24,4	24,6	25,0	23,4	24,0	23,8	23,5	24,0
Outono		16,3	16,7	17,8	17,6	17,9	16,5	18,8	16,9	16,5	16,8
Inverno		12,3	11,9	13,4	13,1	13,3	11,7	13,6	12,2	11,5	12,0
Precipitação***											
Primavera		90,1	79,9	112,9	104,3	99,4	80,3	60,6	90,3	65,4	84,5
Verão		95,9	77,9	84,3	82,8	81,9	75,0	69,0	77,5	66,7	77,6
Outono		67,5	73,3	78,5	78,7	76,6	73,7	64,0	73,0	69,0	70,0
Inverno		80,9	72,6	69,0	60,2	52,9	64,4	66,5	66,7	64,4	52,3

*Valores de EVI variam de 0 a 1. **Valores de Temperatura do ar (°C). ***Valores de Precipitação pluvial (mm).

Com relação ao padrão de distribuição da precipitação pluvial (Figura 2B e Tabela 2), ocorre certa regularidade entre as quatro estações do ano. Existem diferenças entre as regiões, sendo que os maiores valores são observados sobre os campos com barba de bode (CBB) e campos de altitude (CAL), com diminuição a oeste e sul, onde predominam as demais tipologias, semelhante aos resultados apresentados por Wagner et al. (2013).

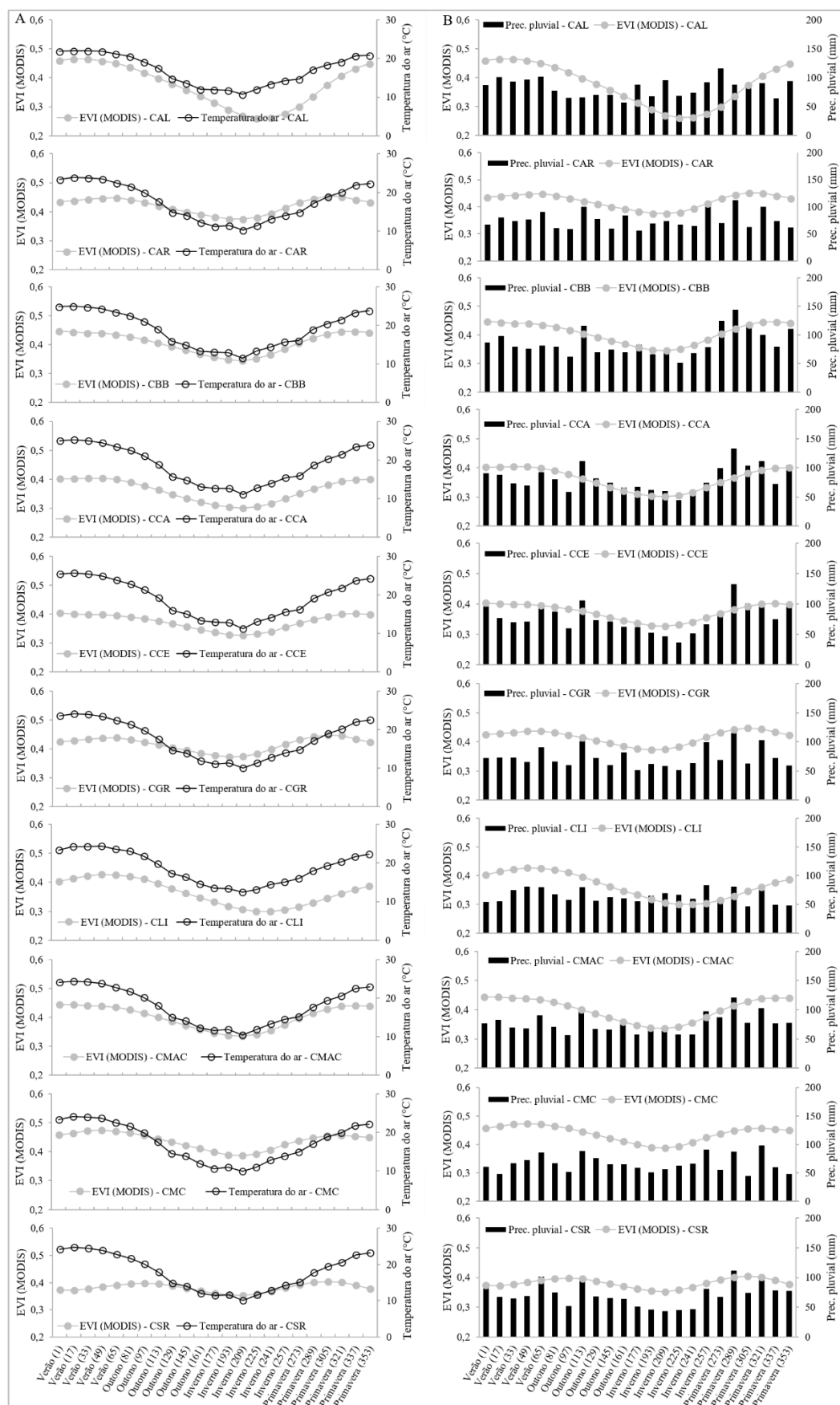


Figura 2. Valor médio do padrão de distribuição de variáveis meteorológicas e dados de EVI (MODIS) para a série temporal 2001 – 2014 para 10 tipologias campestres predominantes no RS. EVI e Temperatura do ar (A) e EVI e Precipitação pluvial (B).

A relação entre os valores de EVI e temperatura do ar é maior que em relação a precipitação pluvial. Para todas as tipologias foram observados coeficientes de correlação significativos entre o EVI e a temperatura do ar no outono, com diminuição durante o inverno para as tipologias CAL e CLI e na primavera para CAR, CGR, CMC e CSR. Menores valores de correlação foram obtidos no verão para a maioria das tipologias (Tabela 3).

Embora a disponibilidade hídrica seja fundamental para o desenvolvimento da vegetação, sendo um dos seus principais reguladores, e que o incremento de temperatura do ar, especialmente no verão, caracteriza a maior demanda evaporativa da atmosfera, neste estudo não foi obtida correlação direta entre a precipitação pluvial e o EVI para a maioria das tipologias campestres e estações do ano (Tabela 3). Wagner (2013), ao avaliar a relação entre as variações dos desvios da média de EVI e desvios de precipitação pluvial de estações meteorológicas em áreas de vegetação campestre no RS e Uruguai, obteve valores de correlação variáveis ao longo do ano, mas de modo geral, os valores apresentaram baixa correlação. Observou-se, que o aumento dos valores acumulados de precipitação pluvial na primavera e verão, coincidem com o aumento nos valores de EVI.

Tabela 3. Valores de correlação entre o EVI e a Temperatura do ar e o EVI e a Precipitação pluvial para 10 tipologias campestres do RS. Cor cinza indica correlação significativa pelo teste t de Student ($p \leq 0.05$).

		Tipologias campestres									
		CAL	CAR	CBB	CCA	CCE	CGR	CLI	CMAC	CMC	CSR
EVI/Temperatura											
Primavera		0.98	0.09	0.93	0.98	0.95	-0.29	0.99	0.96	0.71	-0.49
Verão		0.95	-0.52	0.87	0.59	0.71	-0.61	0.60	0.89	0.00	-0.92
Outono		0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.91
Inverno		-0.19	0.94	0.94	0.93	0.93	0.94	-0.20	0.94	0.92	0.95
EVI/Precipitação											
Primavera		-0.64	0.40	-0.70	-0.39	-0.24	0.53	-0.44	-0.32	0.20	0.41
Verão		-0.33	0.70	0.52	-0.90	0.18	0.33	0.93	-0.36	0.60	0.56
Outono		0.64	-0.32	0.16	0.14	0.42	-0.15	0.28	-0.06	-0.12	0.26
Inverno		0.21	0.74	0.49	0.55	0.71	0.86	-0.48	0.76	0.95	0.90

A série analisada utilizou valores médios para todo o período, minimizando a capacidade de relacionar o EVI e a precipitação pluvial. Estudos futuros considerando escalas temporais distintas, períodos anômalos ou conduzidos por influência de eventos em larga escala como El Niño e La Niña, que alteram as taxas de precipitação pluvial no Estado (BERLATO;

FONTANA, 2003), poderão ser desenvolvidos com intuito de obter informação sobre a dinâmica da resposta da vegetação campestre e a variabilidade climática no RS.

3.2 Métricas fenológicas

Os resultados obtidos do padrão médio das métricas fenológicas para o período de 2001 a 2014 (Figura 3 e Tabela 4) permitiu identificar que apesar do padrão anual similar, há diferenças na fenologia da vegetação campestre entre as tipologias predominantes no RS.

O incremento de temperatura do ar no início da primavera determina o início de crescimento da vegetação campestre (rebrotar), período em que predominam gramíneas hibernais, com metabolismo fotossintético C₃ (BOLDRINI et al., 2015). As datas de início do ciclo vegetativo variam entre setembro e outubro, com variação entre as tipologias. Para as tipologias (CBB, CCA, CSR, CAR, CGR, CMAC e CMC) localizadas na região centro-sul, o início do ciclo de crescimento ocorre um mês antes (setembro) das tipologias (CAL, CLI e CCE) presentes à nordeste, litoral e extremo oeste do Estado, respectivamente. Neste período, os totais de precipitação pluvial em geral não são limitantes, propiciando adequado crescimento e acúmulo de biomassa vegetal. Verifica-se, entretanto, que no centro-sul do Estado existe variabilidade na data da rebrotar o que pode estar associado com questões locais relacionadas com solo, relevo, composição de espécies ou manejo dos campos.

Tabela 4. Média das métricas fenológicas para cada tipologia campestre do RS para o período de 2001 a 2014.

	Tipologias Campestres									
	CAL	CAR	CBB	CCA	CCE	CGR	CLI	CMAC	CMC	CSR
Métricas										
Início do ciclo (mês)	09/10	23/09	07/09	19/09	13/10	12/09	02/10	02/09	05/09	10/09
Fim do ciclo (mês)	30/08	25/07	08/07	12/07	14/08	15/07	15/08	25/07	31/07	09/07
Data Máx. Ativ. Fot. (mês)	20/03	29/12	22/12	11/01	26/02	26/01	10/03	18/02	14/02	19/12
Duração do ciclo (dias)	324	304	303	297	305	298	317	294	298	302
Min. Ativ. Fot. (0-1)	0,29	0,30	0,27	0,26	0,27	0,30	0,28	0,30	0,29	0,27
Máx. Ativ. Fot. (0-1)	0,57	0,52	0,53	0,47	0,50	0,52	0,52	0,52	0,55	0,48
Amplitude (0-1)	0,28	0,22	0,26	0,21	0,23	0,22	0,24	0,22	0,26	0,21
Tax. Crescimento (dia/IV)	563	474	334	304	316	492	524	378	395	285
Tax. Senescência (dia/IV)	309	246	231	208	215	262	293	249	227	205
Prod. Total (dia/IV)	98500	87890	86380	85780	92940	91620	93260	91210	86890	86040
Prod. Sazonal (dia/IV)	34760	28730	28340	27560	31760	28850	32040	30790	29960	28230

Para a métrica de fim do ciclo fenológico o padrão entre as tipologias é similar ao anteriormente descrito. A senescência ocorre entre os meses de julho e agosto, muito associado ao decréscimo da temperatura do ar, primeiramente nas regiões centro-sul e com certo atraso no nordeste e litoral.

A data de máxima atividade fotossintética e a duração do ciclo, em consequência, mostram padrões também similares de distribuição no Estado. Nordeste e litoral se diferenciam das demais, tendo a data de máxima atividade fotossintética mais tardia e a duração do ciclo maior.

A duração do ciclo sazonal, expressa em dias e que corresponde ao período de desenvolvimento dos campos, desde a rebrota até a senescência, ou seja, o intervalo entre o início e o fim do ciclo fenológico, variou em torno de 288 a 335 dias (10 a 11 meses) e se estende da primavera até o inverno. A duração do ciclo ocorreu de forma diferenciada, sendo mais curto para as tipologias CBB, CCA, CSR, CAR, CGR, CMAC e CMC e mais longo para as tipologias CAL, CLI e CCE.

A data de máxima atividade fotossintética ocorre entre dezembro (verão) e março (outono) definindo nestes meses o pico de desenvolvimento vegetativo, determinado pela métrica de máxima atividade fotossintética, com valores médios de EVI que variaram de 0,46 a 0,60. Neste período há predomínio de gramíneas C_4 , de crescimento durante a primavera e verão. Novamente, o centro-sul do Estado mostra um padrão menos homogêneo de crescimento, com áreas próximas mostrando atividade fotossintética distintas, o que possivelmente esteja associado ao fator de disponibilidade hídrica. Já os valores de mínima atividade fotossintética ocorrem entre os meses de julho e agosto e estão diretamente associados ao fim do ciclo fenológico, marcado pela senescência da vegetação campestre e representados pelos baixos valores de EVI que variaram entre 0,26 e 0,30 (nível de base) e predominância de espécies com metabolismo fotossintético C_3 (BOLDRINI et al., 2015).

A associação de espécies C_3 e C_4 , que se sucedem no tempo é uma característica importante dos campos do RS e determinam a capacidade de crescimento da vegetação nas quatro estações do ano, definindo certo equilíbrio da produção anual de forragem (MARASCHIN, 2009). Apesar disso, verifica-se que a amplitude sazonal, determinada pela diferença entre o valor máximo de EVI e o nível de base, apresentou valores entre 0,21 e 0,31.

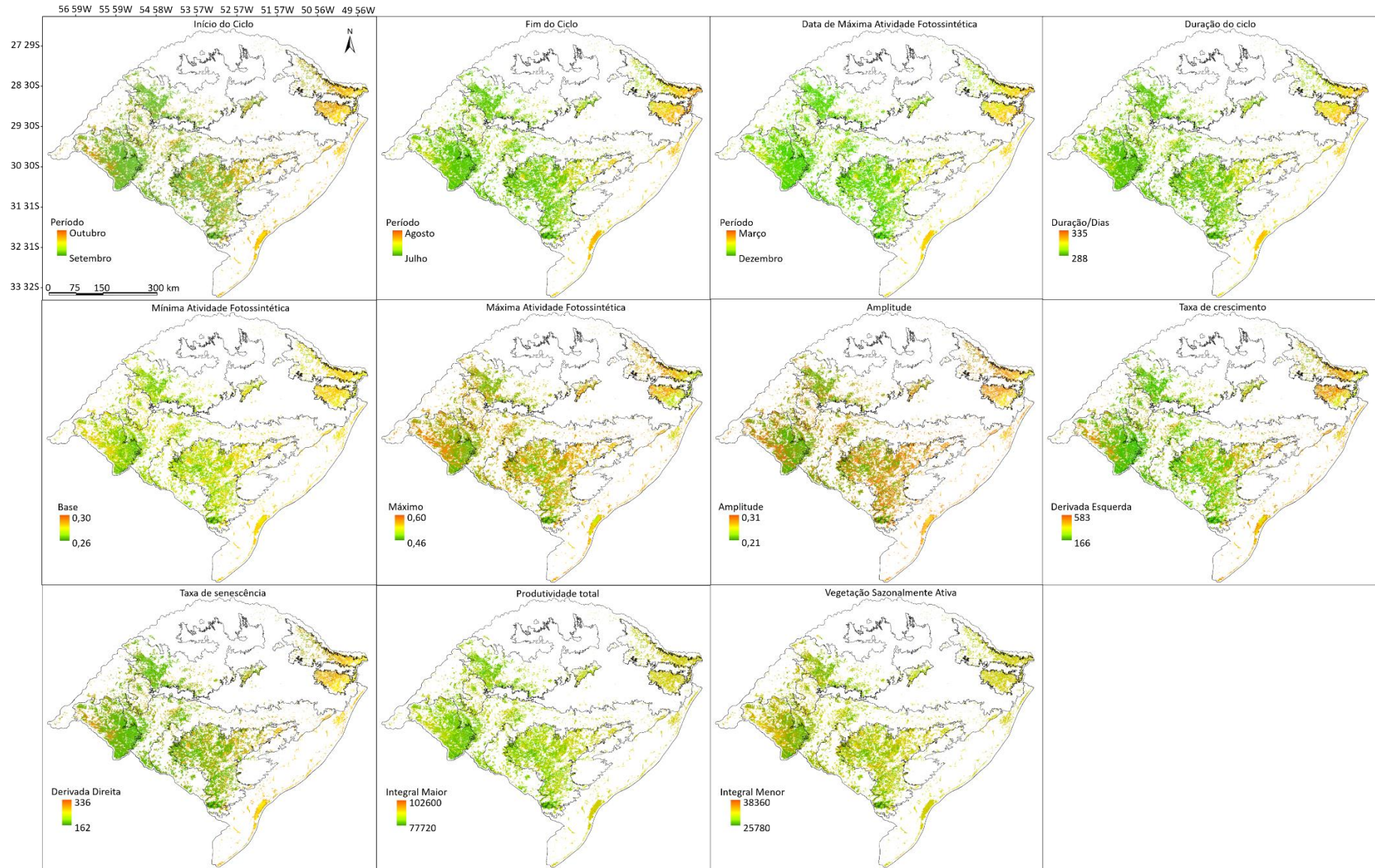


Figura 3. Métricas fenológicas obtidas da série temporal de EVI (MODIS) para o período de 2001 a 2014 para a vegetação campestre do RS.

A amplitude evidencia a variação sazonal da atividade fotossintética característica da vegetação campestre, com ciclo fenológico marcado apresentando altos valores de EVI no verão e baixos no inverno. Os valores mais baixos distribuem-se entre as tipologias CSR e CCA (Tabela 4), as quais apresentam semelhança climática, predominando os Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos, respectivamente (EMBRAPA, 2006), apresentam em comum solos com baixa capacidade de retenção hídrica, condição esta agravada pela ocorrência de estiagens e altas temperaturas, especialmente no verão (BOLDRINI et al., 2010), refletindo nos menores valores de EVI.

As métricas, taxa de crescimento e taxa de senescência, associadas ao período de rebrota e senescência da vegetação, respectivamente, repetem o padrão de distribuição entre as tipologias já descrito. Verifica-se que a taxa de crescimento (166-583) é maior que a taxa de senescência (162-336). Durante o inverno, as baixas temperaturas associada a ocorrência de geadas limitam o crescimento de espécies C₄, responsáveis pela maior parte da produção de forragem nos campos, e dependendo de sua intensidade e duração comprometem o crescimento e desenvolvimento da vegetação (JACÓBSEN et al., 2003). Com a chegada da primavera e o incremento nos valores de temperatura do ar e disponibilidade de radiação solar, inicia o florescimento das espécies C₃ e ao longo do verão um aumento no número de espécies C₄ também emitem suas inflorescências.

Conforme Boldrini et al. (2015), essa alternância na época de florescimento da vegetação campestre altera completamente o aspecto da paisagem de um mês para o outro. Esta característica, também influencia na produtividade total (Integral maior) e a sazonalidade (Integral menor) da vegetação campestre que apresentaram os maiores valores para as tipologias CAL, CLI e CCE em relação as tipologias CBB, CCA, CSR, CAR, CGR, CMAC e CMC (Tabela 4). Estes resultados confirmam que a variabilidade climática influencia a distribuição das espécies de campo e caracteriza a sua espacialização em escala regional. Boldrini et al. (2010), acrescentam que a distribuição da vegetação não é homogênea e depende da capacidade de sobrevivência e habilidade competitiva entre as espécies, sendo o seu estabelecimento influenciado por condições limitantes relacionadas a geomorfologia, hidrologia, pedologia, clima e pela ação antrópica.

4. Considerações

Séries temporais de EVI/MODIS permitiram extrair informações sobre os parâmetros fenológicos da vegetação campestre do RS, em que predomina condições de clima subtropical.

Existe um padrão de distribuição espacial entre as métricas fenológicas com o agrupamento das tipologias CBB, CCA, CSR, CAR, CGR, CMAC e CMC, localizadas na região centro-sul e para as tipologias CAL, CLI e CCE distribuídas à nordeste, ao longo do litoral e no extremo oeste do Estado, respectivamente.

O padrão fenológico da vegetação campestre do RS é marcado pela sazonalidade da vegetação associada à variação da temperatura do ar e influenciada pela variabilidade da precipitação pluvial.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Doutorado para autora. Ao Dr. Julio Cesar Dalla Mora Esquerdo pelo auxílio com o Timesat.

Referências

BALSAMO, G. et al. ERA-Interim/Land: A global land surface reanalysis data set. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 389-407, 2015.

BERRISFORD, P. et al. The ERA-Interim archive. **European Centre for Medium Range Weather Forecasts**, v. 1, n. 1, p. 1-27, 2011.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul. Aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2003. 110 p.

BOLDRINI et al. **Bioma Pampa**: diversidade florística e fisionômica. Porto Alegre: Pallotti, 2010. 64 p.

BOLDRINI, I.I.; LONGHI-WAGNER, H.M. Poaceae no Rio Grande do Sul: diversidade, importância na fisionomia e conservação. **Ciência & Ambiente**, v. 42, p. 71-92, 2011.

BOLDRINI, I.I.; OVERBECK, G.; TREVISAN, R. Biodiversidade de plantas. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Ed.) **Os Campos do Sul. Rede Campos Sulinos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 51-56.

BORGES, E. F.; SANO, E. E.; MEDRADO, E. Radiometric quality and performance of TIMESAT for smoothing moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index time series from western Bahia State, Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, p. 083580-1 - 083580-21, 2014.

CÂMARA, G.M.S. Fenologia é ferramenta auxiliar de técnicas de produção. **Visão Agrícola**, v. 1, n. 5, p. 63-66, 2006.

CERQUEIRA, E.O.; POPPI, R.J.; KUBOTA, L.T; MELLO, C. Utilização de filtro de transformada de Fourier para a minimização de ruídos em sinais analíticos. **Química Nova**, v. 23, n. 5, p. 690-698, 2000.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Atlas Climático: Rio Grande do Sul**. In: MATZENAUER, R.; RADIN, B.; ALMEIDA, I.R. (Ed). Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio, Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), 2011.

GAO, F. et al. An algorithm to produce temporally and spatially continuous MODIS-LAI time series. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v.5, n.1, p.60-64, 2008.

HASENACK, H.; WEBER, E.; BOLDRINI, I.I.; TREVISAN, R. **Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das savanas uruguaias em escala 1:500.000 ou superior e relatório técnico descrevendo insumos utilizados e metodologia de elaboração do mapa de sistemas ecológicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Ecologia, The Nature Conservancy, 2010. p. 1-22.

HERMANCE, J.F.; AUGUSTINE, D.J.; DERNER, J.D. Quantifying characteristic growth dynamics in a semi-arid grassland ecosystem by predicting shortterm NDVI phenology from daily rainfall: a simple four parameter coupled-reservoir model. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 22, p. 5637-5663, 2015.

JACÓBSEN, L.O.; FONTANA, D.C.; SHIMABUKURO, Y.E. Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associados a eventos El Niño e La Niña, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 11, n. 2, p. 361-374, 2003.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, p.1824-1832, 2002.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction from time-series of satellite sensor data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v.40, p.487-500, 2003.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT - A program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers and Geosciences**, v.30, p.833-845, 2004.

JUNGES, A.H. et al. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. **Scientia Agricola**, v. 73, p. 332-337, 2016.

LIETH, H. Purposes of a Phenology Book. In: LIETH, H. **Phenology and Seasonality Modeling**. New York: Springer-Verlag, 1974. p. 3-19.

MARASCHIN, G.E. Manejo do campo nativo, produtividade animal, dinâmica da vegetação e adubação de pastagens nativas do sul do Brasil. In: PILLAR, V.P. (Org). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 248-259.

OVERBECK, G.E. et al. Fisionomia dos Campos. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Ed.) **Os Campos do Sul. Rede Campos Sulinos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 31-39.

PARUELO, J.M. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. **Ecosistemas**, v. 17, n.3, p. 4-22, 2008.

PETTORELLI, N. et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 9, p. 503-510, 2005.

PRABAKARAN, C. et al. Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data. **Current Science**, v.105, n.6, p.795-802, 2013.

REED, B.C.; WHITE, M.; BROWN, J.F. Remote Sensing Phenology. In: SCHWARTZ, M.D. (Ed.). **Phenology: an integrative environmental science**. Dordrecht: Springer, 2003. p. 365-381.

SCOTTÁ, F.C. **Análise da influência dos elementos do clima na vegetação campestre da Depressão Central, bioma Pampa, utilizando dados de campo e de sensoriamento remoto orbital**. 2013. 88p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SCOTTÁ, F.C.; FONSECA, E.L. Multiscale Trend Analysis for Pampa Grasslands Using Ground Data and Vegetation Sensor Imagery. **Sensors**, v.15, n.7, p. 17666-17692, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2 ed., 2006. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/downloads/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf>. Acesso em: 20 de abr. 2018.

SOUDANI, K. et al. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 234-245, 2012.

TAN, B. et al. An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology metrics from MODIS data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 361-371, 2011.

TELES, T.S. **Relações de métricas fenológicas EVI/MODIS do Timesat com sombreamento e padrões atípicos de temperatura em floresta estacional decidual**. 2015. 114p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2015.

TIEDEMANN, J.L. Fenología del bosque de las subregiones naturales: Chaco, Semiárido y Chaco Serrano, de Santiago del Estero, Argentina. **Ecología Aplicada**, v. 10, n. 2, p. 51-59, 2011.

TRENTIN, C.B. **Análise da resposta espectral da vegetação da área de proteção ambiental (APA) do Ibirapuitã em imagens do sensor EOS/MODIS associadas ao solo e aos elementos do clima**. 2011. 73p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa

de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WAGNER, A.P.L. **Dinâmica temporal de Índices de Vegetação no Pampa do Rio Grande do Sul e Uruguai e suas relações com os elementos meteorológicos regionais**. 2013. 160p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WEBER, E.J.; HOFFMANN, G.S.; OLIVEIRA, C.V.; HASENACK, H. Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2009. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Ecologia. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/labgeo/>. Acesso em: 12 de jan. 2017.

ZHANG, J.; CHANG, Q.; YAO, F. Grassland Phenology in Different Eco-Geographic Regions over the Tibetan Plateau. **International Journal of Environmental and Ecological Engineering**, v. 9, n. 11, p. 1301-1306, 2015.

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.111, p. 1-14, 2006.

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B.; STRAHLER, A.H.; HODGES, J.C.; GAO, F.; REED, B.C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 471-475, 2003.

2.5 ARTIGO 5 - Indicativo da Produtividade da vegetação campestre a partir de série temporal de *Enhanced Vegetation Index* (EVI)

Indicativo da produtividade da vegetação campestre a partir de série temporal de *Enhanced Vegetation Index* (EVI)

Andreise Moreira^a, Ana Paula Luz Wagner^b, Daniel Dantas Barreto^b, Clyde W. Fraisse^b,
Denise Cybis Fontana^a

^a Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves 9500, 91501-970, Porto Alegre, Brasil

^b University of Florida, Department of Agricultural & Biological Engineering, 239, Rogers Hall, P.O. Box 110570, Gainesville, FL 32611-0570, USA

Resumo: O uso de modelos baseados em dados obtidos por sensoriamento remoto para estimativa da produtividade de diferentes ecossistemas, com análise sobre a dinâmica sazonal do ciclo do carbono, serve como uma importante variável no estudo de mudanças climáticas. Este estudo teve como objetivo a elaboração de um modelo simplificado para indicativo da produtividade dos campos no Rio Grande do Sul (RS), a partir do índice de vegetação *Enhanced Vegetation Index* (EVI) e da *Gross Primary Productivity* (GPP). Os modelos foram testados utilizando diferentes escalas temporais visando maximizar a resposta e reduzir a quantidade de dados de entrada dos modelos. Foram utilizadas séries temporais de EVI e GPP para o período de 2002 a 2012 para 3 tipologias campestres. Dois modelos de regressão linear foram testados. No Modelo 1, foi avaliado o somatório anual dos valores de EVI e GPP para a série temporal de 2002 a 2010, enquanto no Modelo 2 foram consideradas 276 possíveis combinações de períodos contidos entre 1 a 23 imagens. Os valores do coeficiente de determinação e RMSE obtidos para o Modelo 1 foram inferiores ao Modelo 2, sendo os melhores resultados obtidos para a tipologia CSR (campos de solos rasos). Considera-se que os modelos testados apresentaram potencial de indicar a produtividade da vegetação campestre para a tipologia CSR, utilizando como entrada de dados apenas uma variável dada pelo índice de vegetação EVI, bem como a otimização do tempo de estimativa através do Modelo 2.

Palavras-chave: série temporal, GPP, tipologias campestres.

1. Introdução

A vegetação terrestre capta o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera e, simultaneamente, libera O₂ e vapor de água (H₂O) através do processo de fotossíntese. A fotossíntese é uma função fisiológica básica da vegetação que depende da energia absorvida pela clorofila para o crescimento da planta e acúmulo de biomassa (ZHANG et al., 2014). A partir do processo de fotossíntese é possível estimar a produtividade da vegetação através da *Gross Primary Productivity* (GPP) que representa a taxa de fixação de carbono por unidade de tempo em uma determinada área (HUETE et al., 2015).

A GPP é capaz de refletir variações espaciais relacionadas aos fatores de clima, distribuição da vegetação e uso da terra, bem como variações das condições de tempo, através

da resposta fisiológica das plantas com alteração em seu ciclo sazonal, além de mudanças da composição da atmosfera, mudanças climáticas e redistribuição dos ecossistemas (CAO et al., 2004). Ao integrar fatores climáticos, ecológicos, geoquímicos e causados pela ação antrópica, a GPP torna-se uma importante variável de análise e avaliação de impactos ou pressão sobre os ecossistemas ao expressar a eficiência de uso dos recursos naturais por meio de sua produtividade (NEMANI et al., 2003; DALMAGO et al., 2008). No monitoramento de áreas de vegetação campestre a GPP pode ser utilizada como indicador de produtividade apresentando a disponibilidade de forragem em determinado local (JUSTICE et al., 1998). Quando estimada por satélite pode ser obtida de forma rápida e operacional, com menor custo e abrangendo extensas áreas.

Dados obtidos sobre a GPP, em escala espaço-temporal, fornecem informações importantes sobre a dinâmica sazonal do ciclo do carbono e podem ser utilizadas como entrada em modelos de previsão de mudanças climáticas (BALDOCCHI et al., 2001) e de estimativa de produtividade em diferentes ecossistemas. Medidas de GPP podem ser obtidas através de torres micrometeorológicas de fluxo, por meio da técnica de covariância de vórtices turbulentos (BEER et al., 2010; ZHANG et al., 2012). Entretanto, estas medições são limitadas em função do alto custo de instalação e manutenção dos equipamentos e pela escala de estudo, geralmente desenvolvida em nível local (SOUZA et al., 2014).

Estudos em escala regional e global têm sido desenvolvidos com uso do sensoriamento remoto, aliando dados orbitais e dados meteorológicos para a estimativa da produtividade da vegetação (WU et al., 2010). As estimativas de GPP podem ser elaboradas através de uma relação empírica, baseada na eficiência do uso da luz (LUE) e nas condições ambientais (ZHANG et al., 2012). Nos modelos baseados na LUE, a equação é definida pela quantidade de carbono fixada através da fotossíntese proporcional à energia solar absorvida pela vegetação, multiplicada pela eficiência com que a luz absorvida é utilizada para a fixação de carbono (MONTEITH, 1972; HUETE et al., 2015).

Modelos de estimativa de GPP com base em sensoriamento remoto são desenvolvidos a partir da relação entre a LUE e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (RFAA) e podem ser obtidos de diversos sensores orbitais como o ETM+ do Landsat 7 (SINGH, 2011), o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (RUNNING et al., 2004; RUNNING; ZHAO, 2015) e o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) (BOX et al., 1989).

Conforme Silva et al. (2013), um dos desafios no uso de modelos para estimativa da GPP consiste em se obter a LUE em áreas extensas. Isto em virtude de sua dependência de

fatores ambientais e da própria vegetação. Uma das soluções consiste em relacionar a LUE em função do seu valor máximo, mais as contribuições ambientais sintetizadas pela temperatura do ar e a quantidade de água na vegetação. Segundo os autores, outro elemento importante na modelagem da GPP é a determinação e/ou medição da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), em virtude de seu papel na fotossíntese e dada sua dependência à dinâmica da atmosfera.

Além disso, a maioria dos modelos utilizados para estimativa de GPP necessitam de uma base de dados extensa obtidas de diferentes fontes (ZHAO et al., 2005; ZHANG et al., 2007; POTTER et al., 2012) e alta capacidade de processamento, o que os torna complexos e pode gerar incertezas quanto aos parâmetros utilizados em função de erros nos dados de entrada e saída, da inadequação do modelo e do processo de calibração (LEITE et al., 2008). Com relação a GPP obtida pelo sensor MODIS existem ainda outras limitações como a resolução espacial de 500m e RFA estimada com base em dados de radiação solar global extraídos de bancos de reanálises que quando relacionados com dados em ponto de grade pode provocar incompatibilidades (SILVA et al., 2013).

Para minimizar estes problemas, a avaliação da produtividade em áreas de vegetação campestre, a partir de estimativas espaciais e temporais, pode ser realizada através da quantificação do pico de produção de biomassa ou da produção anual. Para avaliação da estimativa de produção anual modelos estatísticos que descrevem a relação entre dados orbitais, como os índices de vegetação EVI e NDVI e a biomassa vem sendo empregados através da integração dos valores de séries temporais de índices de vegetação (PARUELO et al., 1997). A integração anual dos valores de índices de vegetação, em específico o EVI, pode ser utilizada como estimador da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação e, portanto, da produtividade primária (PARUELO et al., 1997; GUERSCHMAN et al., 2003; HERRERA et al., 2012). Uma das vantagens em estimar a GPP a partir do EVI é devido sua resolução espacial e temporal, que permite reduzir o processamento de dados e a obtenção de informações de melhor qualidade.

No Rio Grande do Sul (RS), a avaliação da produtividade dos campos tem sido desenvolvida apenas com estudos locais e coletada de dados em campo com avaliação da produção de biomassa e/ou teores de carbono (CASTILHOS et al., 2009; TRENTIN et al., 2015; JUNGES et al., 2016). Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi contribuir nos estudos da GPP a partir da elaboração de um modelo simplificado para indicativo da produtividade dos campos no RS, a partir do índice de vegetação EVI. Como objetivos específicos buscou-se reduzir a quantidade de dados de entrada dos modelos, utilizando como

base apenas o índice de vegetação EVI e avaliar o potencial de maximizar o tempo para a estimativa de produtividade da vegetação campestre.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende três diferentes tipologias campestres localizadas no estado do Rio Grande do Sul (RS) (latitudes 27° 05' e 33° 45' S e longitudes 49 43' e 57° 39' W). A escolha das tipologias de estudo foi realizada com base no Mapa de Sistemas Ecológicos das Savanas Uruguaias (HASENACK et al., 2010) e na descrição fisionômica elaborada por Boldrini e Longhi-Wagner (2011). A delimitação das tipologias campos de altitude (CAL), campos de solos rasos (CSR) e campos mistos de andropogôneas e compostas (CMAC) (Figura 1), teve como finalidade representar diferentes regiões dentro do RS, com características particulares, como o desenvolvimento dos campos em distintos tipos de solos, presença de espécies e substratos variados e condições climáticas diferenciadas.

À nordeste do Estado localiza-se a tipologia CAL, composta por extensas áreas de campos associado a florestas de araucária (*Araucaria angustifolia*). A vegetação campestre predomina em zonas de maior altitude, com cotas superiores a 800m e apresenta estrutura arbustiva e/ou herbácea com a coexistência de gramíneas C₃ e C₄ que resulta no aumento da diversidade e da qualidade forrageira dos campos (BOLDRINI, 2009). Há predomínio de gramíneas entouceiradas, com o domínio, muitas vezes, do capim-caninha (*Andropogon lateralis*). Outras espécies como o capim-mimoso (*Schizachyrium tenerum*), o capim-cabeludo (*Axonopus siccus*) e as carquejas (*Baccharis crispa* e *Baccharis articulata*) são encontradas, além de espécies compostas como o cravo-de-campo-catarinense (*Trichocline catharinensis*) (OVERBECK et al., 2015). O clima da região é predominantemente do tipo “Cfb”, temperado úmido e com verões amenos, conforme a classificação de Köppen (BEHLING et al., 2004).

As tipologias CSR e CMAC distribuem-se na metade sul do Estado onde predomina o tipo climático “Cfa”. Na região central encontra-se a tipologia CMAC caracterizada pela presença de dois estratos. No estrato inferior as espécies dominantes são rizomatosas, representadas pelo campim-forquilha (*Paspalum notatum*) nos topos e encostas das coxilhas e esteloníferas como a grama-tapete (*Axonopus affinis*) nas áreas mais baixas e úmidas, enquanto no estrato superior há a presença de espécies cespitosas como o capim-caninha (*Andropogon lateralis*), a espécie mais abundante e de maior cobertura nesta área, além de outras gramíneas como: *Andropogon selloanus* e *Coelorachis selloana*. Em campos com sobrepastoreio, a

comunidade vegetal torna-se esparsa, e o solo descoberto, permite que as sementes das compostas se desenvolvam como: a roseta (*Soliva pterosperma*), o alecrim-do-campo (*Vernonia nudiflora*), a maria-mole (*Senecio brasiliensis*), além de *S. selloi* e *S. heterotrichius*. Nas áreas bem drenadas, é comum a formação de touceiras pelas barbas-de-bode (*Aristida jubata* e *A. filifolia*) (BOLDRINI et al., 2010).

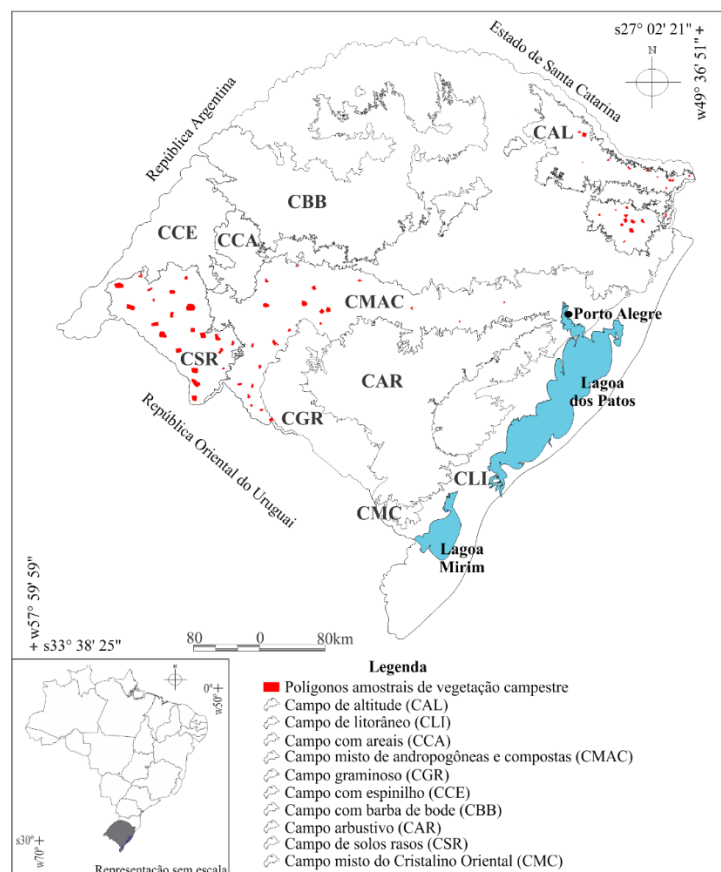


Figura 1. Localização das tipologias campestres e distribuição dos polígonos amostrais. Fonte: Adaptado de Hasenack et al. (2010).

Mais à oeste distribui-se a tipologia CSR que se desenvolve associada à solos rasos, de origem basáltica denominados Neossolos Litólicos, pedregosos e com baixa capacidade de retenção de umidade, condição agravada pela ocorrência frequente de déficit hídrico na região durante o verão. Predominam espécies e gramíneas cespitosas de porte baixo, muitas restritas a este tipo de solo, como *Aristida murina*, *A. uruguayensis*, *Bouteloua megapotamica*, *Eustachys brevipila*, *Microchloa indica*, *Paspalum indecorum*, *Tridens hackelli* e *Trypogon spicatus*. É comum a presença de solo exposto, onde encontram-se espécies compostas como *Berroa gnaphalioides* e *Sommerfeltia spinulosa* e leguminosas como *Adesmia incana* e *Mimosa amphigena*. Onde o solo é mais profundo a vegetação apresenta um estrato contínuo de gramíneas rizomatosas e estoloníferas, como o *Paspalum notatum* (capim-forquilha) e

Axonopus affinis (grama-tapete), entremeado por leguminosas como *Arachis burkartii* (amendoim-nativo) e *Adesmia bicolor* (babosa-do-mato) (BOLDRINI et al., 2010).

2.2 Dados de Sensoriamento Remoto

Foram utilizadas séries temporais do índice de vegetação EVI, produto MOD13Q1, coleção 5, com resolução temporal de 16 dias e espacial de 250m e imagens de GPP, produto MOD17A2H, coleção 6, disponibilizadas na resolução temporal de 8 dias e espacial de 500m. Ambas as séries temporais compreendem o período de 2002 a 2012.

O EVI permite que o sinal da vegetação seja otimizado, tornando-se mais sensível a variações na estrutura, arquitetura e fisionomia do dossel, tem sido utilizado no monitoramento e em estudos sobre a fenologia da vegetação, em particular com uso de séries temporais (Zhang et al., 2003). Neste estudo foram utilizados dados de EVI da coleção 5 do MODIS, denominada de EVI2, conforme a Equação 1 (SOLANO et al., 2010).

$$EVI2 = 2,5 * \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V + 1)} \quad (1)$$

em que: ρ_{IVP} é a reflectância no infravermelho próximo e ρ_V é a reflectância no vermelho. Os coeficientes adotados no cálculo do EVI2 são: L é o fator de ajuste para o solo ($L = 1$) e G é o fator de ganho ($G = 2,5$).

A GPP fornece medidas regulares do crescimento da vegetação terrestre (ZHAO et al., 2005), baseado em um modelo empírico de eficiência do uso da luz (Light Use Efficiency - LUE), calculado de acordo com a Equação 2:

$$GPP = \varepsilon * APAR \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} * TMIN_scalar * VPD_scalar \quad (3)$$

onde ε_{max} é a eficiência máxima do uso da luz; $TMIN_scalar$ e VPD_scalar são escalas entre 0 e 1 para reduzir ε_{max} em condições desfavoráveis de baixa temperatura e alto déficit de pressão de vapor.

$$APAR = IPAR * FPAR \quad (4)$$

em que *APAR* é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida; *FPAR* é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, enquanto a estimativa de *IPAR* é dada pela Equação 5:

$$IPAR = (SWRad * 0,45) \quad (5)$$

sendo *PAR* (radiação fotossinteticamente ativa incidente na superfície) estimada por *SWRad*, radiação de ondas curtas, em que 45% (0,45) é fotossinteticamente ativa (RUNNING; ZHAO, 2015; RESTREPO-COUBE et al., 2015).

Devido as características distintas de resolução temporal e espacial das imagens foi realizado o reprocessamento da série temporal de GPP com a composição das imagens em 16 dias correspondentes às datas do EVI a partir da obtenção da média de duas imagens de GPP a cada 8 dias e a reamostragem de 500m para 250m pelo método vizinho mais próximo, tornando o conjunto de dados compatível. A série temporal foi composta por um total de 253 imagens abrangendo as 3 tipologias consideradas no estudo.

A partir das duas séries temporais foi realizada a extração das amostras de vegetação campestre. Foram obtidos 20 polígonos amostrais para cada tipologia campestre (Figura 1), definidos com base em uma máscara de classificação de uso e cobertura da terra (WEBER et al., 2009), considerando somente a classe “campo”, composta por campo nativo classificado em: campo seco, campo úmido, com afloramentos rochosos e campos do litoral. O número de pixels obtidos para cada tipologia totalizou 3.743 pixels para a tipologia CAL, 3.409 para a CSR e 3.589 para a CMAC. Obtidos os pixels de campo realizou-se a análise estatística básica dos dados e em sequência a definição dos modelos estatísticos.

Os modelos buscaram servir como indicativo da produtividade da vegetação campestre com base na série temporal de EVI, a partir do teste de diferentes escalas temporais visando maximizar a resposta e reduzir a quantidade de dados de entrada dos modelos. Ambos os modelos consideram o somatório dos valores de GPP e EVI, porém diferenciam-se em quantidade de imagens e período como dados de entrada nos modelos.

A série temporal considerada no estudo compreende os anos de 2002 a 2012, dos quais foi utilizado o período de 2002 a 2010 para a modelagem dos dados de indicativo de produtividade dos campos e os anos de 2011 e 2012 para a validação dos modelos.

2.3 Modelo 1

O Modelo 1 considerou o somatório anual dos valores de EVI e GPP para a série temporal de 2002 a 2010 (Equação 6 e 7). O valor acumulado de EVI e GPP integram as variações temporais obtidas durante o ciclo de crescimento e são amplamente utilizadas como dados de entrada em modelos de produtividade primária líquida (RATANA et al., 2005).

$$Ind_prod_{EVI} = (\sum_{j=1}^{23} Prod_{ij}) \quad (6)$$

em que: Ind_prod_{EVI} é o Indicador de Produção do EVI e $\sum_{j=1}^{23} Prod_{ij}$ é o somatório anual dos valores de EVI, dado pela disponibilidade de imagens do índice de vegetação do sensor MODIS.

$$Ind_prod_{GPP} = (\sum_{j=1}^{23} Prod_{ij}) \quad (7)$$

em que: Ind_prod_{GPP} é o Indicador de Produção da GPP e $\sum_{j=1}^{23} Prod_{ij}$ é o somatório anual dos valores de GPP, dado pela disponibilidade de imagens de produtividade primária do sensor MODIS a cada 8 dias.

A partir da soma dos valores de EVI e GPP, definiu-se um modelo de regressão linear entre Y (variável dependente) e X (variável independente) (Equação 8).

$$Y_i = a + bx_i \quad (8)$$

em que: Y_i é o valor do somatório de GPP ($\sum_{j=1}^{23} GPP_{ij}$), x_i é o valor do somatório de EVI ($\sum_{j=1}^{23} EVI_{ij}$) e a e b são os coeficientes linear e angular da reta de regressão linear, respectivamente.

2.4 Modelo 2

Com o intuito de otimizar e antecipar a estimativa da produtividade da vegetação campestre para o período de um ano, o Modelo 2 considerou todas as 276 possíveis combinações de períodos contidos entre 1 a 23 imagens. As combinações de períodos foram determinadas com base na disponibilidade de imagens do índice de vegetação EVI do sensor MODIS. Calculou-se o R_a^2 para todas as 276 combinações de períodos possíveis e determinou-se o período que melhor representa cada uma das 3 tipologias com base no maior valor de R_a^2 .

O Modelo 2 apresenta a mesma estrutura da Equação 6 e 7, porém a variável explicativa dada pelo somatório do EVI foi modificada considerando o somatório de acordo com os intervalos que melhor representam a estimativa da produtividade dos campos para cada tipologia. Dessa maneira, a variável resposta Y_i mantém-se o valor do somatório anual de GPP ($\sum_{j=1}^{23} GPP_{ij}$), enquanto x_i é representado pelo valor do somatório de EVI ($\sum_{j=p}^q EVI_{ij}$) conforme o intervalo obtido para cada tipologia.

2.5 Validação dos modelos

Para a avaliação dos modelos considerou-se as estatísticas: coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) (Equação 9), que determina a porcentagem da variabilidade explicada através do modelo; *BIAS* (Equação 10) mede a tendência do modelo superestimar ou subestimar os dados estimados em relação aos dados observados; e, a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - Root Mean Square Error) (Equação 11), medida do desvio do valor estimado em relação ao valor observado (calculada como a raiz quadrada do desvio quadrático médio). A vantagem no uso do RMSE é que os valores do erro são apresentados na mesma unidade da variável analisada.

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (9)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{EST} - Y_{OBS}) \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{OBS} - Y_{EST})^2} \quad (11)$$

em que: R_a^2 é o coeficiente de determinação ajustado e R^2 é o coeficiente de determinação; Y_{OBS} e Y_{EST} indicam os dados observados e estimados para o período i e n é o total de dados.

3. Resultados e Discussão

3.1 Variabilidade sazonal dos dados espectrais

A distribuição temporal dos valores médios de EVI apresenta variação sazonal bem marcada para a tipologia CAL, enquanto para os dados de GPP, nas 3 tipologias analisadas é possível observar o crescimento e desenvolvimento da vegetação campestre ocorrendo entre a primavera até o início do outono, quando em decorrência da diminuição da temperatura do ar

inicia o período de senescência e redução da produção de biomassa, refletindo nos menores valores de EVI ($\sim 0,3$) e GPP ($\sim 0,02$) durante o inverno (Figura 2).

A tipologia CAL mostrou maior diferença entre as estações quentes (primavera e verão) e frias (outono e inverno), tanto para o perfil de EVI com variação nos valores de $\sim 0,2$ (estação fria) para $\sim 0,5$ (estação quente) como para a GPP ($\sim 0,06$ a $\sim 0,02$) (Figura 2). Esta variação está associada às características florísticas e de clima local, sendo que a tipologia CAL distribui-se à nordeste do estado do RS, com predomínio de gramíneas entouceiradas, dominadas por espécies cespitosas eretas e de ciclo estival, o qual apresentam maior desenvolvimento durante a primavera e o verão. No outono e inverno, as baixas temperaturas reduzem o crescimento das pastagens que associada a formação de geadas frequentes no inverno adquirem coloração amarelada (PILLAR et al., 2012; BOLDRINI, 2009; 2010), e consequentemente redução nos valores de EVI e GPP. Os volumes de chuva nesta região são elevados, com variação da precipitação pluvial média entre 1550 mm e 2100 mm, sem estação seca definida (REBOITA et al., 2010). Outra característica marcante, é o desenvolvimento dos campos sobre solos de origem basáltica, entremeados com florestas, principalmente a Mata de Araucária (*Araucaria Angustifolia*) e turfeiras (OVERBECK et al., 2015).

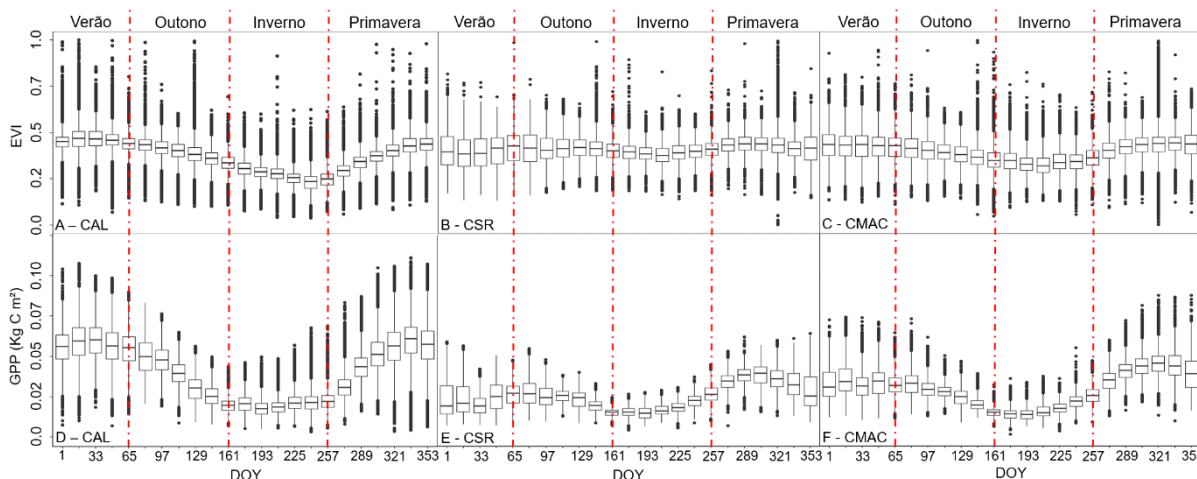


Figura 2. Valor médio de EVI (A, B e C) e GPP (D, E e F) das tipologias campestres: Campos de altitude (CAL), Campos de solos rasos (CSR) e Campos mistos de andropogônias e compostas (CMAC) para o período de 2002 - 2012.

Maior variabilidade nos valores de EVI e GPP é observada entre a primavera e o verão para as três tipologias, mas principalmente para as tipologias CSR e CMAC. A diminuição da disponibilidade hídrica e/ou períodos de estiagem ocorrem com maior frequência em direção ao sul e oeste do RS, impactando na atividade fotossintética e produção de biomassa da vegetação campestre. Esta parte do Estado apresenta valores de precipitação pluvial em torno

de 1300 mm, e curtos períodos de seca no verão, marcada por maior amplitude térmica (OVERBECK et al., 2015). Neste local, está localizada a tipologia CSR, com predomínio de gramíneas endêmicas que se desenvolvem sobre solos rasos, formados a partir de rochas eruptivas e, que devido às condições do solo foram pouco convertidas em outros usos (OVERBECK et al., 2015).

Na região centro-sul predomina a tipologia CMAC, a qual desenvolve-se sobre diferentes tipos de solo e caracteriza-se pela presença de dois estratos. No extrato mais baixo há o domínio de gramíneas rizomatosas (campo prostrado), enquanto no extrato mais alto prevalecem as gramíneas cespitosas e espécies compostas. Neste local, grande parte das áreas de campo já foram convertidas em lavouras (OVERBECK et al., 2015). A associação de solos de baixa qualidade, com pouca capacidade de retenção de água e períodos de estresse hídrico influenciados pelo clima local contribui para a alta variabilidade nos valores de EVI e GPP observados.

Enquanto o EVI reflete as variações estruturais do dossel, incluindo índice de área foliar, tipo de dossel, fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (HUETE et al., 2002), a GPP é capaz de quantificar a absorção fotossintética de carbono nos diferentes ecossistemas permitindo avaliar o ciclo do carbono (ZHANG et al., 2012). Por serem medidas espectrais de resposta da vegetação, o EVI e a GPP fornecem um meio de estimar e avaliar os padrões espaciais da produtividade da vegetação, bem como sua variação interanual e tendências de longo prazo da variabilidade climática.

3.2 Análise dos modelos

O Modelo 1 considerou a relação entre o somatório dos valores de EVI e GPP e apresentou o valor de R_a^2 de 0,59 para a tipologia CSR, R_a^2 de 0,07 para a CAL e R_a^2 de 0,13 para CMAC, (Tabela 1). Os valores observados entre o EVI e GPP, indicam em escala regional, o padrão da produtividade primária das 3 tipologias campestres consideradas no estudo. No entanto, a metodologia aplicada demonstrou maior capacidade de explicar a porcentagem (~60%) da variabilidade da produtividade dos campos, através do Modelo 1, apenas para a tipologia CSR. O valor obtido para a tipologia CSR aproxima-se do encontrado por Zhang et al. (2006), que relacionou o somatório do EVI à NPP (*Net Primary Production*) e obteve para vegetação campestre R^2 de 0,67. Zhang et al. (2006) consideram que o somatório do EVI reflete o padrão da produtividade primária de diferentes ecossistemas e pode ser utilizado como uma métrica da paisagem para explicar a fenologia da vegetação a partir de dados orbitais obtidos do sensor MODIS.

As diferenças obtidas nos valores do coeficiente de determinação ajustado refletem a alta biodiversidade dos campos no RS, caracterizada por espécies vegetais de alto valor forrageiro, com predomínio de vegetação herbácea. No RS são conhecidas mais de 2.600 espécies de plantas, pertencentes a 89 famílias, com diferentes variedades ou subespécies, sendo característica a coexistência de espécies C₃ e C₄, com diferentes eficiências na produção de biomassa. Destas, 2.150 espécies ocorrem nos Campos do bioma Pampa e 1.620 nos Campos do bioma Mata Atlântica (BOLDRINI et al., 2015). Cada uma das tipologias consideradas apresenta composição de espécies distintas, com capacidade de crescimento e desenvolvimento influenciada pelo tipo de solo, relevo, variabilidade climática e manejo dos campos, refletindo nos valores espectrais obtidos pelo sensor MODIS, e por consequência nos dados de EVI e GPP aqui apresentados.

Dadas estas características, buscou-se na delimitação das 3 tipologias utilizadas no estudo abranger a riqueza de composição de espécies e os diferentes estratos encontrados nos campos sulinos que associada a variabilidade climática reflète a capacidade do Modelo 1 em estimar a produtividade dos campos somente para a tipologia CSR. Além destes fatores, destaca-se que a tipologia CSR desenvolve-se sobre solos muito rasos de origem basáltica, pedregosos e com baixa capacidade de retenção hídrica, condição agravada pelo frequente déficit hídrico no verão (BOLDRINI et al., 2010), refletindo na resposta da produtividade dos campos dada pelo EVI. Sugere-se que para as tipologias CAL e CMAC é necessário o teste de outros modelos capazes de identificar a complexidade destes campos refletida pela sua biodiversidade formada a partir da heterogeneidade, de aspectos geográficos, como geologia, geomorfologia e clima.

Tabela 1. Resumo da estatística utilizada para avaliação dos modelos: coeficiente de determinação ajustado (R_a^2), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e *BIAS* para os de dados de EVI e GPP das tipologias CAL, CSR e CMAC. A tipologia campestre que apresentou melhor resultado é destacada em cinza.

Tipologias	Modelos					
	1			2		
	$\sum_{j=1}^{23} GPP_{ij} \sim \sum_{j=1}^{23} EVI_{ij}$			$\sum_{j=1}^{23} GPP_{ij} \sim \sum_{j=p}^q EVI_{ij}$		
	R_a^2	RMSE	<i>BIAS</i>	R_a^2	RMSE	<i>BIAS</i>
CAL	0,07	0,139	-0,043	0,10 (<i>Image from 1 to 5</i>)	0,134	-0,044
CSR	0,59	0,036	0,017	0,61 (<i>Image from 1 to 20</i>)	0,037	0,019
CMAC	0,13	0,068	0,026	0,16 (<i>Image from 5 to 11</i>)	0,069	0,022

Destaca-se o desempenho do Modelo 1 através da avaliação do RMSE para as tipologias CSR e CMAC (Tabela 1). O *BIAS* calculado demonstra que a variável EVI é superestimada em 0,017 unidade para a tipologia CSR e 0,026 para a tipologia CMAC. Já para os valores de CAL o *BIAS* indicou subestimativa do EVI de -0,044. Os baixos valores observados de RMSE e *BIAS* indicam forte relação entre os valores observados e estimados.

A partir da análise do R_a^2 delimitou-se como dados de entrada do Modelo 2 os seguintes intervalos: tipologia CAL – somatório das imagens de 1 a 5, tipologia CSR – somatório das imagens de 1 a 20 e tipologia CMAC – somatório das imagens de 5 a 11, a partir dos quais obteve-se valores de R_a^2 superiores ao Modelo 1 para as 3 tipologias. A tipologia CSR apresentou o maior valor de R_a^2 de 0,61 (Tabela 1). Para cada tipologia o período de resposta à estimativa da produtividade foi diferente. Para a tipologia CSR o Modelo 2 conseguiu antecipar a estimativa da produtividade em 2 meses considerando o período de análise de 1 a 23 imagens. Assim, utilizando o somatório das imagens de 1 a 20, no início de novembro (primavera) foi possível fornecer um indicativo da produtividade dos campos.

Para a tipologia CAL com apenas 6 imagens (Imagens 1 a 5) foi possível estimar a produtividade dos campos, enquanto para a tipologia CMAC, o modelo considerou o somatório das imagens de 5 a 11. Embora os valores de R_a^2 obtidos tenham sido baixos, especialmente para as tipologias CAL e CMAC, a metodologia aplicada indica a possibilidade de estimar a produtividade dos campos em menor período de tempo e/ou através de períodos variados. Isso foi demonstrado pela consistência dos valores de RMSE e *BIAS* obtidos pelo Modelo 2.

Considerou-se também, a avaliação do p valor dos coeficientes dos Modelos 1 e 2 (Tabela 2). Dessa maneira, observa-se para a tipologia CSR, a qual obteve os melhores valores de R_a^2 para ambos os modelos testados, que o Modelo 1 apresentou valor esperado na variação do somatório da GPP de 0,048 quando o somatório do EVI é variado em uma unidade, ou seja, se dois pixels distintos diferem em 10 unidades na soma de EVI, é esperado que o pixel com maior soma de EVI tenha 0,048 a mais de GPP. O modelo linear proposto apresenta uma relação significativa entre o EVI e a GPP, sendo que o aumento do EVI impacta no aumento da GPP. Este modelo foi capaz de explicar 59% da variabilidade do somatório da GPP.

O Modelo 2 foi capaz de explicar 61% da variabilidade do somatório da GPP para a tipologia CSR, com o valor esperado na variação do somatório da GPP de 0,054 quando o somatório de EVI é variado em uma unidade. Os resultados demonstram que é possível otimizar o tempo para a estimativa da produtividade dos campos similares à tipologia CSR utilizando nas análises períodos distintos de avaliação dos valores de EVI em relação a GPP.

Tabela 2. p valor dos coeficientes obtidos para os Modelos 1 e 2.

Tipologia	Coeficientes	Modelo 1				R_a^2
		Estimativa	Std. Error	t value	Pr(> t)	
CAL	Intercepto	0,301064	0,012021	25,04	<2e-16 ***	0,07
	$\sum EVI$	0,071465	0,001397	51,15	<2e-16 ***	
CSR	Intercepto	0,1693035	0,019466	86,97	<2e-16 ***	0,59
	$\sum EVI$	0,0481000	0,0002238	214,97	<2e-16 ***	
CMAC	Intercepto	0,4063743	0,0040545	100,23	<2e-16 ***	0,13
	$\sum EVI$	0,0299588	0,0004427	67,68	<2e-16 ***	

Tipologia	Coeficientes	Modelo 2				R_a^2
		Estimativa	Std. Error	t value	Pr(> t)	
CAL	Intercepto	0,377077	0,008748	43,10	<2e-16 ***	0,10
	$\sum EVI$	0,191050	0,003098	61,67	<2e-16 ***	
CSR	Intercepto	0,1739014	0,0018504	93,98	<2e-16 ***	0,61
	$\sum EVI$	0,0549227	0,0002455	223,72	<2e-16 ***	
CMAC	Intercepto	0,495788	0,002386	207,81	<2e-16 ***	0,16
	$\sum EVI$	0,085358	0,001096	77,88	<2e-16 ***	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

Além disso, os modelos testados foram capazes de indicar a produtividade da vegetação campestre utilizando como entrada de dados apenas uma variável dada pelo índice de vegetação EVI, com vantagem a GPP devido sua resolução espacial e temporal, o que reduz a necessidade de processamento de dados e fornece informações mais precisas. A metodologia aqui testada tem potencial para ser aplicada em outras plataformas com melhor resolução espacial e temporal como Landsat 8 OLI e Sentinel, por exemplo, aprimorando a qualidade dos dados de indicativo da produtividade primária, contribuindo em estudos que avaliem a quantidade, qualidade e conservação de forrageiras nativas utilizada como base alimentar da produção pecuária.

4. Considerações

Os modelos testados utilizando como entrada de dados apenas uma variável dada pelo índice de vegetação EVI apresentaram maior capacidade de explicar a porcentagem (~60%) da variabilidade da produtividade dos campos para a tipologia CSR. O Modelo 2 apresentou capacidade superior em reduzir a dimensionalidade temporal ao considerar períodos distintos de análise.

Trabalhos futuros considerando modelos de previsão de mudanças climáticas poderão utilizar como dado de entrada informações obtidas da tipologia CSR que apresentou ser mais suscetível às variações meteorológicas.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de Doutorado e ao Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE), pela concessão de bolsa de Doutorado Sanduíche para autora.

Referências

BALDOCCHI, D. et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 11, p. 2415-2434, 2001.

BEER, C. et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. **Science**, v. 329, n. 5993, p. 834-838, 2010.

BEHLING, H.; PILLAR, V.; ORLÓCI, L.; BAUERMANN, S.G. Late Quaternary Araucaria forest, grassland (Campos), fire and climate dynamics, studied by high resolution pollen, charcoal and multivariate analysis of the Cambará do Sul core in southern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 203, p. 277-297, 2004.

BOLDRINI, I.I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V.P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 63-77.

BOLDRINI, I.I. **Biodiversidade dos Campos do Planalto das Araucárias**. Brasília: MMA, 2009. 240 p.

BOLDRINI, I.I. et al. **Bioma Pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Pallotti, 2010. 64 p.

BOLDRINI, I.I.; LONGHI-WAGNER, H.M. Poaceae no Rio Grande do Sul: diversidade, importância na fisionomia e conservação. **Ciência & Ambiente**, v. 1, n. 42, p.71-92, 2011.

BOLDRINI, I.I.; OVERBECK, G.; TREVISAN, R. Biodiversidade de plantas. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Ed). **Os Campos do Sul. Rede Campos Sulinos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 51-56.

BOX, E.O.; HOLBEN, B.N.; KALB, V. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. **Plant Ecology**, v. 80, n. 2, p. 71-89, 1989.

CAO, M.; PRINCE, S. D.; SMALL, J.; GOETZ, S. J. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial Net Primary Productivity 1981 – 2000. **Ecosystems**, v. 7, p. 233-242, 2004.

CASTILHOS, Z.M. DE S.; MACHADO, M.D.; PINTO, M.F. Produção animal com conservação da flora do bioma Pampa. In: PILLAR, V.P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 199-205.

DALMAGO, G. et al. **Produtividade primária líquida do ambiente natural**: indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/852558/produtividade-primaria-liquida-do-ambiente-natural-indicador-de-sustentabilidade-de-sistemas-de-producao-agricola>. Acesso em: 14 de dez. 2017.

GUERSCHMAN, J.P.; PARUELO, J.M.; BURKE, I.C. Land use impacts on the Normalized Difference Vegetation Index in Temperate Argentina. **Ecological Applications**, v.13, n. 3, p. 616-628, 2003.

HASENACK, H.; WEBER, E.; BOLDRINI, I.I.; TREVISAN, R. **Mapa de sistemas ecológicos da ecorregião das savanas uruguaias em escala 1:500.000 ou superior e relatório técnico descrevendo insumos utilizados e metodologia de elaboração do mapa de sistemas ecológicos**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Centro de Ecologia/The Nature Conservancy, 2010. 22 p.

HERRERA, L.P.; TEXEIRA, M.; PARUELO, J.M. Fragment size, vegetation structure and physical environment control grassland functioning: a test based on artificial neural networks. **Applied Vegetation Science**, v. 16, n. 3, 2012.

HUETE, A. et al. Monitoring photosynthesis from space. In: THENKABAIL, P.S. (Ed.). **Land resources monitoring, modeling, and mapping with remote sensing**. USA: Taylor & Francis Group, 2015. p. 3-22.

HUETE, A.R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

JUNGES, A.H. et al. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. **Scientia Agricola**, v. 73, p. 332-337, 2016.

JUSTICE, C.O. et al. The Moderate Resolution Image Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

LEITE, L.A.K.; NASCIMENTO, N.O.; SPERLING, M.V. Desenvolvimento, utilização e análise de incertezas de modelos conceituais em Hidrologia. In: BARBOSA, F. (Org.). **Ângulos da Água: desafios da integração**. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2008. p. 110-131.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 93, n. 3, p. 747-766, 1972.

NEMANI, R. et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. **Science**, v. 300, p. 1560-1563, 2003.

OVERBECK, G.E. et al. Fisionomia dos Campos. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Ed.) **Os Campos do Sul. Rede Campos Sulinos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 31-39.

PARUELO, J.M.; EPSTEIN, H.E.; LAUENROTH, W.K.; BURJE, I.C. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. **Ecology**, v. 78, p. 953-958, 1997.

PILLAR, V.; BOLDRINI, I.I.; BENCKE, G.; MEDEIROS, R. Campos do Sul. In: SACARANO, F.R. et al. (Ed.). **Biomass Brasileiros: retratos de um país plural**. Rio de Janeiro: Casa da Palavra, Conservação Internacional, 2012. p. 200-235.

POTTER, C.; KLOOSTER, S.; GENOVESE, V. Net Primary Production of terrestrial ecosystems from 2000 to 2009. **Climatic Change**, v. 115, n. 2, p. 365-378, 2012.

RATANA, P.; HUETE, A.R.; FERREIRA, L. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. **Earth Interactions**, v. 9, n. 3, p. 1-22, 2005.

REBOITA, M.S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

RESTREPO-COUBE, N. et al. MODIS vegetation products as proxies of photosynthetic potential: a look across meteorological and biologic driven ecosystem productivity. **Biogeosciences Discussions**, v 12, p. 19213–19267, 2015.

RUNNING, S.W., ZHAO, M. **User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm, 2015**. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product_documentation/mod17_user_guide.pdf. Acesso em: 23 de ago. 2017.

RUNNING, S.W.; NEMANI, R.R.; HEINSCH, F.A.; ZHAO, M.S.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. **Bioscience**, v. 54, n. 6, p. 547-560, 2004.

SILVA, B.B. da.; BRAGA, C.C.; BRAGA, A.C. Determinação da Produtividade primária bruta da Bacia do Taperoá-PB e perímetro irrigado São Gonçalo-PB por sensoriamento remoto. In: SILVA, B.B. da (Org.). **Aplicações ambientais brasileiras de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**. Campina Grande: EDUFCEG, 2013. p. 9-22.

SINGH, D. Generation and evaluation of gross primary productivity using Landsat data through blending with MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 13, n. 1, p. 59-69, 2011.

SOLANO, R.; DIDAN, K.; JACOBSON, A.; HUETE, A. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series) Version 2.00, May 2010, (Collection 5)**. Disponível em: https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2012.pdf. Acesso em: 27 de set. 2017.

SOUZA, M. C. et al. Estimation of Gross Primary Production of the Amazon-Cerrado transitional forest by Remote Sensing techniques. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 1-12, 2014.

TRENTIN, C.B.; SALDANHA, D. L.; FONSECA, E.L. Influência da sazonalidade em área de vegetação campestre natural no bioma Pampa. **Geografia**, v. 40, n. 2, p. 259-267, 2015.

WEBER, E.J.; HOFFMANN, G.S.; OLIVEIRA, C.V.; HASENACK, H. **Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2009**. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Ecologia. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/labgeo/>. Acesso em: 12 de jul. 2017.

WU, C.; NIU, Z.; GAO, S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. 12, p. 1-11, 2010.

ZHANG, F. et al. Evaluating spatial and temporal patterns of MODIS GPP over the conterminous U.S. against flux measurements and a process model. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 717-729, 2012.

ZHANG, L. Evaluation and comparison of gross primary production estimates for the Northern Great Plains grasslands. **Remote Sensing of Environment**, n. 106, p. 173-189, 2007.

ZHANG, Q. et al. Estimation of crop gross primary production (GPP): fAPARchl versus MOD15A2 FPAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 153, n. 1, p. 1-6, 2014.

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.111, p. 1-14, 2006.

ZHAO, M., HEINSCH, F.A., NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, p. 164–176, 2005.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos e apresentados na forma de artigos permitiram responder ao objetivo geral da pesquisa que consistiu em *Utilizar indicadores biofísicos oriundos dos produtos MODIS para identificar o padrão fenológico médio das diferentes tipologias campestres do estado do Rio Grande do Sul e relacionar sua variabilidade às variáveis meteorológicas*. O uso de séries temporais de dados NDVI e EVI/MODIS resultaram na obtenção de informações sobre a fenologia da vegetação campestre e a definição de padrões diretamente relacionados às variações meteorológicas.

As tipologias estudadas apresentaram perfis temporais de EVI e NDVI consistentes com a dinâmica sazonal da vegetação campestre sob influência de clima subtropical, com maiores valores nos índices durante as estações quentes do ano (primavera e verão) e menores valores nas estações mais frias (outono e inverno). Ambos os índices mostraram maior variabilidade durante a primavera e o verão, com diminuição durante o outono e inverno.

A sazonalidade da vegetação campestre possui ciclo anual bem marcado, com início e fim da estação de crescimento determinada pelas condições térmicas (temperatura do ar), porém alterado pela disponibilidade hídrica. A relação entre temperatura do ar e vigor vegetal apresentou maior correlação e tem influência direta sobre o início e fim da estação de crescimento (primavera e verão). A precipitação pluvial, no entanto, influencia as condições de crescimento/desenvolvimento das tipologias campestres, principalmente durante períodos de estiagem ou déficit hídrico.

A aplicação da Transformada de Ondaleta permitiu identificar onde e quando ocorreram alterações no padrão fenológico da vegetação campestre e a Transformada Coerência apontou a intensidade (correlação) entre os índices de vegetação e a variabilidade das condições meteorológicas. A correlação entre a temperatura do ar e a precipitação pluvial e os índices de vegetação foi verificada por meio da Transformada Coerência, sendo que a maior intensidade do sinal (alta frequência) se mostrou mais evidente para os dados de EVI e temperatura do ar.

Embora a temperatura do ar tenha demonstrado alta correlação com os índices de vegetação no período anual, foi a precipitação pluvial que durante eventos de El Niño e La Niña apresentou alta coerência para a maioria das tipologias campestres. Durante os eventos de El Niño e La Niña houve alteração no padrão sazonal da vegetação campestre, com aumento nos valores de NDVI e EVI durante o El Niño, associado ao aumento de precipitação pluvial no Estado e decréscimo durante La Niña, quando há diminuição da precipitação pluvial e temperatura do ar inferior a média climatológica.

A análise de agrupamento das tipologias com características similares, considerando os valores de EVI e NDVI, indicou a formação de quatro grupos com perfis temporais semelhantes. Grupos distintos foram formados, denotando as diferentes sensibilidades dos índices analisados, associadas às bandas espectrais utilizadas em sua elaboração, resultando em diferentes potenciais na identificação de variações na dinâmica sazonal das tipologias. A discriminação das tipologias campestres para ambos os índices é fortemente condicionada pela variação da temperatura do ar. Observou-se que dentre os grupos formados e para a série temporal considerada, a partir do índice EVI há a possibilidade de identificar diferenças entre as tipologias durante o outono e inverno, enquanto o NDVI apresentou diferença somente no inverno em relação às demais estações do ano. Destaca-se que o EVI possui capacidade superior ao NDVI em diferenciar as tipologias campestres considerando-se as estações do ano. Ainda, a definição de grupos distintos denota a necessidade da elaboração de medidas de conservação e manejo de acordo com o agrupamento das tipologias, as quais refletem a capacidade de crescimento e desenvolvimento dos campos condicionada pela composição de espécies, tipo de solo, relevo, variabilidade climática e pelo próprio manejo a que são submetidas.

Os resultados obtidos do padrão médio das métricas fenológicas permitiu identificar que apesar do padrão anual similar, com base nos dados de EVI, há diferenças na fenologia da vegetação campestre entre as tipologias predominantes no RS. O agrupamento das tipologias com base no padrão de distribuição espacial entre as métricas fenológicas difere da análise de agrupamento (Cluster), mas confirma que a sazonalidade no padrão fenológico da vegetação campestre está associada a variação da temperatura do ar.

A série temporal de dados estimados do TRMM e ERA Interim para o RS apresentou valores consistentes indicando a possibilidade do uso de dados estimados como alternativa para minimizar a carência de informações sobre precipitação pluvial e temperatura do ar obtidas em rede de estações de superfície, muitas vezes limitada em função de investimentos, problemas técnicos, dificuldade de acesso, erros de coleta, falhas nos dados e distribuição espacial inadequada. Na análise entre os índices de vegetação e os valores de precipitação pluvial do TRMM, a correlação tende a ser superior durante a primavera, o verão e o outono. Enquanto que para a temperatura do ar do ERA Interim destaca-se a melhor representação dos índices de vegetação para o inverno.

Embora os resultados obtidos da relação entre os índices de vegetação e os dados meteorológicos estimados sejam satisfatórios e semelhantes ao observado na literatura, é importante salientar as limitações encontradas para a formação de uma base de dados com o intuito de obter informação sobre a dinâmica da resposta da vegetação campestre e a

variabilidade climática no RS, tais como: a descontinuidade na obtenção de dados do TRMM e sua substituição pelo GPM (*Global Precipitation Measurement*), acarretando a necessidade de análises para validação dos dados de precipitação pluvial para o Estado, a moderada resolução espacial e temporal dos índices de vegetação e meteorológicos estimados, o período de análise compreendido dada a reduzida série de dados, e principalmente, a fragmentação e conversão do campo nativo para outros usos dificultando a obtenção de dados de sensoriamento remoto sem mistura espectral.

De modo semelhante, na avaliação da elaboração de um modelo simplificado para indicativo da produtividade dos campos no RS, a partir do índice de vegetação EVI e da GPP também foram identificadas limitações quanto à resolução espacial e temporal dos dados espectrais. Apesar dos modelos testados terem sido capazes de indicar a produtividade da vegetação campestre com maior eficiência para a tipologia CSR (campos de solos rasos), cabe destacar que os modelos utilizaram como entrada de dados apenas uma variável dada pelo índice de vegetação EVI, com vantagem à GPP, o que reduz a necessidade de processamento de dados e fornece informações mais precisas devido a melhor resolução espacial.

A metodologia testada tem potencial para ser aplicada em outras plataformas com melhor resolução espacial e temporal, aprimorando a qualidade dos dados de indicativo da produtividade primária, contribuindo em estudos que avaliem a quantidade, qualidade e conservação de forrageiras nativas utilizada como base alimentar da produção pecuária. Indica-se, que trabalhos futuros considerando modelos de previsão de mudanças climáticas, poderão utilizar como dado de entrada informações obtidas da tipologia CSR, que apresentou ser mais suscetível às variações meteorológicas.

As análises apresentadas permitiram confirmar a diversidade entre as tipologias campestres predominantes no RS, expressas por índices de vegetação, tanto no aspecto temporal como espacial. A pesquisa foi capaz de revelar o padrão sazonal das diferentes tipologias, sinalizando necessidades de manejo distintas em futuras e urgentes atividades de conservação, bem como, servindo de referência para trabalhos futuros com enfoque na variabilidade climática e fenologia da vegetação campestre.

Sugere-se avaliar em trabalhos futuros a relação entre o rendimento dos campos para cada tipologia sob diferentes condições de manejo, tipo de solo, relevo e a variabilidade de elementos meteorológicos como umidade do ar e disponibilidade de radiação solar com base em dados observados e estimados e em diferentes escalas temporal e espacial de dados de sensoriamento remoto.