

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA PRECIPITAÇÃO NA VARIAÇÃO ANUAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM ÁREA DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL, NO SUDOESTE DO PARANÁ, BRASIL

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION ON THE ANNUAL VARIATION OF VEGETATION INDEX IN THE SEMIDECIDUOUS SEASONAL FOREST AREA, IN THE SOUTHWEST OF PARANÁ, BRAZIL

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN LA VARIACIÓN ANUAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN EN EL ÁREA DE BOSQUE ATLÁNTICO SEMIDECIDUO, EN EL SUROESTE DE PARANÁ, BRASIL

Fabiano André Marion

Doutor em Geografia, Professor Adjunto do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Francisco Beltrão/PR, fabiano.marion@unioeste.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8762-315X>

Juliano Andres

Doutor em Geografia, Professor Associado do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Francisco Beltrão/PR, juliano.andres@unioeste.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1206-6483>

Elvis Rabuske Hendges

Doutor em Engenharia Florestal, Professor Associado do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Francisco Beltrão/PR, elvis.hendges@unioeste.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2304-5634>

Karine Belon

Especialista em Docência no Ensino Superior, Professora do Magistério Público da Secretaria Estadual de Educação do Estado do Paraná – SEED/PR, Francisco Beltrão/PR, karine.belon@escola.pr.gov.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9198-9356>

RESUMO: Os índices de vegetação (IVs) possuem como função realçar o sinal da vegetação e minimizar as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal. As séries temporais de imagens de cobertura vegetal apresentam diferentes componentes de frequência, como variações sazonais e flutuações de longo e curto prazo, influenciados principalmente pelos fatores climáticos da temperatura e da precipitação. Assim, o trabalho visa avaliar a influência da temperatura e da precipitação na variação anual do NDVI (*normalized difference vegetation index*), do RENDVI (*red edge normalized difference vegetation index*) e do EVI (*enhanced vegetation index*), em área de floresta estacional semidecidual, a qual abrange parte dos municípios de Marmeleiro e de Renascença, no sudoeste do Estado do Paraná. Foram utilizadas sete imagens do satélite RapidEye (nível 3A) disponíveis para o ano de 2018 sem cobertura de nuvens. A variação sazonal demonstrou que os maiores valores de IVs da vegetação foram encontrados no verão, uma vez que a temperatura e a precipitação contribuem para elevá-los na área de estudo, sendo a resposta à temperatura mais rápida que à precipitação. O EVI apresentou melhor correlação com a temperatura média mínima e com a temperatura média, pelo fato de ser mais influenciado pelo índice de área foliar (IAF), que é controlado pelas estações do ano. Por outro lado, o NDVI e o RENDVI são mais influenciados pela precipitação e apresentaram maior correlação com a precipitação acumulada entre 30 e 60 dias anteriores ao imageamento.

Palavras-chave: NDVI, RENDVI, EVI, Sensoriamento remoto, satélite RapidEye.

ABSTRACT: Vegetation indices (VIs) are designed to enhance the vegetation signal and minimize variations in solar irradiance and the effects of the plant canopy substrate. The time series of vegetation cover images present different frequency components, such as seasonal variations and long and short-term fluctuations, influenced mainly by climatic factors such as temperature and precipitation. Thus, the work aims to evaluate the influence of temperature and precipitation on the annual variation of NDVI (normalized difference vegetation index), RENDVI (red edge normalized difference vegetation index) and EVI (enhanced vegetation index), in an area of semideciduous seasonal forest, which covers part of the municipalities of Marmeleiro and Renascença, in the southwest of the State of Paraná. Seven images from the RapidEye satellite (level 3A) available for the year 2018 without cloud cover were used. Seasonal variation demonstrated that the highest values of vegetation IVs were found in summer, since temperature and precipitation contribute to raising them in the study area, with the response to temperature being faster than to precipitation. The EVI showed a better correlation with the minimum average temperature and the average temperature, because it is more influenced by the leaf area index (LAI), which is controlled by the seasons. On the other hand, NDVI and RENDVI are more influenced by precipitation and showed a greater correlation with accumulated precipitation between 30 and 60 days prior to imaging.

Keywords: NDVI, RENDVI, EVI, Remote Sensing, RapidEye satellite.

RESUMEN: Los índices de vegetación (IVs) actúan para mejorar la señal de la vegetación y minimizar las variaciones en la irradiancia solar y los efectos del sustrato del dosel vegetal. Las series temporales de imágenes de cobertura vegetal presentan diferentes componentes de frecuencia, como variaciones estacionales y fluctuaciones de largo y corto plazo, influenciadas principalmente por factores climáticos como la temperatura y la precipitación. Así, el estudio tiene por objetivo evaluar la influencia de la temperatura y la precipitación en la variación anual del NDVI (índice de vegetación diferenciado normalizado), RENDVI (índice de vegetación diferenciado normalizado borde rojo) y EVI (índice de vegetación mejorado), en una zona de bosque atlántico semideciduo, que cubre parte de los municipios de Marmeleiro y Renascença, en el suroeste del Estado de Paraná. Fueron utilizados siete imágenes del satélite RapidEye (nivel 3A) disponibles para el año de 2018 sin nubosidad. La variación estacional demostró que los mayores valores de IV de la vegetación se encontraron en el verano, ya que la temperatura y la precipitación contribuyen para elevarlos en el área de estudio, siendo la respuesta a la temperatura más rápida que a la precipitación. El EVI presentó una mejor correlación con la temperatura mínima media y la temperatura media, debido a que está más influenciado por el índice de área foliar (IAF), que es controlado por las estaciones. Sin embargo, NDVI y RENDVI son más influenciados por la precipitación y presentaron una más grande correlación con la precipitación acumulada entre 30 y 60 días antes de la obtención de las imágenes.

Palabras clave: NDVI, RENDVI, EVI, Teledetección, satélite RapidEye.

1. INTRODUÇÃO

Os índices de vegetação (IVs) são transformações de duas ou mais bandas baseadas na resposta da vegetação, geralmente na porção espectral do vermelho e do infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético (XUE; SU, 2017). Essas faixas espectrais são as mais importantes no estudo da vegetação, uma vez que detêm mais de 90% da variação de sua resposta espectral (BARET; GUYOT; MAJOR, 1989). O contraste entre a baixa quantidade de energia refletida no vermelho e alta reflectância do IVP foi o foco que impulsionou a criação do primeiro IV por Rouse et al. (1973). Os IVs são obtidos por operações aritméticas entre composições de bandas espectrais, cuja função é realçar o sinal da vegetação e minimizar as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal, amenizando os efeitos externos ao alvo (JACKSON; HUETE, 1991).

Entre os principais IVs gerados para monitoramento da vegetação, a partir de imagens RapidEye, constam o NDVI (*normalized difference vegetation index*), o RENDVI (*red edge normalized difference vegetation index*) e o EVI (*enhanced vegetation index*). Criado por Rouse et al. (1973), o NDVI foi o primeiro índice de vegetação normalizado e ainda é o mais empregado (AYANLADE, 2017; XUE; SU, 2017; SOLYMOSI; KÖVÉR; ROMVÁRI, 2019). O RENDVI foi criado por Gitelson, Merzlyak e Lichtenthaler (1996) com o objetivo de captar a concentração de clorofila com maior sensibilidade. Apesar do seu potencial em estudos da vegetação é ainda pouco utilizado, por ser imprescindível a borda do vermelho na sua equação. O EVI foi proposto por Huete et al. (2002) para eliminar os fatores perturbadores provenientes, tanto do solo quanto dos efeitos atmosféricos, incorpora, além do fator de ajuste para solos (L), dois coeficientes de correção e o uso da banda azul para corrigir o espalhamento atmosférico por aerossóis. Contudo, devido à maior dependência da reflectância no IVP e por não ser efetivamente normalizado, ele é mais sensível aos efeitos direcionais quando comparado com o NDVI e o RENDVI (GALVÃO et al., 2016).

As séries temporais de imagens de cobertura vegetal e fatores climáticos, geralmente não são estacionárias, ou seja, apresentam componentes de frequências diferentes, como variações sazonais e flutuações de longo e curto prazo, influenciando nos IVs de diferentes formas (PAN; GAO; WANG, 2018). Dentre os fatores climáticos que influenciam na resposta da vegetação aos IVs, destacam-se a temperatura e a precipitação, cuja ordem de importância e o reflexo à precipitação dependem das características ambientais da área em estudo (LIU et al., 2015).

Em áreas semiáridas, Santos, Baptista e Moura (2017) analisaram o comportamento do NDVI e do EVI e sua relação com a precipitação. Eles identificaram que os picos nos valores dos IVs coincidem com os maiores valores de chuva acumulada nos 30 dias anteriores ao imageamento, e que, devido à saturação do NDVI, este apresentou valores superiores ao EVI. Fu e Burgher (2015), utilizando o NDVI, identificaram 28 dias como tempo de resposta da vegetação às chuvas. Pan, Gao e Wang (2018) examinaram a resposta do NDVI e do EVI a diversos fatores climáticos na Alxa League/China e constataram que eles tiveram período de atraso entre 1 e 3 meses. A maior correlação positiva encontrada foi com a precipitação e a maior correlação negativa com a temperatura máxima. Para os autores, o EVI apresentou melhor relação com os fatores climáticos.

Ao analisarem a dinâmica do NDVI e do EVI em área de floresta estacional decidual subtropical, Rosa et al. (2013) observaram que a resposta espectral da floresta às variações de precipitação não é imediata. As melhores correlações para a precipitação foram encontradas para o EVI com um mês de atraso e para o NDVI com três meses de atraso. Para a mesma fitofisionomia e também utilizando o NDVI e o EVI, Dalla Nora e Martini (2010) encontraram maior correlação com as variações de temperatura do que com a precipitação. Concluíram também que o EVI é mais sensível às variações anuais da vegetação em relação ao NDVI.

Rosemback et al. (2010), Costa e Guasselli (2017) e Quesada et al. (2017) analisaram a variação do NDVI da cobertura vegetal na região Sul do Brasil e concluíram que períodos secos acarretam anomalias negativas de NDVI e períodos chuvosos geram anomalias positivas. Em especial, a floresta estacional semidecidual (FES) apresentou altos valores de NDVI em todas as estações, com declínio nos meses de julho a setembro, devido às quedas na temperatura e na precipitação durante o inverno.

A FES, tem como característica fisionômica o fato de 20 a 50% do dossel das árvores da floresta perderem suas folhas no inverno (IBGE, 2012). Em consequência disso, nas áreas florestais com presença de espécies decíduas, há perda de fitomassa durante o inverno, o que reduz a oferta de pigmentos fotossintetizantes, fazendo com que a refletância na faixa do vermelho seja ligeiramente superior, enquanto a faixa do infravermelho tem grande redução em sua refletância e, por isso, valores de IV mais baixos (GAIDA et al., 2016; CORDEIRO et al., 2017). Assim, o trabalho tem por objetivo avaliar a influência da temperatura e da precipitação na variação anual do NDVI, do RENDVI e do EVI em área de floresta estacional semidecidual, a qual abrange parte dos municípios de Marmeleiro e de Renascença, no Sudoeste do Estado do Paraná (SW/PR).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se no SW/PR, abrangendo parte dos municípios de Marmeleiro e de Renascença (figura 1), e foi escolhida pela maior facilidade nos deslocamentos para a realização dos trabalhos de campo. Situa-se no Terceiro Planalto Paranaense, formado por rochas efusivas básicas e ácidas pertencentes à formação Serra Geral (Jurássico superior – Cretáceo inferior) (BREA; ZUCOL, 2011). A área está inserida no Planalto de Francisco Beltrão, que apresenta dissecação média, topos alongados, vertentes convexas, vales em “V” aberto e declividade predominante entre 12-30% (SANTOS et al., 2009).

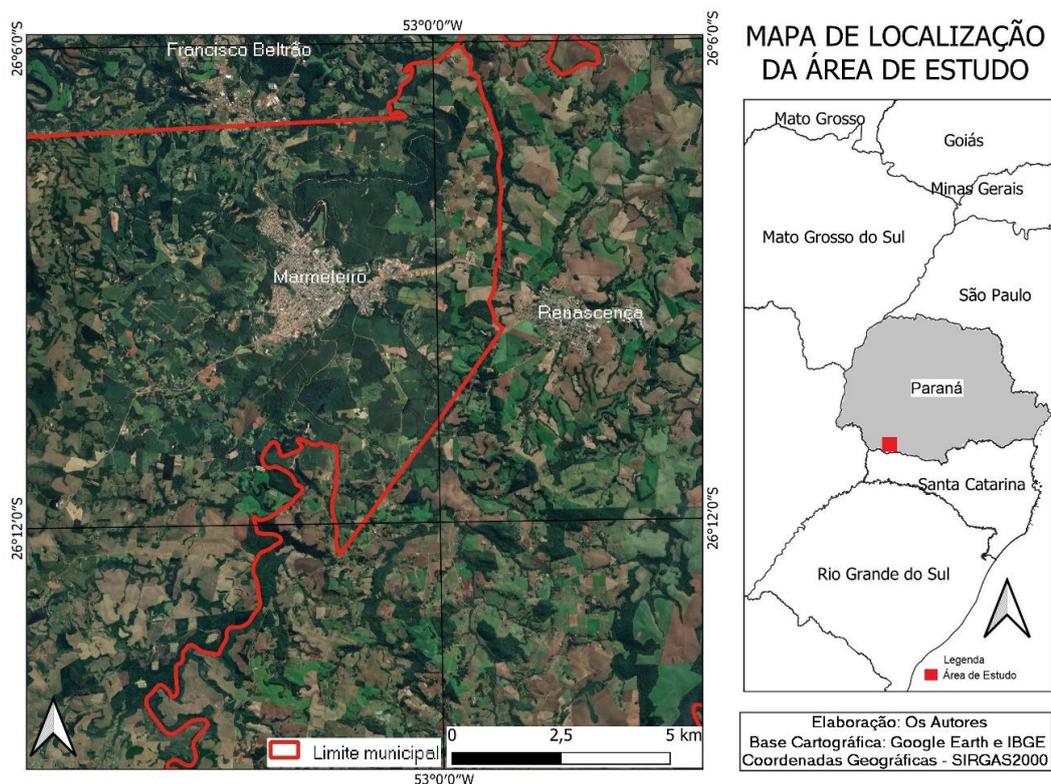


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a maior parte do SW/PR abrange o clima Cfa (subtropical, com verão quente), onde está localizada a área de estudo, e nas áreas mais altas o clima Cfb (temperado, com verão ameno) (ALVARES et al., 2013). A precipitação no SW/PR é influenciada principalmente pelo relevo. As regiões mais altas próximas à divisa com o estado de Santa Catarina (SC), registram médias anuais de até 2.170 mm, enquanto as porções mais baixas, próximas ao rio Iguaçu, registram média de até 1.920 mm (CALDANA et al., 2019).

Conforme dados históricos da estação meteorológica de Francisco Beltrão (IAPAR, 2019), a temperatura média anual é de 19,2°C (média máxima = 26°C e média mínima = 14°C), sendo o verão chuvoso, com temperatura média de 24,2°C, e o inverno geralmente seco, com temperatura média de 15,1°C, sujeito às geadas. Janeiro apresenta média acumulada de 190,7 mm mensais e fevereiro, 170 mm, enquanto os meses de julho e agosto apresentam a menor média acumulada mensal, 132,1 e 112,1 mm, respectivamente (IAPAR, 2019), conforme ilustra a figura 2.

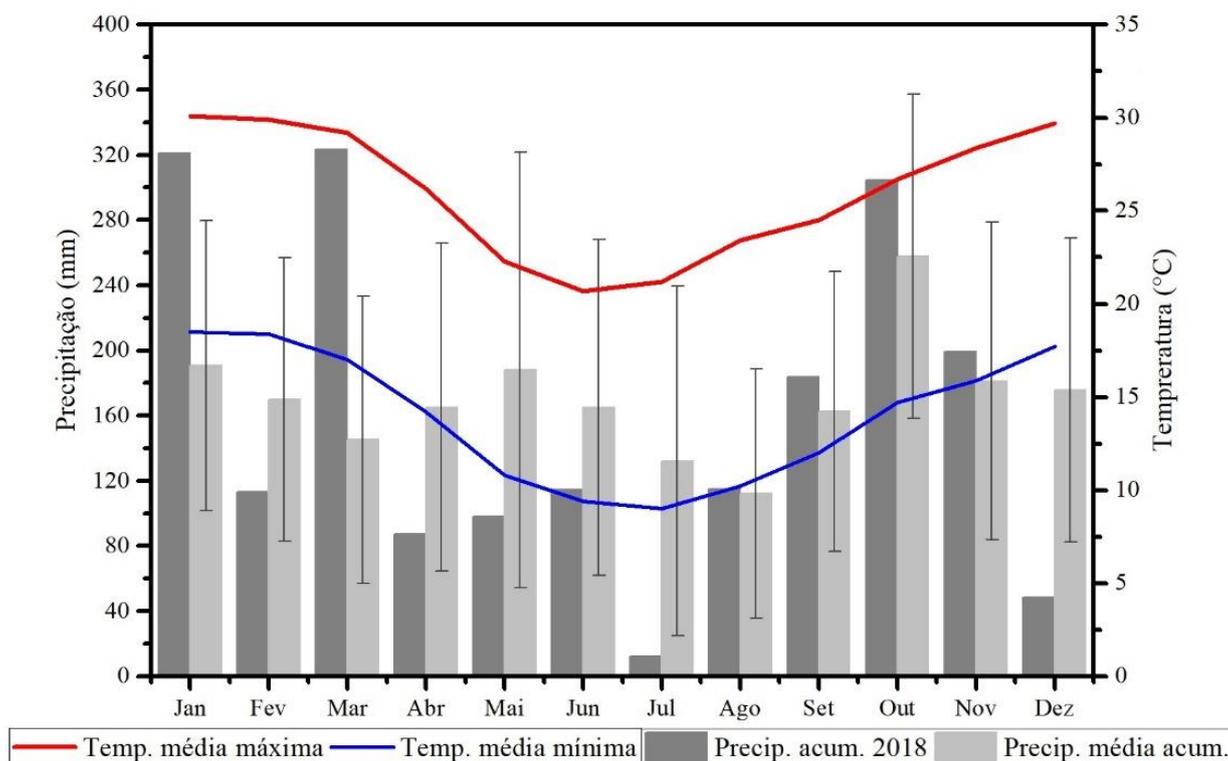


Figura 2 – Distribuição anual das médias mensais de temperatura (°C) e de precipitação acumulada (mm) (1974 – 2018) e de precipitação acumulada (2018): estação meteorológica de Francisco Beltrão – PR. Fonte: IAPAR (2019). Elaborado pelos autores (2024).

Conforme explicam Grimm, Ferraz e Gomes (1998), no SW/PR os valores relativamente elevados de chuva, principalmente na primavera, estão associados aos aglomerados convectivos de mesoescala, sistemas de instabilidade que tipicamente se originam no Noroeste da Argentina e do Paraguai e se deslocam pelo Sul do Brasil, com chuvas intensas, deslocamento rápido e duração de pouco mais que um dia.

2.2 Procedimentos metodológicos

Para encontrar a variação anual dos valores de NDVI, de RENDVI e de EVI, foram verificadas as cenas do sensor RapidEye disponibilizadas pela empresa Planet Labs e que cobrem a área de estudo no ano de 2018 (PLANET TEAM, 2018). Optou-se por esse ano devido a maior disponibilidade de imagens sem a presença de nuvens.

As imagens RapidEye são coletadas pelo sensor em 12 bits, por constelação composta de cinco satélites idênticos e em mesma órbita. Durante o processamento, as correções radiométricas são aplicadas e as imagens são dimensionadas para 16 bits. O produto RapidEye nível 3A apresenta correção geométrica e ortorretificação com resolução espacial nominal de cinco metros e cinco bandas espectrais (em nm): azul (440-510), verde (520-590), vermelho (630-68), borda do vermelho (690-730) e infravermelho próximo - IVP (790-850) (RAPIDEYE, 2016).

A obtenção dos valores de reflectância de superfície da imagem ocorreu pela aplicação de um modelo de transferência radiativa. Conforme Gaida et al. (2020), são assim denominados por utilizarem medidas ou estimativas físicas de parâmetros atmosféricos para a correção das imagens, usando equações diferenciais e integrais, e tendem a apresentar resultados mais

precisos que os métodos empíricos. Optou-se pelo modelo FLAASH (*fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes*), disponível no programa ENVI 5.3 (HARRIS, 2015), por ser um método físico e possuir uma interface de fácil interação com o usuário.

A calibração radiométrica da imagem seguida da aplicação do modelo FLAASH, foi realizada com os seguintes parâmetros: visibilidade padrão de 50 km e o modelo de aerossol rural. Foram utilizadas as características de aquisição das imagens pré-selecionadas descritas no arquivo “metadata” e o modelo atmosférico utilizado na correção para cada imagem, conforme o quadro 1. Após realizada a correção, foram selecionados pontos aleatórios com vegetação e gerados espectros de reflectância para a sua validação.

Quadro 1 – Características das imagens Rapideye pré-selecionadas e modelo utilizado na correção atmosférica.

Satélite	Data de aquisição	Ângulo zenital solar - AZS	Ângulo zenital de visada - AZV	Modelo utilizado na correção atmosférica
Rapideye 3	08/01/2018	26,17°	16,674°	Subtropical verão
Rapideye 2	24/03/2018	37,62°	10,140°	Subtropical verão
Rapideye 1	10/05/2018	48,92°	-14,660°	Subtropical inverno
Rapideye 2	12/07/2018	56,28°	13,360°	Subtropical inverno
Rapideye 2	19/08/2018	48,63°	13,360°	Subtropical inverno
Rapideye 1	10/09/2018	40,01°	0,354°	Subtropical inverno
Rapideye 4	07/12/2018	26,78°	13,380°	Subtropical verão

Fonte: PLANET LABS (2018). Organização: Os autores (2024).

Para as sete imagens apresentadas no Quadro 1, foram gerados os índices a partir da equação 1 (NDVI), equação 2 (RENDVI) e equação 3 (EVI), por álgebra de bandas, e agrupados em uma única imagem para facilitar a extração dos IVs. Os valores dos coeficientes utilizados na equação do EVI, foram 6,0, 7,5 e 1,0, respectivamente para C1, C2 e L. Optou-se por utilizar 1 como valor de L (fator de ajuste para o solo), por esse ser o mais utilizado e considerado adequado para o monitoramento global dos biomas (HUETE et al., 1992).

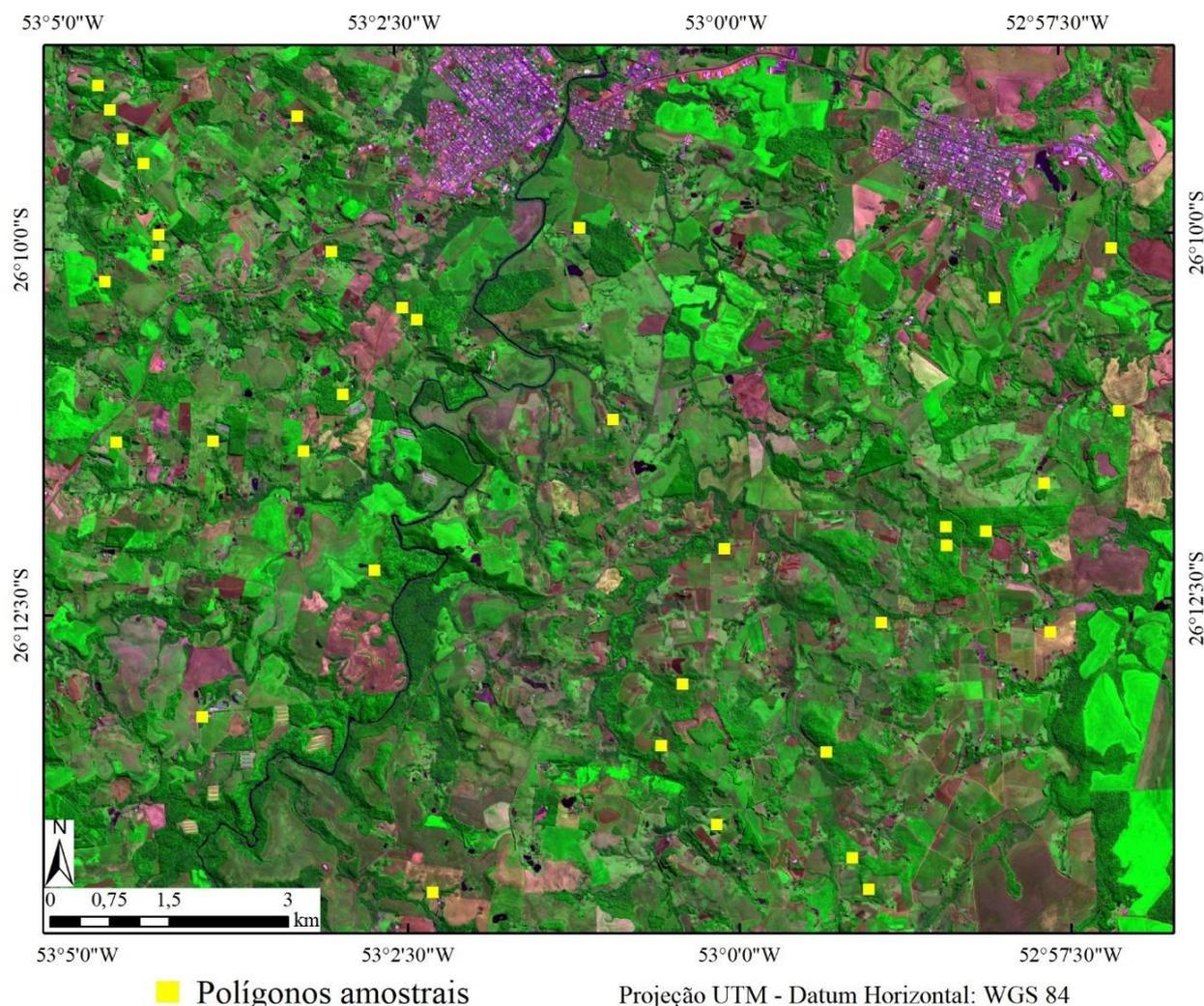
$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (1)$$

$$RENDVI = (\rho_{IVP} - \rho_{BV}) / (\rho_{IVP} + \rho_{BV}) \quad (2)$$

$$EVI = 2,5 * (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + (C1 * \rho_V) - (C2 * \rho_A)) + L \quad (3)$$

Em que: ρ_{IVP} , ρ_V , ρ_{BV} e ρ_A = valores de reflectância das bandas do infravermelho próximo, vermelho, borda do vermelho e do azul, respectivamente.

A partir da identificação de áreas de vegetação nativa na imagem (figura 3), foram criados 36 polígonos amostrais para extrair os valores de NDVI, RENDVI e EVI para as sete imagens. A fim de verificar se todas as áreas amostrais se enquadravam no estágio sucessional arbóreo, realizou-se a validação em campo.



Fonte: RapidEye 315 RGB, 10/09/2018, Planet Labs (2018) - Sem aplicação de contraste

Figura 3 – Distribuição dos polígonos amostrais utilizados para a extração dos IVs nas áreas de FES. Elaboração: Os autores (2024).

A partir de dados da estação meteorológica de Francisco Beltrão, disponibilizados pelo IAPAR (2019), foram gerados gráficos e correlacionados com os valores médios de NDVI, RENDVI e EVI, através do coeficiente de determinação (r^2) com a temperatura média mínima, média e média máxima e com a precipitação acumulada dos últimos 30 dias que antecederam cada imageamento. Para verificar um possível atraso na resposta da vegetação aos IVs, conforme apontado por Pan, Gao e Wang (2018), foi correlacionada também a precipitação acumulada entre 30 e 60 dias que antecederam ao imageamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de reflectância das bandas das cenas RapidEye, obtidos a partir dos polígonos amostrais em áreas de FES, apresentaram diferenças em função da sazonalidade da vegetação e das condições de iluminação. Esses valores são representados na figura 4, em função do comprimento de onda central de cada banda: azul (475 nm), verde (555 nm), vermelho (660 nm), borda do vermelho (710 nm) e o IVP (820 nm).

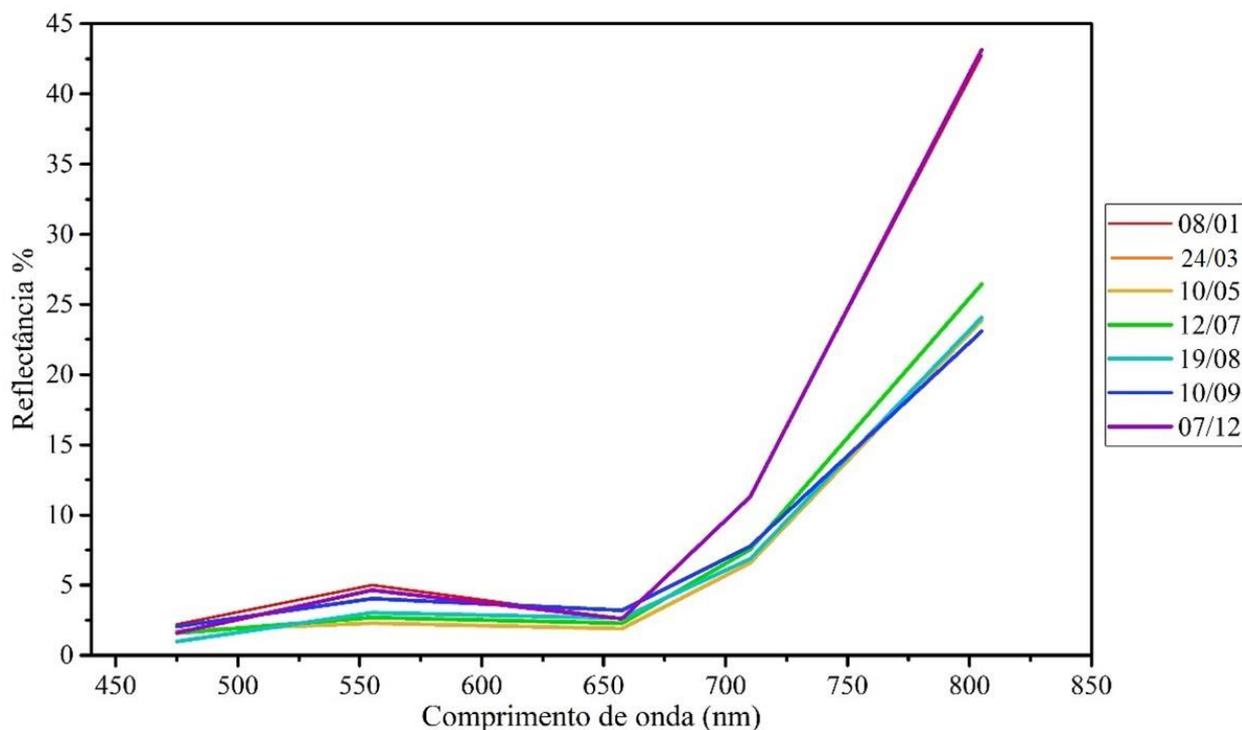


Figura 4 – Variação espectral da vegetação a partir dos polígonos amostrais. Fonte: Os autores (2024).

Observou-se, na figura 4, as linhas em vermelho e roxo que se sobrepõem e correspondem às imagens dos dias 08/01/2018 e 07/12/2018, verão, as quais apresentaram maiores temperaturas e maior intensidade das chuvas, resultando no período de maior atividade fenológica. Além disso, no verão, o menor AZS ($26,17^\circ$ para 08/01/2018 e $26,78^\circ$ para 07/12/2018) contribuiu para maior reflectância na banda do IVP (820 nm), e de forma menos acentuada, na banda verde (555 nm).

No outono, conforme é observado nas imagens dos dias 24/03 e 10/05, linhas em laranja (figura 4), iniciou-se a queda acentuada na reflectância da banda do IVP, em função do decréscimo da atividade fenológica e do início da perda foliar por algumas espécies. Além do aumento do AZS ($48,92^\circ$), o efeito causado pelo AZV ($-14,66^\circ$) colaborou com a diminuição da reflectância nas bandas do verde e do vermelho (660 nm), as quais apresentaram maior anisotropia (BREUNIG et al., 2015). Conforme o quadro 1, a imagem do dia 10/05 é a única, entre as imagens fora do nadir, que apresentou o ângulo de visada negativo (espalhamento frontal).

No inverno, estação que apresentou maior quantidade de imagens disponíveis para a análise (dias 12/07, 19/08 e 10/09), ocorreu um decréscimo significativo da atividade fenológica, o qual promoveu queda das folhas de algumas espécies que compõem a FES, associado ao período com menores temperaturas e redução das chuvas. Isso refletiu na acentuada diminuição na reflectância do IVP, e leve aumento na faixa do vermelho, como pode ser observado nas linhas verde, azul-claro e azul-escuro da figura 4. Maiores ângulos zenitais solares - AZS ($56,28^\circ$, $48,63^\circ$ e $40,01^\circ$, respectivamente) também contribuíram para o aumento dos efeitos decorrentes das mudanças sazonais nos dosséis, fato também observado por Galvão et al. (2016) em área de floresta estacional decidual (FED).

Dentre as 7 imagens analisadas, a do dia 10/09 apresentou a maior reflectância na faixa do vermelho, decorrente da perda parcial das folhas de algumas espécies, causando maior interferência das estruturas arbóreas e do substrato. Salienta-se que a referida imagem

apresentou o menor AZS e AZV ao nadir, o que reduz interferências anisotrópicas, sendo, dessa perspectiva, a mais fidedigna das condições da vegetação dentre as imagens de inverno.

A partir das bandas das cenas RapidEye do azul, vermelho, borda do vermelho e do IVP, foram gerados os IVs: NDVI, RENDVI e EVI. Conforme observa-se na tabela 1, os índices apresentaram maiores valores no verão (08/01 e 07/12), quando a vegetação florestal exhibe maior vigor vegetativo, decaindo no outono (10/05). Os menores valores foram alcançados no inverno (12/07, 19/08 e 10/09), quando as temperaturas decaem e a vegetação florestal se encontra em repouso, com perda parcial ou total de folhas, conforme também é observado por Rosembach et al. (2010), Costa e Guasselli (2017) e Quesada et al. (2017) ao analisarem o NDVI em áreas de FES. Dala Nora e Martini (2010) encontraram valores semelhantes, ao estudarem a variação anual dos índices NDVI e EVI, em área de floresta ombrófila mista e de forma mais acentuada em área FED.

Tabela 1 – Valores de NDVI, RENDVI e EVI, obtidos a partir de polígonos amostrais para áreas de FES.

Data da imagem	NDVI		RENDVI		EVI	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
08/01/2018	0,883	0,239	0,625	0,282	0,705	0,334
24/03/2018	0,763	0,185	0,425	0,117	0,468	0,164
10/05/2018	0,847	0,215	0,488	0,282	0,405	0,194
12/07/2018	0,837	0,216	0,512	0,277	0,429	0,214
19/08/2018	0,795	0,180	0,440	0,306	0,399	0,175
10/09/2018	0,750	0,236	0,413	0,174	0,388	0,176
07/12/2018	0,886	0,122	0,623	0,176	0,699	0,233

Fonte: Os autores (2024).

Comparativamente, as menores diferenças sazonais foram obtidas para o RENDVI, que possui maior dependência da faixa estreita da borda do vermelho (690-730 nm). Já as variações mais acentuadas foram encontradas para o EVI. Isso se deve ao fato de que o EVI apresentou significativa ligação com a atividade fotossintética da vegetação, refletindo as mudanças na estrutura do dossel como a forma das folhas e a cobertura da copa (HUETE et al., 2002; GALVÃO et al., 2013).

Além da arquitetura do dossel, o EVI apresentou-se mais sensível aos efeitos de iluminação do terreno do que o NDVI e o RENDVI, pois o EVI é impulsionado principalmente pela reflectância do IVP, que é altamente correlacionado com o AZS (GALVÃO et al., 2016). No IVP, a folhagem dispersou eficientemente os fótons e, por isso, o EVI revelou-se mais sensível ao índice de área foliar - IAF (BREUNIG et al., 2015). Além disso, o EVI não se comportou como diferença normalizada para compensar variações na iluminação da cena. Por outro lado, não apresentou problemas de saturação, ao contrário do que foi identificado para o NDVI e o RENDVI, como também observado por Santos, Baptista e Moura (2017) para o NDVI.

Becerra, Shimabukuro e Alvalá (2009) também encontraram menores valores de NDVI e EVI da formação florestal no mês de setembro, corroborando, portanto, com os resultados da pesquisa. Como durante os meses da primavera a precipitação acumulada foi maior, a resposta da vegetação com IVs mais altos acabou sendo encontrada no início do verão, e os menores, no final do inverno, uma vez que a vegetação mostrou atraso no tempo de resposta à precipitação (FU; BURGHER, 2015; SANTOS; BAPTISTA; MOURA, 2017; PAN; GAO; WANG, 2018).

Os valores de IVs, extraídos das imagens, tabela 1, e os dados da estação meteorológica de Francisco Beltrão – PR, disponibilizados pelo IAPAR (2019), na tabela 2, possibilitaram analisar a correlação entre as variáveis climáticas e os IVs, no período que antecedeu ao imageamento.

Tabela 2 – Precipitação acumulada e temperatura média durante o ano de 2018: estação meteorológica de Francisco Beltrão - PR.

Data da imagem	Precipitação acumulada (mm)		Temperatura °C		
	Últimos 30 dias	30-60 dias antecedentes	Média mínima	Média	Média máxima
08/01/2018	153,2	255,4	18,6	23,4	29,4
24/03/2018	107,5	184,4	18,3	23,3	30,2
10/05/2018	74	309,7	15,7	21,4	28,6
12/07/2018	94,1	105,9	10,8	14,5	20,9
19/08/2018	43,2	76,7	8,4	14,3	21,9
10/09/2018	173,6	43,2	8,6	15,0	22,6
07/12/2018	164,8	283,3	16,8	22,4	29,0

Fonte: IAPAR (2019). Organização: Os autores (2024).

O coeficiente de determinação (r^2) entre os IVs e as variáveis climáticas estão expressos na tabela 3. A figura 5, gerada a partir dos dados das referidas tabelas, compara as variações dos IVs com as variações das temperaturas e das precipitações.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação entre NDVI, RENDVI e EVI e as variáveis climáticas.

	Precipitação acumulada (mm)		Temperatura °C		
	Últimos 30 dias	Entre 30 - 60 dias	Média mínima	Média	Média máxima
NDVI	0,02	0,54	0,24	0,20	0,14
RENDVI	0,17	0,43	0,30	0,26	0,18
EVI	0,33	0,37	0,46	0,45	0,36

Fonte: Os autores (2024).

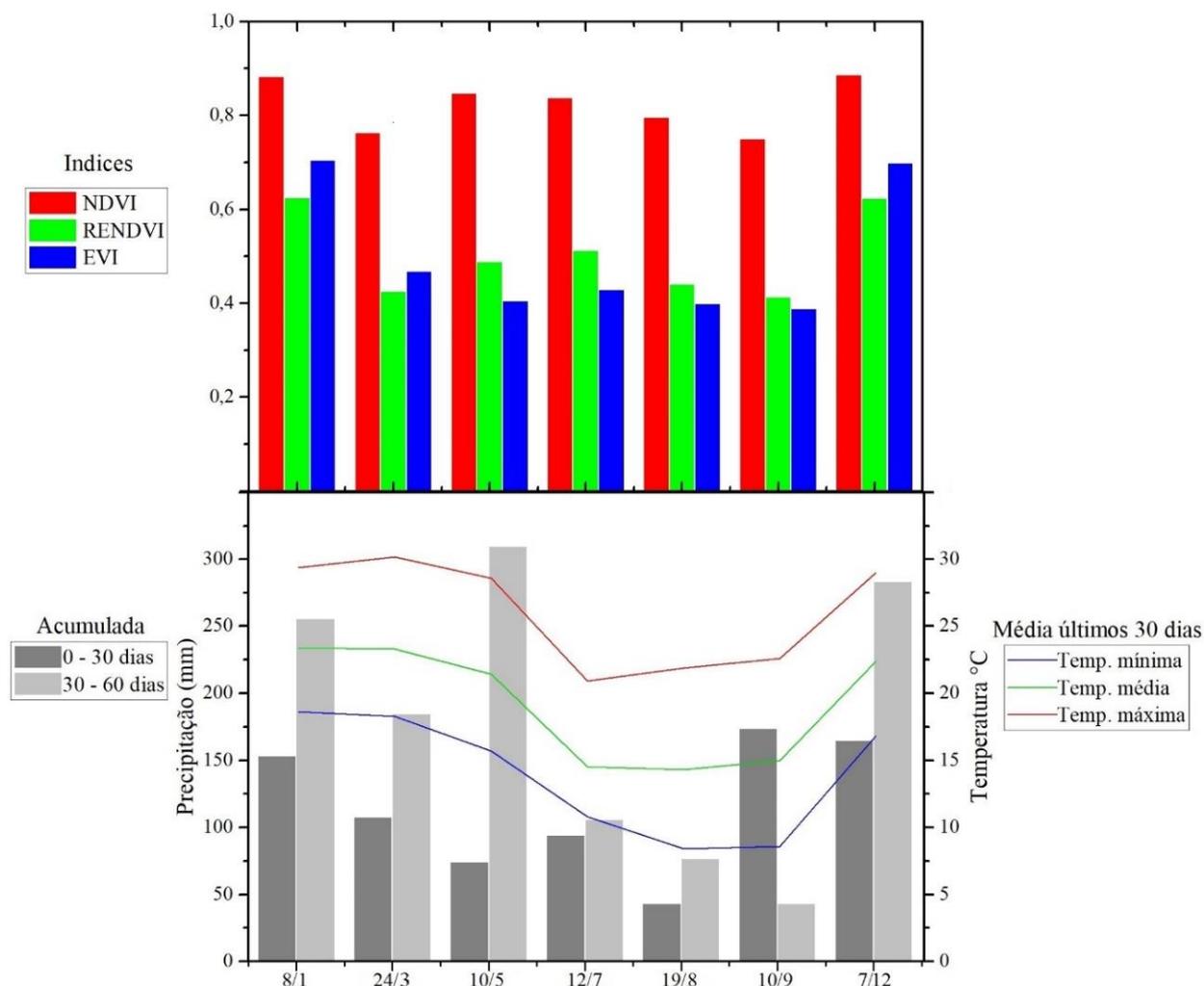


Figura 5 – Comparação entre as variações dos IVs *versus* as variações das temperaturas e das precipitações. Elaborado pelos autores (2024).

Dentre as medidas utilizadas para analisar a resposta dos IVs com a temperatura, o EVI apresentou melhor correlação com a temperatura média mínima (0,46) e temperatura média (0,45). Para o NDVI e para o RENDVI a maior correlação ocorreu com a temperatura mínima (0,24 e 0,30, respectivamente). Pan, Gao e Wang (2018) também encontraram na temperatura mínima a maior correlação com o NDVI e o EVI. Comparativamente, a temperatura pode estar mais bem correlacionada ao EVI, por este se apresentar mais sensível à variação sazonal da iluminação e do IAF.

Ao comparar o tempo de resposta dos IVs à precipitação, percebeu-se que a correlação aumentou para a precipitação acumulada temporalmente mais distante ao imageamento, principalmente no caso do NDVI, com coeficiente de 0,02 (últimos 30 dias) e 0,54 (entre 30 – 60 dias), e para o RENDVI, com coeficientes de 0,17 e 0,42, respectivamente.

Rosa et al. (2013) encontraram maior correlação entre a precipitação acumulada com o EVI com um mês de atraso e para o NDVI considerando-se três meses de atraso, assim como para Pan, Gao e Wang (2018). Fu e Burgher (2015) e Santos, Baptista e Moura (2017) demonstraram que o tempo de resposta da vegetação aos IVs apresentou atraso da ordem de 28 a 30 dias em relação à ocorrência de eventos pluviométricos. A resposta mais rápida encontrada nesses dois últimos trabalhos, deveu-se ao fato de serem realizados em áreas semiáridas,

diferente das características climáticas em as áreas de FES.

Dalla Nora e Martini (2010) encontraram maior correlação com as variações de temperatura do que com a precipitação, tanto para o NDVI, quanto para o EVI, o que pode ter ocorrido por não levarem em consideração o efeito de retardo na resposta das variáveis. Concluíram também, que o EVI mostrou-se mais sensível às variações anuais da vegetação em relação ao NDVI, conforme observou-se nos resultados apresentados na figura 5.

De acordo com os resultados analisados, a temperatura e a precipitação atuaram conjuntamente, influenciando sobre a resposta da vegetação aos IVs, com maior correlação com a precipitação, levando-se em consideração um tempo de resposta entre 30 – 60 dias. As divergências entre as literaturas citadas, deve-se às diversas características climáticas das áreas estudadas e aos IVs utilizados, sendo o EVI melhor correlacionado à temperatura e o NDVI, a precipitação. Na área de estudo e no ano analisado, a queda das folhas coincidiu com o período de baixas temperaturas e com a redução da precipitação, inibindo a atividade fisiológica da vegetação, resultando em menores valores dos IVs.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os maiores valores dos IVs (0,883 – NDVI, 0,625 – RENDVI e 0,705 – EVI) foram encontrados na cena do dia 08/01/2018 e, os menores (0,750 – NDVI, 0,413 – RENDVI e 0,388 – EVI), na cena do 10/09/2018. Baixos valores de IVs estão relacionados com os eventos climáticos e a deciduidade foliar de muitas espécies florestais, que influenciaram nos menores valores de IVs no final do inverno, conforme pressupõe a literatura que embasou o estudo. Entretanto, em locais com características climáticas e/ou vegetacionais distintas da estudada, poderão ocorrer resultados divergentes quanto à resposta dos IVs à variação sazonal da vegetação.

Na área de estudo, o aumento da temperatura e da precipitação contribuíram para elevar os valores dos IVs no verão. Por outro lado, no inverno, o frio e a diminuição das chuvas acarretaram alterações na vegetação refletindo nos IVs, principalmente no EVI, conforme pressupõe a literatura em áreas de FES subtropicais. Além das características da vegetação, a geometria de aquisição dos dados também influenciou nas variações (GAIDA et al., 2016).

Observou-se que o tempo de resposta da vegetação para os eventos pluviométricos foi entre 30 e 60 dias e melhor correlacionada ao NDVI. Fu e Burgher (2015) e Santos, Baptista e Moura (2017) encontraram uma resposta mais rápida, em torno de 30 dias, o que pode estar relacionado com as condições climáticas semiáridas das suas áreas, diferentemente das condições observadas neste trabalho. Já a temperatura apresentou melhor correlação com o EVI, pelo fato de ser mais influenciado pelo IAF, que, por sua vez, é controlado pelas estações do ano. Por isso, ao selecionar imagens para estudos com essa finalidade, é importante observar a série temporal climática do local a ser estudado.

A amplitude do AZS entre as datas de 08/01/2018 e 10/09/2018, de aproximadamente 14°, produziu mais sombras dentro e entre as copas, incluídas sombras de árvores emergentes. Dessa forma, ambos os fatores como a diminuição do IAF e o sombreamento do dossel/topografia também contribuíram com a sazonalidade dos IVs, em especial do EVI. Por sua vez, esse também demonstrou ser o mais sensível às estações do ano e à estrutura do dossel, devido a maior influência do IVP e por não ser efetivamente normalizado, comprovando o pressuposto inicial de ser mais influenciado que o NDVI e o RENDVI (GALVÃO et al., 2016).

Para futuras pesquisas, sugere-se a aplicação de outros índices na área de estudo, que utilizem bandas espectrais além do IVP. Cita-se como exemplo o NDWI (*normalized difference water index*), que utiliza do infravermelho médio na sua equação. A aplicação de novas

tecnologias, como o uso de VANT (veículo aéreo não tripulado), também pode contribuir em imagens com maior resolução espacial e com menor interferência da atmosfera e da geometria de aquisição dos dados.

AGRADECIMENTOS

À empresa Planet Labs Inc. por fornecer gratuitamente as imagens RapidEye (Padrão de Educação e Pesquisa). Ao IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná) por ceder os dados da estação meteorológica de Francisco Beltrão-PR.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AYANLADE, A. Remote Sensing vegetation dynamics analytical methods: a review of vegetation indices techniques. **Geoinformatica Polonica**, v. 16, p. 11-17, 2017.

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM 12th, 1989, Vancouver, Canada. **Conference...** Vancouver: IEEE, 1989. p. 1355-1358.

BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. dos S. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 125-134, 2009.

BREA, M.; ZUCOL, A. F. The Paraná-Paraguay basin: geology and paleoenvironments. In: ALBERT, J. S.; REIS, R. (Ed.). **Historical biogeography of Neotropical freshwater fishes**. University of California Press, 2011. p. 69-88.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; GITELSON, A. A.; MOURA, Y. M.; TELES, T. S.; GAIDA, W. Spectral anisotropy of subtropical deciduous forest using MISR and MODIS data acquired under large seasonal variation in solar zenith angle. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 294-304, 2015.

CALDANA, N. F. da S.; MARTELÓCIO, A. C.; RUDKE, A. P.; NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H. Frequência, intensidade e variabilidade pluviométrica na Mesorregião Sudoeste Paranaense. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 15, v. 25, p. 161-181, 2019.

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; MELO, R. W. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 883-896, 2017.

COSTA, L. C. B. da; GUASSELLI, L. A. Dinâmica sazonal de remanescentes da Mata Atlântica, a partir de séries temporais NDVI/MODIS. **Geo UERJ**, n. 30, p. 214-239, 2017.

DALLA NORA, E. L.; MARTINI, D. Z. Análise da dinâmica sazonal de fitofisionomias do bioma Mata Atlântica com base em índices de vegetação do sensor MODIS/TERRA. **Ambiência**, v. 6, n. 1, p. 97-108, 2010.

FU, B.; BURGHER, I. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. **Journal of Arid Environments**, v. 113, p. 59-68, 2015.

GAIDA, W.; BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; TELES, T. S.; BALBINOT, R. Variações da reflectância e dos

índices de vegetação em função dos parâmetros da modelagem topográfica no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil. **Investigaciones geográficas**, n. 91, p. 105-123, 2016.

GAIDA, W.; BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Correção Atmosférica em Sensoriamento Remoto: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 01, p. 229-248, 2020.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; SANTOS, J. R.; MOURA, Y. M. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 291-300, 2013.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; TELES, T. S.; GAIDA, W.; BALBINOT, R. Investigation of terrain illumination effects on vegetation indices and VI-derived phenological metrics in subtropical deciduous forests. **GIScience & Remote Sensing**, v. 53, n. 3, p. 360-381, 2016.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, n. 3-4, p. 501-508, 1996.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863-2880, 1998.

HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS. **Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)**. 2015. Disponível em: <<https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/FLAASH.html>>. Acesso em: 7 out 2019.

HUETE, A. R.; HUA, G.; QI, J.; CHEHBOUNI, A.; VAN LEEUWEN, W. J. D. Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n. 2-3, p. 143-154, 1992.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, 83, p. 195-213, 2002.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Dados meteorológicos diários da estação de Francisco Beltrão** – código 02643012. Londrina, 2019. Arquivo em Exell.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 274 p.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting Vegetation Indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, n. 3-4, p. 185-200, 1991.

LIU, Y.; LI, Y.; LI, S.; MOTESHARREI, S. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors. **Remote Sensing**, v. 7, n. 10, p. 13233-13250, 2015.

PAN, X.; GAO, Y.; WANG, J. Response differences of MODIS-NDVI and MODIS-EVI to climate factors. **Journal of Resources and Ecology**, v. 9, n. 6, p. 673-680, 2018.

QUESADA, H. B.; REDONDO, G.; VERNASQUI, L. G.; MAGNONI, P. H. J.; ARANTES, E. J. Análise da vegetação ripária em bacia hidrográfica utilizando Índice de Vegetação Normalizada (NDVI) no município de Maringá-PR. **Geo UERJ**, n. 31, p. 439-455, 2017.

RAPIDEYE AG SATELLITE. **Imagery Product Specifications**, Version 6.1. Planet: 2016. Disponível em: <<https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-Product-Specifications.pdf>>. Acesso em: 20 set 2019.

ROSA, P. A.; BREUNIG, F. M.; BALBINOT, R.; GALVÃO, L. S. Dinâmica da floresta do Parque Estadual do Turvo com índices de vegetação. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, p. 487-499, 2013.

ROSEMBACK, R.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; CONFORTE, J. C. Análise da dinâmica da cobertura vegetal na região Sul do Brasil a partir de dados MODIS/Terra. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62,

p. 401-416, 2010.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL J. A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington, D.C., 1973. **Anais...** Washington, D.C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v.1, p. 309-317.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T. da; SILVA, J. M. F. da. Morphostructural mapping of Parana state, Brazil. **Journal of Maps**, v. 5, n. 1, p. 170-178, 2009.

SANTOS, C. V. B. dos S.; BAPTISTA, G. M. de M.; MOURA, M. S. B. de. Seasonality of Vegetation Indices in different land uses in the São Francisco Valley. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 158-167, 2017.

SOLYMOSI, K.; KÖVÉR, G.; ROMVÁRI, R. The Progression of Vegetation Indices: a Short Overview. **Acta Agraria Kaposváriensis**, v. 23, n. 1, p. 75-90, 2019.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. **Journal of Sensors**, v. 2017, 2017.