

RELAÇÃO ENTRE CONDIÇÃO HÍDRICA E FORMAÇÕES VEGETACIONAIS NATIVAS POR MEIO DE ÍNDICES ESPECTRAIS

Janisson Batista de Jesus

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR)
janisson.eng@gmail.com

Bruno Barros de Souza

Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia (INEMA)
Unidade Regional Chapada Diamantina
brunobarros.eco@gmail.com

Dráuzio Correia Gama

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais
drauziogama@hotmail.com

RESUMO

A coleta de informações biofísicas da vegetação é crucial para analisar as suas características e seu comportamento nos ambientes florestais. Uma das formas de se obter essas informações pode ser realizada utilizando técnicas de sensoriamento remoto, o qual permite analisar espacial e temporalmente os componentes da superfície terrestre, entre eles as diferentes formas de vegetação e as suas características. Sendo assim, o objetivo do estudo foi analisar a condição hídrica de diferentes formações vegetacionais nativas por meio de índices espectrais, visando a identificar quais os Índices de Diferença Normalizada da Água (NDWI) utilizados (MCFEETERS, 1996; GAO, 1996; e ROGERS e KEARNEY, 2004) mais se correlacionam à expressão do Índice de Diferença Normalizada da Vegetação (NDVI) para as épocas chuvosa e seca. Foram obtidas imagens do sensor OLI do satélite Landsat-8 referentes ao período chuvoso e seco em fragmentos de Caatinga densa, aberta e herbácea, Manguezal e Mata Atlântica *stricto sensu*, extraindo-se o NDVI e correlacionando-o a diferentes equações de NDWI. A equação de McFeeters se destacou como a que apresentou valores mais correlacionados ao NDVI, seguida da de Gao, para as formações vegetacionais estudadas para ambas as épocas pluviométricas, indicando o potencial de uso dessas equações nos estudos dessas vegetações.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. NDWI. Conteúdo Hídrico.

SPATIAL RELATIONSHIP BETWEEN WATER CONDITION AND NATIVE VEGETATION FORMATIONS THROUGH SPECTRAL INDEXES

ABSTRACT

Collection of information present in the vegetation is crucial to analyze its characteristics and understand its behavior in forest environments. One of the ways to obtain this information is remote sensing techniques, which enables spatial and time analysis of the components of the terrestrial surface, among them the different vegetation forms and their characteristics. The aim of this study was to analyze the water status of different native vegetation formation through spectral indexes, aiming to identify which Normalized Water Difference Indices (NDWI) are more correlated to the expression of the Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) used (MCFEETERS, 1996; GAO, 1996; e ROGERS and KEARNEY, 2004) for rainy and dry seasons. Images of Landsat-8 satellite were obtained for the rainy and dry period in areas of dense, open and herbaceous Caatinga, Mangrove and Atlantic Forest *stricto sensu*, extracting the NDVI and correlating it to different NDWI equations. The McFeeters equation stood out as the one that presented values most correlated to the NDVI, followed by that of Gao, for the forest types studied for both rainfall seasons, indicating the potential use of these equations in the studies of these vegetations.

Keywords: Remote Sensing. NDWI. Water Content.

INTRODUÇÃO

Os sensores remotos orbitais instalados em satélites de baixa e média resolução espacial são frequentemente usados para monitoramento terrestre, sobretudo da vegetação, proporcionando ao

crescente número de usuários a informação usada para os diversos fins, tais como: para avaliar o rendimento agrícola, o desmatamento, a mudança do tipo de vegetação, a seca e a desertificação das regiões (ROUMENINA et al., 2013).

A aplicação do sensoriamento remoto óptico no estudo da vegetação tem como foco gerar dados que permitam quantificar as características biofísicas da vegetação e o seu estado de crescimento, sendo realizada através de índices espectrais, que são variáveis adimensionais, derivada da reflectância espectral do objeto utilizando duas ou mais bandas espectrais (JI et al., 2011). Além disso, esses índices normalizam ou modelam os efeitos internos e externos aos sinais de detecção como: o ângulo solar, o ângulo de visada, as variações da vegetação e as condições do solo e topográfica, além de aumentarem a sensibilidade para analisar as propriedades biofísicas da vegetação (JENSEN, 2009).

Esses índices são resultados de operações matemáticas e que várias combinações de canais espectrais das imagens de satélite podem ser usadas como indicadores sensíveis da presença, condição e vigor da vegetação verde (RAZALI et al., 2016). Entre os Índices de Vegetação (IV), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) proposto por Rouse et al. (1973) é o mais reconhecido em que se usam as diferenças das respostas espectrais no comprimento de onda eletromagnética vermelha e infravermelha próxima (NIR) para indicar a densidade da vegetação ou o verde (JI et al., 2011).

Da mesma forma, a técnica mais comumente empregada para estimar conteúdos de água foliar ou no dossel da vegetação também utiliza a razão de bandas espectrais (ZHANG; WU; ZHOU, 2011), sendo o Índice de Diferença Normalizada da Água-NDWI proposto por Gao (1996) o mais comumente utilizado nos estudos referentes à condição hídrica da vegetação que, associado ao NDVI, servem para inferir o verdor e a umidade da vegetação baseado nas características espectrais da vegetação (ZHANG; JI; WYLIE, 2011). É importante ainda analisar as alterações dessas variáveis por meio desses índices em função do período pluviométrico, uma vez que o teor de água pode diferir em função da maturidade da planta ou ao longo do ano (PECHANEC et al., 2014), ou ainda, da situação fisiológica da vegetação principalmente da disponibilidade de água, como em função do déficit hídrico (IHUOMA e MADRAMOOTOO, 2017).

O NDVI associado ao NDWI já são utilizados em alguns estudos internacionais para observar as mudanças e as relações desses índices espectrais, e para extrair variáveis biofísicas, entre elas o conteúdo hídrico ou relacioná-lo com demais características da vegetação (AHMADIAN et al., 2016; MONSEF e SMITH, 2017). No Brasil, ainda existem poucos estudos retratando o potencial do uso desses índices espectrais citados relacionados aos ambientes florestais, podendo destacar o realizado por Jacon et al. (2017) ao analisar diferentes fisionomias da savana durante a estação seca e chuvosa através de diferentes métricas, detalhando as suas respostas espectrais.

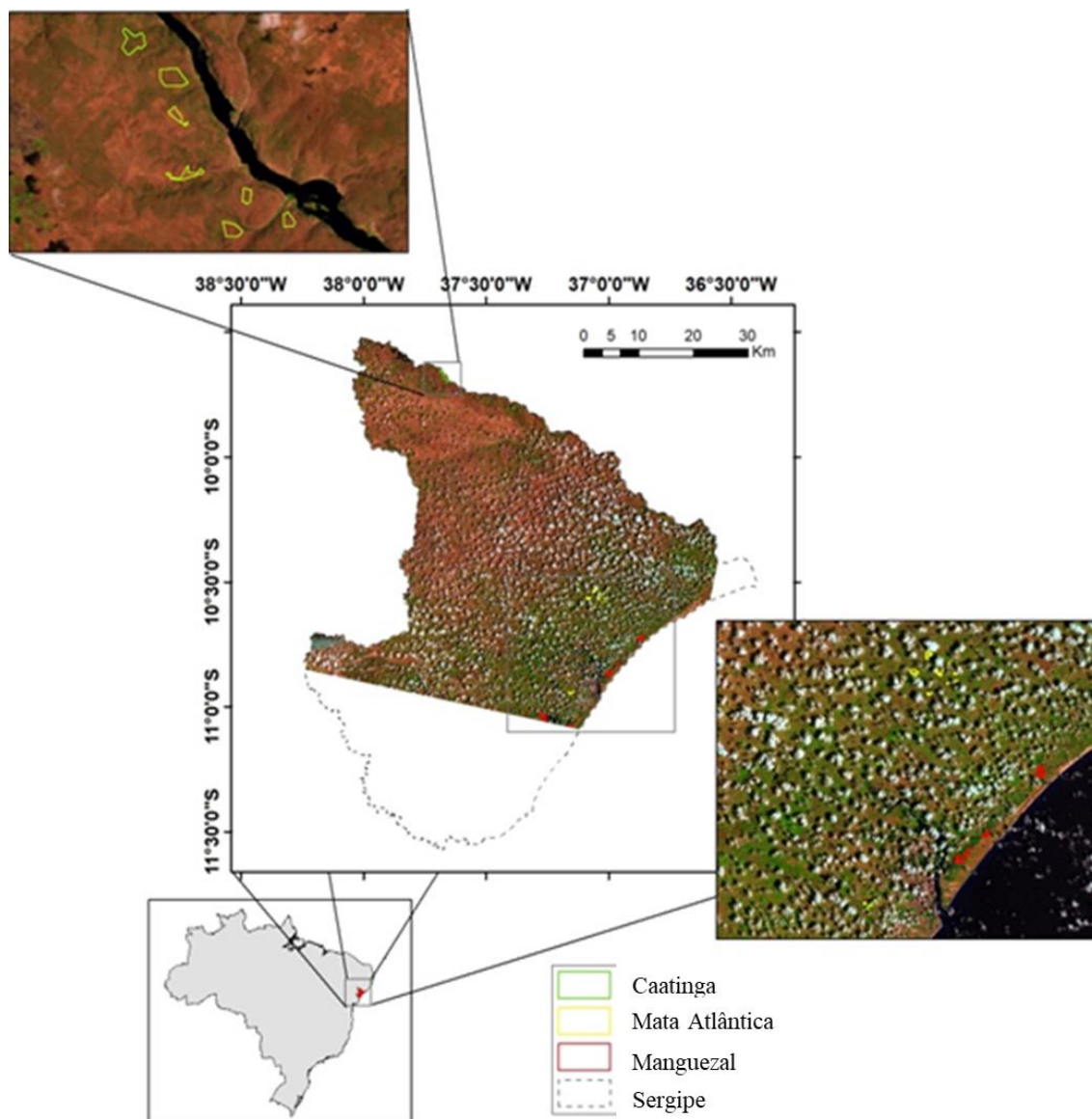
Portanto, o objetivo do estudo foi utilizar índices espectrais para analisar a relação da condição hídrica por meio de diferentes equações de estimativa de umidade (NDWI) de diferentes formações vegetacionais nativas (Caatinga, Manguezal e Mata Atlântica) com a condição de vigor da vegetação por meio do NDVI. Como quanto maior o NDVI, espera-se maior valor do NDWI uma vez que a vegetação com maior vigor possui maior umidade, visou-se a identificar quais os Índices de Diferença Normalizada da Água mais se correlacionam à expressão do Índice de Diferença Normalizada da Vegetação para as épocas chuvosa e seca. Para isso, foi considerada a hipótese de que apenas o índice proposto por Gao proporcionará alta correlação, uma vez que foi elaborado para esse tipo de estudo na vegetação.

METODOLOGIA

Área de estudo

O estudo foi realizado nos dois biomas (Mata Atlântica e Caatinga) existentes no estado de Sergipe (Figura 1). Foram selecionadas amostras aleatórias em forma de fragmentos dentro das tipologias encontradas dentro de cada bioma, sendo analisadas seis unidades amostrais de manguezal e quatorze de Mata Atlântica *stricto sensu* (este com maior representação de amostras analisadas devido aos menores tamanhos dos fragmentos desta vegetação) na região litorânea. Na área de Caatinga, localizada na unidade de conservação estadual Monumento Natural Grota do Angico (MONA Angico), situada no Alto Sertão do Estado, selecionou-se três fitofisionomias da vegetação hiperxerófila: caatinga herbácea, arbórea densa (ambas com dois fragmentos) e arbórea aberta com três amostras analisadas.

Figura 1 - Localização dos fragmentos estudados no estado de Sergipe.



Fonte - imagem falsa cor R6G5B4 do satélite Landsat-8 (USGS, 2018).

Elaboradores - Próprios autores.

O clima da região litorânea para a área estudada é classificado como As segundo a classificação de Köppen, sendo considerado tropical com estação seca de verão e altos volumes de chuvas no inverno, podendo chegar a precipitações médias mensais acima de 200 mm nos meses de abril a julho (LUNDGREN; SOUZA; LUNDGREN, 2017). Na porção semiárida da região estudada, há escassez e irregularidades de chuvas, altos índices de evaporação e de médias de temperatura, sendo caracterizado como do tipo BSh, com precipitação total anual inferior a 700 mm no local (ALVARES et al., 2013).

Obtenção e análise dos dados

A partir do satélite Landsat-8 sensor OLI, foram adquiridas duas cenas, uma referente ao período chuvoso (23-07-2014) e outra ao período seco (14-01-2015), diretamente do *site* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018), as quais foram pré-processadas no QGIS 3.0 para a correção atmosférica pelo método DOS 1 por meio do complemento SCP (*Semi-Automatic Classification Plugin*), trabalhando com os dados em reflectância de superfície. O mesmo *software* foi utilizado para a obtenção dos índices (conforme fórmulas descritas na Tabela 1) e curvas espectrais, e a distribuição espacial de cada tipo

vegetacional estudado. Os fragmentos foram selecionados a partir da ausência da influência da cobertura de nuvens em ambas as imagens.

Tabela 1 - Índices espectrais utilizados para relacionar a umidade da vegetação nos ecossistemas analisados.

Autores	Fórmulas	Bandas espectrais testadas do Landsat-8	Termo usado
Rouse et al. (1973)	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}})$	$(\rho_5 - \rho_4) / (\rho_5 + \rho_4)$	NDVI
McFeeters (1996)	$(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{NIR}}) / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{NIR}})$	$(\rho_3 - \rho_5) / (\rho_3 + \rho_5)$	McF
Gao (1996)	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}})$	$(\rho_5 - \rho_6) / (\rho_5 + \rho_6)$	Gao 1
		$(\rho_5 - \rho_7) / (\rho_5 + \rho_7)$	Gao 2
Rogers e Kearney (2004)	$(\rho_{\text{red}} - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_{\text{red}} + \rho_{\text{SWIR}})$	$(\rho_4 - \rho_6) / (\rho_4 + \rho_6)$	RK 1
		$(\rho_4 - \rho_7) / (\rho_4 + \rho_7)$	RK 2

Região espectral: visível (red: vermelho; green: verde); infravermelho (NIR: infravermelho próximo; SWIR: infravermelho de ondas curtas).

Fonte - Próprios autores.

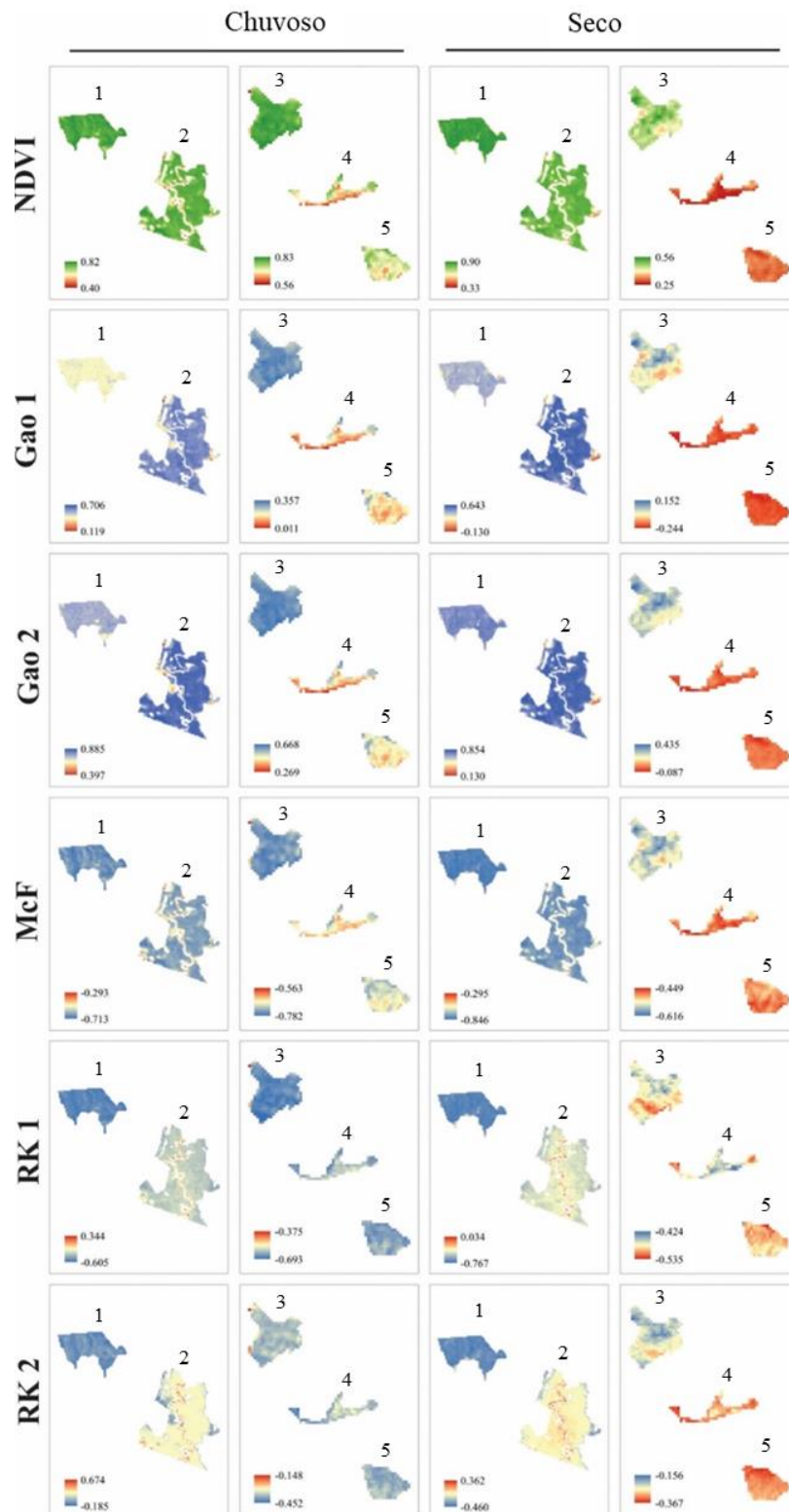
Para todos os índices, foram gerados os valores relativos a cada pixel para a imagem de cada período atribuindo “float” nas equações através da calculadora do QGIS, para não se obterem os valores apenas em números inteiros, uma vez que os dois índices apresentam os seus valores variando na faixa de -1 a +1 e assim abranger todo o alcance desses índices. Em seguida, foram extraídos os valores de cada pixel para cada índice em cada imagem, convertendo o *raster* em *point*, excluindo-se os pontos referentes aos pixels sob a influência de nuvens, sombras e regiões vizinhas das amostras dos fragmentos vegetacionais. Posteriormente, foram gerados os gráficos das respostas espectrais de cada tipo de vegetação analisada nos períodos estudados, a estatística descritiva, a relação entre o NDVI e os demais índices através do coeficiente de determinação (R^2), de correlação de Pearson (r) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices estudados apresentaram variação ao longo das suas escalas de valores em cada vegetação nativa analisada e em função do período pluviométrico, com os maiores NDVI associados aos ambientes de maiores concentrações de vegetação. O bioma Caatinga apresentou uma alta variação em função do regime hídrico, em especial a tipologia aberta e herbácea com menores áreas com folhas e, conseqüentemente, valores mais baixos de NDVI, enquanto que os fragmentos de caatinga arbórea densa mantiveram relativa concentração de verdor das folhas mesmo no período de déficit de água, seguindo também de maior umidade associada pelo NDWI (Figura 2).

As respostas das diferentes equações do NDWI também se diferenciaram descritivamente em cada formação vegetacional analisada, bem como sob o efeito do período chuvoso e seco, com destaque à alta relação das áreas vegetadas pelos valores do NDVI com a umidade inferida pelo NDWI resultante do McF. A resposta do índice normalizado das vegetações avaliadas mostrou diferença dos seus valores médios entre as formações vegetacionais nativas sob o efeito da pluviosidade (Chuvoso = Caatinga arbórea aberta: 0,69; densa: 0,79; herbácea: 0,71; Mangue: 0,72, Mata Atlântica: 0,76. Seco = 0,32; 0,43; 0,30; 0,76; 0,82, respectivamente).

Figura 2 - Índices espectrais analisados nas diferentes formações vegetacionais nativas (os dados matriciais foram editados para a visualização em escala compatível de acordo com os fragmentos ilustrados), durante o período chuvoso e seco.



1 – Mata atlântica 2 – Manguezal 3 – Caatinga arbórea densa 4 – Caatinga herbácea 5 – Caatinga arbórea aberta

Fonte - Próprios autores.

Os valores médios de cada NDWI, analisado para o período chuvoso e seco, estão descritos na Tabela 2, constatando-se a influência do regime de precipitação nas respostas dos índices, com os valores mais altos (dentro do princípio de cada índice) para a época chuvosa. Durante o período seco observa-se maiores desvios-padrão para o manguezal e Mata Atlântica *stricto sensu* em relação ao chuvoso, enquanto à medida que se reduz o porte da tipologia florestal, tal parâmetro se inverteu quanto à época climática. Altos valores de coeficiente de variação foram identificados de forma igual aos períodos pluviométricos apenas para o manguezal com a equação RK 2 (chuvoso: 41,14, seco: -147,40). Quanto ao coeficiente de determinação, nota-se de forma geral que o NDWI McF (Mangue = 0,96; Mata Atlântica = 0,92; Caatinga Arbórea Densa = 0,93; Caatinga Arbórea Aberta = 0,95; Caatinga Herbácea = 0,8 para o período chuvoso, e 0,96; 0,97; 0,93; 0,79; 0,58, respectivamente para o período seco) e GAO 2 (durante a época chuvosa: Mangue = 0,65; Mata Atlântica = 0,87; Caatinga Arbórea Densa = 0,84; Caatinga Arbórea Aberta = 0,95; Caatinga Herbácea = 0,87, e 0,72; 0,83; 0,95; 0,1; 0,65, respectivamente para a época seca) foram as equações que obtiveram as melhores relações com o NDVI para todos os tipos de vegetação em ambos os períodos analisados. E em relação ao RMSE destaca-se o RK 2 com os maiores valores apresentados.

Tabela 2 - Valores de média (μ), desvio-padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) dos NDWI analisados e da sua relação com o NDVI nos tipos de ecossistema estudados para o período chuvoso e seco através do coeficiente de determinação (R^2) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE).

		Chuvoso					Seco				
		μ	σ	CV (%)	R^2	RMSE	μ	σ	CV (%)	R^2	RMSE
Mg	Gao1	0,55	0,07	13,21	0,598	0,05	0,49	0,09	18,84	0,620	0,06
	Gao2	0,80	0,07	9,05	0,650	0,04	0,74	0,08	11,44	0,720	0,04
	McF	-0,59	0,06	-10,67	0,960	0,01	-0,73	0,06	-8,28	0,960	0,01
	RK1	-0,28	0,08	-27,32	0,480	0,05	-0,43	0,08	-18,29	0,490	0,06
	RK2	0,21	0,09	41,14	0,020	0,08	-0,05	0,08	-147,40	0,050	0,07
MA	Gao1	0,42	0,05	11,82	0,700	0,03	0,38	0,09	23,37	0,710	0,05
	Gao2	0,73	0,07	9,39	0,870	0,02	0,68	0,10	14,47	0,830	0,04
	McF	-0,65	0,04	-6,84	0,920	0,01	-0,78	0,07	-8,95	0,970	0,01
	RK1	-0,50	0,06	-11,19	0,780	0,03	-0,66	0,08	-12,78	0,850	0,03
	RK2	-0,07	0,05	-72,78	0,000	0,05	-0,33	0,07	-21,75	0,530	0,05
CAD	Gao1	0,29	0,03	11,16	0,570	0,02	-0,07	0,07	-102,28	0,940	0,02
	Gao2	0,60	0,04	6,07	0,840	0,01	0,19	0,08	44,34	0,950	0,02
	McF	-0,73	0,03	-4,72	0,930	0,01	-0,53	0,03	-5,59	0,930	0,01
	RK1	-0,65	0,04	-6,26	0,910	0,01	-0,48	0,01	-2,93	0,110	0,01
	RK2	-0,35	0,04	-10,44	0,790	0,02	-0,25	0,03	-10,74	0,560	0,02
CAA	Gao1	0,14	0,05	37,56	0,900	0,02	-0,18	0,03	-14,57	0,020	0,03
	Gao2	0,44	0,07	14,97	0,950	0,01	0,03	0,04	127,33	0,100	0,03
	McF	-0,67	0,04	-5,40	0,950	0,01	-0,48	0,02	-4,83	0,790	0,01
	RK1	-0,62	0,03	-5,02	0,900	0,01	-0,47	0,03	-5,98	0,430	0,02
	RK2	-0,37	0,02	-6,17	0,530	0,02	-0,29	0,03	-11,82	0,190	0,03
CH	Gao1	0,17	0,07	41,20	0,890	0,02	-0,20	0,04	-18,31	0,545	0,02
	Gao2	0,46	0,09	19,09	0,870	0,03	-0,01	0,06	-549,98	0,652	0,03
	McF	-0,68	0,03	-4,51	0,800	0,01	-0,48	0,02	-3,84	0,579	0,01
	RK1	-0,62	0,03	-4,71	0,720	0,02	-0,47	0,02	-4,50	0,174	0,02
	RK2	-0,37	0,04	-9,44	0,020	0,03	-0,31	0,03	-10,54	0,065	0,03

(CAD= Caatinga Arbórea Densa, CAA= Caatinga Arbórea Aberta, CH= Caatinga Herbácea, MA= Mata Atlântica *stricto sensu*, Mg= Mangue).

Fonte - Próprios autores.

Quanto à correlação existente entre a umidade e as formações vegetacionais estudadas por meio do coeficiente de Pearson, nota-se que o “NDWI McF” foi a equação que obteve as maiores correlações com o NDVI em ambos os períodos, mesmo que inversamente proporcional uma vez que tal índice é destinado a identificar corpos hídricos, mas que se mostrou sensível quando relacionado à vegetação, com exceção à caatinga arbórea aberta com um “r” de 0,31 (Tabela 3). Já o NDWI proposto por Gao 2 voltado aos estudos da umidade em vegetação utilizando a segunda banda espectral (banda 7 – SWIR 2) referente à infravermelha de comprimento de onda curto foi o que apresentou melhores associações com o NDVI, quando comparado à primeira banda (banda 6 – SWIR 1) desta mesma região considerando a equação GAO 1, para ambos os períodos pluviométricos.

Tabela 3 - Correlação de Pearson (r) entre os índices avaliados e o índice de vegetação por diferença normalizada, para os períodos (chuvoso e seco) analisados nas diferentes formações vegetacionais.

NDWI	Chuvoso					Seco				
	Mg	SS	CAD	CAA	CH	Mg	SS	CAD	CAA	CH
Gao 1	0,773	0,837	0,755	0,949	0,944	0,789	0,844	0,969	0,140	0,738
Gao 2	0,809	0,935	0,914	0,975	0,933	0,847	0,913	0,977	0,311	0,808
McF	-0,983	-0,962	-0,963	-0,977	-0,897	-0,978	-0,988	-0,966	-0,886	-0,761
RK 1	-0,695	-0,884	-0,956	0,950	-0,849	-0,697	-0,919	0,331	-0,657	-0,417
RK 2	0,133	0,017	-0,888	-0,726	-0,130	-0,228	-0,726	0,751	-0,441	0,254

(Mg= Mangue, SS= Mata Atlântica *stricto sensu*, CAD= Caatinga Arbórea Densa, CAA= Caatinga Arbórea Aberta, CH= Caatinga Herbácea).

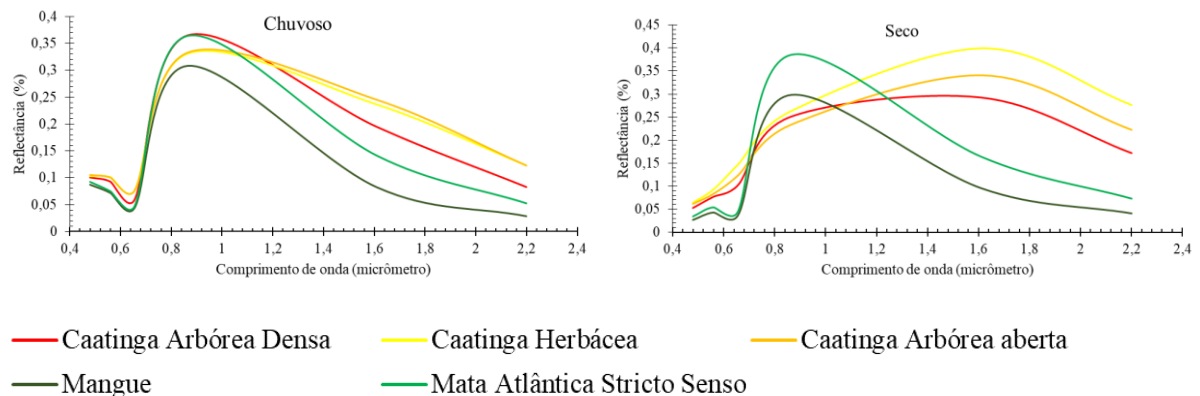
Fonte - Próprios autores.

Em oposição às respostas das correlações das bandas da equação de Gao 1 e Gao 2 com o NDVI, a equação RK 2 foi a que menos teve correlação com o índice de vegetação utilizando a banda 7 (SWIR 2), enquanto que a RK 1 com a banda 6 (SWIR 1) apresentou altos valores de correlação, com exceção para a caatinga arbórea densa que apresentou valor positivo (r: 0,33) e herbácea (r: -0,42). Esses índices também não são diretamente proporcionais à vegetação assim como a equação de McF, porém verifica-se que mesmo assim a McF e RK 1 possuem correlações com os valores do NDVI.

Analisando as respostas espectrais das vegetações estudadas na Figura 3, observa-se que, durante o período de maior disponibilidade hídrica no estado de Sergipe, conferido no período chuvoso, os fragmentos apresentaram a curva característica da vegetação, com alta absorção da radiação eletromagnética no comprimento de onda do visível (0,4 - 0,72 μm), seguida de maior reflectância na região do infravermelho próximo (0,72 - 1,1 μm) e gradual redução da reflexão à medida que se aumenta o comprimento de onda já no infravermelho médio (1,1 - 3,2 μm).

O manguezal apresentou as menores reflectâncias em todos os comprimentos de onda, o que pode também ser influenciado pela área de grande umidade na qual é localizado, com a Mata Atlântica *stricto sensu* tendo absorção próxima na região do visível à vegetação anterior, porém com valores de reflectância semelhante à caatinga arbórea densa no infravermelho próximo. Esta, por sua vez, se destacou com altos valores de reflexão nessa região espectral. As caatingas herbácea e arbórea aberta tiveram as menores absorções tanto no comprimento de onda do visível como no infravermelho médio, tendo maior reflectância no infravermelho próximo apenas em relação à vegetação de mangue.

Figura 3 - Respostas espectrais dos valores médios da reflectância das formações vegetacionais estudadas a partir da imagem Landsat-8, para os períodos (chuvoso e seco) analisados.



Fonte - Próprios autores.

Para as respostas espectrais das vegetações estudadas no período de menor oferta pluviométrica, nota-se que, na Mata Atlântica *stricto sensu* e no manguezal, não há alteração no padrão da curva espectral, enquanto que na vegetação de caatinga houve total alteração das respostas, com menor absorção da radiação na região do visível, seguida de baixa reflectância no infravermelho próximo e com destaque à alta reflexão no infravermelho médio, principalmente na caatinga herbácea, sendo a arbórea densa a que menos teve mudanças, o que pode estar relacionado à capacidade de retenção de umidade dessa tipologia florestal e detectado pelos índices de água aplicados neste presente estudo.

A variação do NDVI nos fragmentos de manguezal e Mata Atlântica *stricto sensu* foi pequena em comparação aos períodos pluviométricos, com um maior valor para esse índice na época seca, o que pode estar relacionado ao acúmulo de grande umidade no dossel da vegetação o que aumenta a absorção da radiação e diminui a reflectância do alvo. Já quanto à sensibilidade da resposta do NDWI, Fernandes et al. (2016) destacam a influência de fatores como as variações de relevo e do solo exposto ao observarem em seu estudo a capacidade do uso de índices de vegetação para detectar cicatrizes de queimadas.

Nos fragmentos de caatinga, observou-se uma grande variação temporal do NDVI, o que é característico do próprio bioma Caatinga em função da disponibilidade pluviométrica, sendo constatada por Jesus e Santana (2017) estudando a vegetação da Unidade de Conservação Monumento Natural Grota do Angico, e Santos; Baptista; Moura (2017) ao analisar a sazonalidade da área de caatinga em diferentes tipos de uso da terra, comprovando a relação linear entre essa vegetação, por meio de índices de vegetação, e a precipitação.

O conhecimento da dinâmica do NDVI nas diferentes florestas é essencial para se entender o comportamento das respostas espectrais que pode não ser igual para todas as formas de vegetação, como visto por Razali et al. (2016), que também constataram uma forte correlação entre o NDVI e o NDWI (GAO, 1996) durante o período muito seco. França et al. (2013) observaram a dinâmica da variação espaço-temporal da vegetação de caatinga em Ibimirim-PE por meio do NDVI e NDWI (proposto por Gao (1996)), utilizando o satélite Landsat 5, constatando a relação entre esses índices em diferentes condições pluviométricas, a qual também foi verificada por Oliveira et al. (2010) utilizando o Landsat 5 e 7, principalmente na estrutura arbórea densa, servindo até para discriminar diferentes coberturas da terra nesse bioma.

Huang; Chen; Cosh (2009), ao analisarem diferentes equações de NDWI a partir dos satélites Landsat TM/ETM+ e MODIS, detectaram uma alta correlação entre o NDWI resultante da banda SWIR na estimativa do conteúdo de água tanto para o milho como para a soja, indicando ser o SWIR (1640 nm) a melhor região espectral para a análise da característica de absorção de água, destacando ainda que, empiricamente, a mistura espectral causada pela influência da informação da reflectância do solo pode contaminar a resposta dos índices de vegetação. Mesmo assim, o estudo de Chen; Huang; Jackson (2005) demonstrou que o NDWI utilizando a banda SWIR têm grande potencial na modelagem do conteúdo de água na vegetação, mesmo sem realizar a correção dos efeitos do solo.

Devido à grande absorção de água pela folha, a banda espectral da região infravermelha de ondas curtas (SWIR) se mostra sensível ao conteúdo de água, sendo negativamente relacionada e amplamente utilizada para construir vários índices de sensoriamento remoto para inferir a condição hídrica da vegetação (SUN et al., 2013), principalmente a de Gao (1996). Quanto maior for o teor de umidade das folhas, menor é a reflectância do SWIR, que, por sua vez, compõe as equações dos índices espectrais podendo, portanto, ser correlacionados ao uso de NDVI para indicar o verdor e a umidade da vegetação uma vez que são baseados nessas características espectrais da vegetação (ZHANG; JI; WYLIE, 2011).

Li; Jiang; Feng (2014) observaram que o sensor OLI do Landsat-8 apresenta, para a faixa do infravermelho próximo, altos valores de reflectância para os diversos tipos de cobertura vegetal (incluindo florestas primárias e secundárias nativas, plantadas, e áreas agrícolas) e baixos valores para áreas não vegetadas. Esses autores observaram que, na região do infravermelho de ondas curtas de 2,11 a 2,29 μm , foram obtidos baixos valores para todos os tipos de cobertura da terra, enquanto de 1,57 a 1,65 μm apresentou alta resposta para áreas sem vegetação. Os autores verificaram ainda que utilizando a banda verde juntamente com a do infravermelho de ondas curtas tende a ocorrer o pior desempenho do índice, o que indica que, mesmo que o uso da banda SWIR tenha se mostrado melhor em diversos estudos já citados anteriormente, resulta em baixas correlações quando associada a outra menos sensível, o que poderia também indicar que outras regiões espectrais em substituição à SWIR podem gerar bons resultados.

Isso pode ser visto quando se compara com os resultados do presente estudo, no qual se notam as altas correlações entre o NDWI utilizando as bandas SWIR do Landsat-8 que compõem a equação de Gao 1 e 2. Porém, a maior correlação foi verificada utilizando o comprimento de onda NIR com a equação de McFeeters (1996), que, apesar de ser utilizada para detecção de corpos hídricos, indica que a composição dessa banda no índice espectral pode ser utilizada nas formações vegetacionais estudadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e de Diferença Normalizada da Água (NDWI) possuem correlação entre si tanto em época de alta disponibilidade como de baixa precipitação, principalmente pela equação proposta por McFeeters (1996) e Gao (1996) utilizando a segunda banda espectral referente à infravermelha de comprimento de onda curto (SWIR 2) do Landsat-8.

A hipótese de que apenas o índice proposto por Gao proporcionaria boa correlação com a vegetação não foi vista uma vez que outras equações de estimativa da umidade também se mostraram capazes de se correlacionar com o NDVI. Os índices espectrais mostraram a potencialidade do uso das álgebras de bandas e desse satélite para a estimativa da umidade e condição hídrica de diferentes formações vegetacionais.

Além disso, este estudo permitiu ainda indicar a potencialidade do uso do NDWI para identificar e mapear as formações vegetacionais estudadas, servindo para a avaliação dessa capacidade em estudos futuros nesses ambientes naturais.

REFERÊNCIAS

- AHMADIAN, N.; GHASEMI, S.; WIGNERON, J.-P.; ZÖLITZ, R. Comprehensive Study of the Biophysical Parameters of Agricultural Crops Based on Assessing Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+ vegetation indices. **GIScience & Remote Sensing**, v. 53, n. 3, p. 337-359, 2016. <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1155789>
- 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, n. 6, p. 711-728, 2013.
- CHEN, D.; HUANG, J.; JACKSON, T. J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, p. 225-236, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.008>
- FERNANDES, A. C. G.; COUTINHO, M. A. N.; SANTOS, V. G.; NASCIMENTO, C. R. Utilização de intervalos de índices de vegetação e temperatura da superfície para detecção de queimadas. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 30-40, 2016.

FRANÇA, L. M. A.; OLIVEIRA, T. H.; PEREIRA, J. A. S.; LINS, T. M. P.; GALVÍNCIO, J. D. Spatial analysis of caatinga vegetation in the municipality of Ibimirim-PE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 3, n. 3, p. 59-7, 2013. <https://doi.org/10.5935/2237-2202.20130003>

GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

HUANG, J.; CHEN, D.; COSH, M. H. Sub-pixel reflectance unmixing in estimating vegetation water content and dry biomass of corn and soybeans cropland using normalized difference water index (NDWI) from satélites. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 8, p. 2075-2104, 2009. <https://doi.org/10.1080/01431160802549245>

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 267-275, 2017.

JACON, A. D.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. B.; SANO, E. E. Seasonal characterization and discrimination of savannah physiognomies in Brazil using hyperspectral metrics from Hyperion/EO-1. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 15, p. 4494-4516, 2017.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JESUS, J. B.; SANTANA, I. D. M. Estimation of land surface temperature in caatinga area using Landsat 8 data. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 150-157, 2017. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.3.p150-157>

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. K.; ROVER, J. On the terminology of the spectral vegetation index (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR). **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 21, p. 6901-6909, 2011. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.510811>

LI, P.; JIANG, L.; FENG, Z. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. **Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 310-329, 2014.

LUNDGREN, W. J. C.; SOUSA, I. F.; LUNDGREN, G. A. Estimativa pluviométrica através das técnicas da krigagem e cokrigagem no Estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p. 854-865, 2017.

MCFEETERS, S. K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MONSEF, H. A.-E.; SMITH, S. C. A new approach for estimating mangrove canopy cover using Landsat 8 imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 135, n. 1, p. 183-194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.007>

OLIVEIRA, T. H.; MACHADO, C. C. C.; SILVA, J. S.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M.; SILVA, B. B. Índice de Umidade (NDWI) e Análise Espaço-Temporal do Albedo da Superfície da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, p. 55-69, 2010.

PECHANEC, V.; VAVRA, A.; HOVORKOVA, M.; BRUS, J.; KILIANOVA, H. Analyses of moisture parameters and biomass of vegetation cover in southeast Moravia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 967-987, 2014.

QGIS 3.0. **QGIS Girona**. Disponível em: https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html Acesso em: 10 mar. 2018.

RAZALI, S. M.; ATUCHA, A. A. M.; NURUDDIN, A. A.; HAMID, H. Á.; SHAFRI, H. Z. M. Monitoring vegetation drought using MODIS remote sensing indices for natural forest and plantation áreas. **Journal of Spatial Science**, v. 61, n. 1, p. 157-172, 2016.

ROGERS, A. S.; KEARNEY, M. S. Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2317-2335, 2004. <https://doi.org/10.1080/01431160310001618103>

ROUMENINA, E.; KAZANDJIEV, V.; DIMITROV, P.; FILCHEV, L.; VASSILEV, V.; JELEV, G.; GEORGIEVA, V.; LUKARSKI, H. Validation of LAI and assessment of winter wheat status using spectral data and vegetation indices from SPOT VEGETATION and simulated PROBA-V images. **International**

Journal of Remote Sensing, v. 34, n. 8, p. 2888-2904, 2013.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2012.755276>

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM.

NASA special publication, v. 351, p. 309, 1974.

SANTOS, C. V. B.; BAPTISTA, G. M. M.; MOURA, M. S. B. 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. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.3.p158-167>

SUN, H.; ZHAO, X.; CHEN, Y.; GONG, A.; YANG, J. A new agricultural drought monitoring index combining MODIS NDWI and day–night land surface temperatures: a case study in China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 24, p. 8986-900, 2013.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2013.860659>

USGS. United States Geological Survey. **Earth Explorer**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
Acesso em: 05 mar. 2018.

ZHANG, J.; WU, J.; ZHOU, L. Deriving vegetation leaf water content from spectrophotometric data with orthogonal signal correction-partial least square regression. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 22, p. 7557-7574, 2011a. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.524677>

ZHANG, L.; JI, L.; WYLIE, B. K. Response of spectral vegetation indices to soil moisture in grasslands and shrublands. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 18, p. 5267-5286, 2011b.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2010.496471>

Recebido em: 22/05/2021

Aceito para publicação em: 03/11/2021