

Wpływ susz na wskaźniki teledetekcyjne grądu wysokiego i boru mieszanego w Lesie Młochowskim – analiza zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 lasów objętych ochroną ścisłą oraz gospodarczych w latach 2017–2021

The influence of drought on remote sensing indicators of hornbeam and mixed coniferous forest in the Młochowski Forest – analysis of Sentinel-2 satellite images of protected and economic forests in 2017–2021

Jan Kotlarz 

Instytut Lotnictwa – Centrum Technologii Kosmicznych, Sieć Badawcza Łukasiewicz, Al. Krakowska 110/114, 02–256 Warszawa, Poland

Tel. +48 22 1160529, e-mail: jan.kotlarz@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Abstract. The purpose of this paper was to describe processes that took place in the Łowicz-Błonia plain during the long-term drought of 2018 and the series of short-term droughts in 2019. For our analysis we used multispectral satellite images of high-ground hornbeam and mixed coniferous forest in the Młochowski Forest from 2017–2021. Sentinel-2 images provided the means to investigate the impact of mild droughts on the values of the NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), and MSI (*Moisture Stress Index*) as well as their monthly variability and differences between forest divisions. During periods without drought, the variability of all three indices was typical for each phase of the vegetation cycle: in the spring months the value of NDVI and MSI increased, NDWI decreased. During the autumn months, the behavior of the indicators reversed. In the period of long-term drought in 2018, the NDWI was higher in forest divisions with a species composition characteristic of a mixed coniferous forest compared to divisions with a higher share of deciduous trees such as oaks and hornbeams, including the rigorously protected area of high-hornbeam forest. NDWI was the only index to show a downward trend during mild droughts, while during moderate droughts, also a decrease in NDVI and MSI was observed. This was most clearly seen in deciduous forests. We did not observe any correlation of NDVI, NDWI, or MSI with the protection status of the forest or the absence thereof.

Keywords: drought, NDVI, NDWI, MSI, Sentinel-2, oak-hornbeam forest, mixed coniferous forest

Słowa kluczowe: susza, NDVI, NDWI, MSI, Sentinel-2, grąd wysoki, bór mieszany

1. Wstęp

Zgodnie z obecnym stanem wiedzy zmiany fizjologicznych właściwości kompleksów leśnych, spowodowane bezpośrednimi lub pośrednimi skutkami suszy, można określić na podstawie danych satelitarnych i zobrażeń lotniczych (Kotlarz et al. 2018; Nasiłowska et al. 2019; Stereńczak, Mielcarek 2020). Podobnie jak inne niekorzystne czynniki – środowiskowe lub spowodowane przez człowieka – stres wodny wpływa na stan, kondycję drzewostanu i zwiększa ryzyko nasilenia się jego chorób.

Niekorzystny wpływ susz na zdrowotność drzewostanów w Polsce w XXI wieku został wielokrotnie odnotowany. Boczoń i in. (2016) przeprowadzili badania drzewostanów w całej Polsce podczas suszy 2015 r. W ich wyniku określono, że w Wielkopolsce susza wystąpiła najwcześniej i trwa-

ła najdłużej, ale negatywne jej skutki odnotowano również w całym środkowym pasie Polski. Należy tu podkreślić, że ze względu na dominującą rolę sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. w składzie gatunkowym lasów gospodarczych w Polsce skutki susz mogą być mniej odczuwalne niż w lasach liściastych, chociaż istnieją badania wskazujące na negatywny wpływ susz na kondycję drzewostanów sosnowych (Bigler et al. 2006, Jaime et al. 2019). Wpływ susz na kondycję lasów mieszanych, w tym np. grądy, jest uwarunkowany szeregiem innych czynników, np. wiekiem lasu, glebą itp. (Kotlarz et al. 2018). Powtarzające się susze mogą prowadzić do zamierania drzewostanów dębowych *Quercus robur* L., a susze okresowe mogą zmniejszyć przyrost biomasy w tych lasach (Sohar et al. 2014). Susza roku 2015 wpłynęła na drzewostany o wysokim udziale dębów na Płycie Krotoszyńskiej w woj. wielkopolskim (Nasiłowska et al. 2019). Drzewostany

Wpłynęło: 31.05.2022 r., zrecenzowano: 25.07.2022 r., zaakceptowano: 8.10.2022 r.

mieszane z dużym udziałem sosny zwyczajnej charakteryzowały się wyższymi wskaźnikami teledetekcyjnymi standardowo używanymi w monitoringu zdrowotności kompleksów leśnych (Kotlarz et al. 2018). Krótkotrwałe susze, ale powtarzające się z regularnością co kilka lat, mogą doprowadzić do zamierania całych kompleksów dębowych (Siwkcki, Ufnalski 1998). Również drzewostany z grabami jako głównym gatunkiem składowym podatne są na susze w skali sezonu wegetacyjnego (Šiška et al. 2020).

Naturalnymi dla Równiny Łowicko-Błońskiej zbiorowiskami leśnymi są grąd wysoki oraz bór mieszany kontynentalny. Celem pracy było porównanie wpływu susz występujących w latach 2018–2019 na obserwowaną za pomocą danych satelitarnych kondycję obu typów zbiorowisk. Oba typy zbiorowisk objęte są ochroną w ramach rezerwatu Młochowski Grąd (Kozłowski 1983). Również wśród otaczających rezerwat Lasach Młochowskich występują oddziały lasu gospodarczego o charakterystycznym dla grądu i boru kontynentalnego składzie gatunkowym. Typowy grąd wysoki zajmuje siedliska żyzne (nie suche) na glebach brunatnych, z kolei bór mieszany świeży zajmuje siedliska ubogie, na glebach bielcowych (Andrzejewski 1980). W badanym przypadku głównymi typami gleb były: gleba rdzawobrunatna i płowa właściwa.

2. Materiał i metody

W celu oszacowania wielkości miesięcznych opadów atmosferycznych oraz średnich temperatur miesięcznych w latach 2017–2021 wykorzystano dane publiczne Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej dla stacji pomiarowej

Warszawa. W celu oszacowania biomasy i wilgotności wykorzystano zobrazenia satelitarne Sentinel-2 Lasów Młochowskich dla tego samego okresu czasu.

Charakterystyka powierzchni badawczej

Aby oszacować kondycję drzewostanów charakterystycznych dla Równiny Łowicko-Błońskiej wybrano powierzchnie badawcze położone w czterech sąsiadujących oddziałach leśnych w leśnictwie Młochów (nadleśnictwo Chojnów, powiat pruszkowski, woj. mazowieckie). W dwóch z wybranych oddziałów – 420 i 425 – zlokalizowany jest rezerwat Młochowski Grąd. Dwa sąsiadujące oddziały – 421 i 426 – są lasem gospodarczym. Charakterystykę wszystkich czterech powierzchni badawczych przedstawia Tabela 1.

Warto zauważyć, że celem powołania rezerwatu Młochowski Grąd było zachowanie fragmentów naturalnych zbiorowisk leśnych z zespołami grądu wysokiego i boru mieszanego kontynentalnego. Dąbrowy w rezerwacie należą do najstarszych na Mazowszu. Oddziały lasów gospodarczych zawierają również drzewostany dębowo-sosnowe, są one jednak młodsze. We wszystkich omawianych tu oddziałach przeważają drzewa stuletnie.

Wskaźniki wystąpienia suszy

W celu podjęcia diagnozy o wystąpieniu suszy wykorzystano wskaźniki SPI (ang.: *Standardized Precipitation Index*) oraz SPEI (ang.: *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*). SPI określa ilościowo obserwowane opady jako ustandaryzowane odchylenie od wybranej funkcji rozkładu

Tabela 1. Charakterystyka powierzchni badawczych zlokalizowanych w Lesie Młochowskim (Nadleśnictwo Chojnów)

Table 1. Characteristics of research areas located in the Młochowski Forest (Chojnów Forest District)

| Wydzielenie leśne/ Forest subcompartment | Powierzchnia badawcza [ha] Forest area [ha] | Skład gatunkowy Species composition | Wariant uwilgotnienia Soil moisture variant | Typ gleby Soil type | Uwagi Remarks |
|--|---|--|---|---|-----------------------------------|
| 420a | 5,51 | 80% sosna 137 l., 20% dąb 137 l. 80% pine 137 yrs, 20% oak 137 yrs | świeży fresh | rdzawobrunatna i płowa właściwa rusty brown | rezerwat przyrody nature reserve |
| 421a | 10,46 | 70% sosna 97 l., 30% dąb 97 l. 70% pine 97 yrs, 30% oak 97 yrs | świeży fresh | rdzawobrunatna i płowa właściwa rusty brown | las gospodarczy commercial forest |
| 425g | 3,79 | 10% sosna 152 l., 90% dąb 152 l. 10% pine 152 yrs, 90% oak 152 yrs | świeży fresh | rdzawobrunatna i płowa właściwa rusty brown | rezerwat przyrody nature reserve |
| 426c, 426h | 9,90 | 23% sosna 112–137 l., 78% dąb 78–137 l. 23% pine 112–137 yrs, 78% oak 78–137 yrs | świeży fresh | rdzawobrunatna rusty brown | las gospodarczy commercial forest |

prawdopodobieństwa danych. Dane dotyczące opadów z lat 2000–2020 dopasowano do rozkładu Pearsona typu III, a następnie przekształcono do rozkładu normalnego. Wartości SPI można interpretować jako liczbę odchyłeń standardowych, o które obserwowana anomalia odbiega od długookresowej średniej (Guttman 1999). Wskaźnik SPEI opiera się na danych dotyczących opadów atmosferycznych i temperatury jednocześnie. Jego zaletą jest możliwość uwzględnienia wpływu zmienności temperatury na ocenę wystąpienia suszy (Vicente-Serrano et al. 2010). Wskaźnik transpiracji oszacowano zgodnie z modelem ogólnie przyjmowanym dla wskaźnika SPEI (Hargreaves, Samani 1985). Dla poszczególnych miesięcy przyjęto, że susza wystąpiła gdy wartość wskaźnika SPEI spadała poniżej jego wartości średniej dla lat 2000–2020. Interpretację wskaźnika SPI przyjęto analogicznie jak w badaniach klimatycznych całego dorzecza Wisły (Karamuz et al. 2021), tj. wystąpienie suszy lekkiej dla wskaźnika poniżej 0.0, wystąpienie suszy umiarkowanej dla wskaźnika poniżej –1.00 oraz suszy umiarkowanej poniżej –1.50 (zob. Tabela 4 w w/w publikacji). Wskaźniki SPI i SPEI obliczono dla każdego miesiąca osobno.

Indeksy spektralne

Do oszacowania zmian zachodzących w poszczególnych oddziałach leśnych wykorzystano trzy wskaźniki teledetekcyjne możliwe do obliczenia z wykorzystaniem obrazowań satelitarnych Sentinel-2. Były to kolejno: wskaźnik NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*) obliczany poprzez porównanie odbić w kanałach optycznych 4 (czerwony) i 8 (bliska podczerwień)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red},$$

wskaźnik NDWI (ang. *Normalized Difference Water Index*) obliczany poprzez porównanie odbić w kanałach optycznych 8 (bliska podczerwień) i 3 (zielony)

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR},$$

oraz znormalizowany wskaźnik MSI (ang. *Moisture Stress Index*) poprzez porównanie odbić w kanałach optycznych 8 i 11 (podczerwień krótkofalowa)

$$norm(MSI) = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}.$$

Wskaźniki NDVI, NDWI przybierają wartości od –1 do +1, wskaźnik MSI przybiera wartości od 0 do $+\infty$, jednak poprzez jego normalizację również przyjmuje wartości od –1 do +1. Zostały one wybrane ze względu na ich dotychczasowe szerokie zastosowanie w odniesieniu do badania wpływu susz na biomase, przykładowo: NDVI służył do monitoringu drzewostanów w Nadleśnictwie Karczmia Borowa podczas suszy roku 2015 (Nasiłowska et al. 2019), NDWI – w monitoringu łąk, użytków rolnych i pastwisk (Gu et al. 2007), MSI służył do monitoringu wpływu suszy na lasy liściaste (Dotzler

et al. 2015). Wskaźniki obliczono z wykorzystaniem danych satelitarnych przetworzonych przez algorytm *Sen2Cor*, w celu zastosowania korekcji atmosferycznej. Wskaźniki wegetacyjne oszacowano dla każdej powierzchni badawczej dla wszystkich obrazowań w latach 2017–2021 dla których nad badanym obszarem nie wystąpiło zachmurzenie. W analizach wykorzystano dostępne dla Lasu Młochowskiego obrazowania: dla roku 2017 od lutego do listopada (19 obrazowań), dla roku 2018 we wszystkich miesiącach oprócz lutego (44 obrazowania), dla roku 2019 we wszystkich miesiącach (39 obrazowań), dla roku 2020 również we wszystkich miesiącach (49 obrazowań), dla I kwartału 2021 roku jedynie w marcu (2 obrazowania). W sumie wykorzystano 153 obrazowania, wszystkie warstwy odpowiadające poszczególnym kanałom optycznym przepróbowano do GSD (ang. *ground sampling distance*) wynoszącego 10 m. Dla obrazowań Sentinel-2 o takim GSD otrzymano 490–1100 pikseli obrazujących pojedynczą powierzchnię badawczą dla każdego obrazowania. Średnie wartości wskaźników teledetekcyjnych tworzących szeregi czasowe poddano przetworzeniu z użyciem filtra Savitzkyego-Golaya w celu usunięcia błędnych wartości odstających. W tym celu użyto funkcji *savgol_filter* z biblioteki *scipy.signal* języka Python.

W celu wyodrębnienia z szeregów czasowych poszczególnych wskaźników teledetekcyjnych: 1) wskaźników trendów, 2) fluktuacji okresowych oraz 3) szumu, dla każdej powierzchni zastosowano metodę ich dekompozycji sumarycznej poprzez zaimplementowaną w bibliotece *statsmodels* w języku Python funkcję *seasonal_decompose*. W wyniku dekompozycji dla każdego wskaźnika I otrzymano:

$$I(t) = T(t) + P\left(\frac{t}{\Delta t}\right) + S(t),$$

gdzie:

t – moment czasowy,

T – trend,

P – funkcja fluktuacji z okresem Δt ,

S – pozostały szum.

W efekcie dekompozycji obliczona na podstawie danych satelitarnych funkcja I zostaje rozłożona na sumę funkcji T , P i S . W dalszych badaniach wykorzystano jedynie funkcję trendu, przyjmując, że ilość obrazowań jest zbyt mała, aby funkcję fluktuacji przyjąć jako w pełni wiarygodną i nieprzypadkową.

Dla każdego miesiąca dla którego określono funkcję trendu wykorzystując test t-Studenta ($p \geq 0,95$) sprawdzono zróżnicowanie wskaźników teledetekcyjnych pomiędzy wszystkimi czterema oddziałami w każdym miesiącu. Dla miesięcy bez suszy, z suszą lekką oraz z suszą umiarkowaną obliczono średnią zmianę wskaźników.

3. Wyniki

Sumy opadów dla poszczególnych miesięcy w latach 2017–2020, średnie temperatury dla poszczególnych miesięcy, średnie sumy miesięcznych opadów oraz średnie tem-

peratury z lat 2000–2021 przedstawia tabela 2. Dla każdego miesiąca z lat 2017–2021 przedstawiono również wartości wskaźników SPI oraz SPEI.

W roku 2017 w trakcie trwania okresu wegetacyjnego lekka susza wystąpiła w miesiącach maju i sierpniu (wskaźnik SPI wyniósł odpowiednio $-0,3$ oraz $-0,5$). Wskaźnik SPEI w okresie od kwietnia do listopada tego roku poza majem przyjmował wartości powyżej średniej tego wskaźnika dla okresu 2000–2021. W dalszych badaniach do miesiący lekkiej suszy zaklasyfikowano w związku z tym jedynie miesiąc maj.

W roku 2018 susza wystąpiła od samego początku okresu wegetacyjnego aż do września, przy czym od lutego do czerwca wskaźnik SPI przybierał wartości pomiędzy $-0,8$ a $-1,4$, co świadczy o umiarkowanej suszy w okresie rozpoczynającym sezon wegetacyjny. W miesiącach letnich wskaźnik SPI przybierał wartości od $-0,1$ do $0,0$. Należy zwrócić uwagę, że w roku 2018 jedynie w październiku i grudniu wskaźnik SPEI był wyższy niż jego średnia dla lat 2000–2021. Szczególnie niskie wartości na początku sezonu wegetacyjnego obserwowano w kwietniu i czerwcu. W dalszych badaniach do miesiący suszy umiarkowanej zaklasyfikowano cały okres od lutego do czerwca oraz listopad 2018 roku, natomiast okres od lipca do września zaklasyfikowano jako okres suszy lekkiej.

W roku 2019 wskaźnik SPI wskazywał na wystąpienie silnej suszy w kwietniu, czerwcu i listopadzie (wartości wskaź-

nika odpowiednio $-1,6$ oraz $-1,0$) oraz umiarkowanej w lipcu, sierpniu oraz październiku (wartości wskaźnika pomiędzy $-0,8$). W maju i wrześniu wystąpiły okresy o wysokich opadach deszczu (np. w maju 2019 r. – $76,8$ mm w stosunku do średniej w tym miesiącu dla lat 2000–2021 równej $57,6$ mm). Również wartości wskaźnika SPEI były niższe od średniej za lata 2000–2021 od kwietnia do listopada z wyjątkiem maja i września. W dalszych badaniach przyjęto, że w kwietniu 2019 roku wystąpiła susza silna, natomiast od czerwca do listopada z wyjątkiem września wystąpiła susza umiarkowana.

W roku 2020 wartości wskaźnika SPI wskazywały na suszę umiarkowaną w marcu, kwietniu i listopadzie, natomiast w lipcu wystąpiła susza lekka. Wartości wskaźnika SPEI spadły poniżej średniej dla lat 2000–2021 w marcu, kwietniu i lipcu tego roku. W dalszych badaniach przyjęto, że susza umiarkowana wystąpiła w marcu i kwietniu, natomiast w lipcu wystąpiła susza lekka.

W pierwszym kwartale 2021 roku wartość wskaźnika SPI wynosiła od $-0,9$ w marcu do $-0,2$ w lutym. Również wskaźniki SPEI były niższe niż średnia dla lat 2000–2021.

Wyodrębnione funkcje trendów wskaźników NDVI, NDWI, MSI dla każdej z powierzchni przedstawiono są na Rycinie 1.

Wyniki analizy statystycznej wskaźników teledetekcyjnych za poszczególne lata z wykorzystaniem testu t-Studenta dla prób niezależnych przedstawiono w Tabelach 3 a-c.

Tabela 2. Sumy opadów miesięcznych, średnie temperatury miesięczne, wartości wskaźników SPI i SPEI dla lat 2017–2021 oraz średnie sumy opadów miesięcznych i temperatury miesięczne dla lat 2020–2021. Okresy susz zacięniowano.

Table 2. Monthly precipitation totals, average monthly temperatures, SPI and SPEI values for 2017–2021 and average monthly precipitation totals and monthly temperatures for 2020–2021. Drought periods are shaded.

| Rok Year | Miesiąc / Month | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|-------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 2017 | suma opadów precipitation [mm] | 19,1 | 39,1 | 39,0 | 48,3 | 48,6 | 85,5 | 89,5 | 48,2 | 127,2 | 82,5 | 45,1 | 33,0 |
| | średnia temperatura average temperature [°C] | -3,7 | -0,8 | 6,1 | 7,7 | 14,6 | 18,5 | 18,9 | 19,7 | 14,0 | 10,0 | 4,9 | 2,5 |
| | SPI | -1,0 | 0,4 | 1,1 | 1,0 | -0,3 | 0,6 | 0,1 | -0,5 | 2,5 | 1,4 | 0,4 | -0,1 |
| | SPEI | 19,6 | 39,2 | 38,2 | 47,3 | 46,8 | 83,2 | 87,1 | 45,7 | 125,4 | 81,2 | 44,5 | 32,7 |
| 2018 | suma opadów precipitation [mm] | 29,8 | 7,2 | 19,3 | 13,0 | 35,4 | 22,3 | 85,1 | 62,6 | 44,8 | 51,7 | 11,2 | 51,0 |
| | średnia temperatura average temperature [°C] | 0,8 | -3,2 | 0,9 | 13,7 | 18,3 | 19,7 | 21,4 | 21,1 | 16,2 | 10,4 | 4,4 | 1,6 |
| | SPI | -0,3 | -1,4 | -0,8 | -1,0 | -0,8 | -0,9 | 0,0 | -0,1 | -0,1 | 0,4 | -1,0 | 0,7 |
| | SPEI | 29,7 | 7,6 | 19,2 | 11,3 | 33,1 | 19,8 | 82,4 | 60,0 | 42,8 | 50,4 | 10,6 | 50,8 |
| 2019 | suma opadów precipitation [mm] | 34,0 | 30,6 | 27,9 | 3,2 | 78,5 | 18,2 | 36,9 | 33,8 | 60,4 | 16,1 | 12,6 | 38,0 |
| | średnia temperatura average temperature [°C] | -1,7 | 3,2 | 6,1 | 10,6 | 13,6 | 22,9 | 19,3 | 21,2 | 14,7 | 11,3 | 6,3 | 3,3 |
| | SPI | -0,1 | -0,1 | 0,0 | -1,6 | 0,8 | -1,0 | -0,8 | -0,8 | 0,4 | -0,8 | -1,0 | 0,1 |
| | SPEI | 34,2 | 30,2 | 27,1 | 1,9 | 76,8 | 15,3 | 34,5 | 31,1 | 58,6 | 14,7 | 11,8 | 37,6 |

| Rok Year | Miesiąc / Month | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|---|---|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 2020 | suma opadów precipitation [mm] | 28,8 | 43,2 | 13,0 | 7,5 | 67,3 | 165,7 | 47,5 | 94,5 | 63,7 | 79,5 | 8,7 | 26,1 |
| | średnia temperatura average temperature [°C] | 2,5 | 3,9 | 5,0 | 9,5 | 12,0 | 19,0 | 19,3 | 20,7 | 15,7 | 10,8 | 5,8 | 2,0 |
| | SPI | -0,4 | 0,6 | -1,4 | -1,3 | 0,4 | 2,4 | -0,6 | 0,7 | 0,5 | 1,3 | -1,1 | -0,5 |
| | SPEI | 28,5 | 42,7 | 12,4 | 6,3 | 65,8 | 163,3 | 45,1 | 91,9 | 61,7 | 78,1 | 8,0 | 25,8 |
| 2021 | suma opadów precipitation [mm] | 31,0 | 27,6 | 18,3 | | | | | | | | | |
| | średnia temperatura average temperature [°C] | -1,4 | -2,3 | 3,3 | | | | | | | | | |
| | SPI | -0,3 | -0,2 | -0,9 | | | | | | | | | |
| | SPEI | 31,2 | 27,9 | 17,9 | | | | | | | | | |
| Średnia suma opadów miesięcznych w latach 2000–2021 / Average monthly precipitation in 2000–2021 | | 35,1 | 31,9 | 27,6 | 30,6 | 57,6 | 61,3 | 85,2 | 67,1 | 48,1 | 40,6 | 35,2 | 35,9 |
| Odchylenie st. sumy opadów miesięcznych w latach 2000–2021 / Standard deviation of the sum of monthly precipita- tion in the years 2000–2021 | | 15,6 | 17,5 | 10,5 | 17,5 | 27,7 | 43,8 | 58,3 | 39,9 | 31,2 | 29,8 | 23,6 | 20,6 |
| Średnia temperatura miesięczna w latach, 2000–2021 / Average tempera- ture in 2000–2021 | | -1,7 | -0,4 | 3,5 | 9,6 | 14,7 | 18,1 | 20,0 | 19,4 | 14,3 | 9,1 | 4,6 | 0,5 |

Tabela 3a. Analiza statystyczna wskaźnika NDVI w latach 2017–2021. W tabeli zaznaczono znakiem * wartości dla których zachodzi istotne statystycznie różnicowanie wskaźnika.

Table 3a. Statistical analysis of the NDVI indicator in the 2017–2021. * values with a statistically significant differentiation of the indicator.

| Rok i miesiąc Year and month | Zaobserwowane różnicowanie Observed differentiation | 420a (las sosnowy – rezerwat) 420a (pine forest – nature reserve) | 421a (gospodarczy las sosnowy) 421a (pine forest – managed) | 425g (las liściasty – rezerwat) 425g (deciduous forest – nature reserve) | 426c,h (gospodarczy las liściasty) / 426c,h (deciduous forest – managed) | |
|---------------------------------|---|--|--|---|--|--------|
| 2017 | NDVI wyższe dla lasu sosnowego niż liściastego, NDVI w lesie liściastym wyższe w rezerwacie niż w lesie gospodarczym / NDVI higher for pine than deciduous forest, the NDVI in the deciduous forest is higher in the reserve than in the managed forest | | 0,626* | 0,628* | 0,684* | 0,655* |
| | NDVI w sosnowym lesie gospodarczym niższy niż w lasach liściastych / NDVI in managed pine forest lower than in deciduous forests | | 0,818 | 0,826* | 0,881* | 0,897* |
| | NDVI w obu lasach sosnowych niższe niż w gospodarczym lesie liściastym / NDVI in both pine forests lower than in managed deciduous forest | | 0,774* | | 0,782* | 0,828 |

| Rok i miesiąc Year and month | Zaobserwowane zróżnicowanie Observed differentiation | 420a (las sosnowy – rezerwat) 420a (pine forest – nature reserve) | 421a (gospodarczy las sosnowy) 421a (pine forest – managed) | 425g (las liściasty – rezerwat) 425g (deciduous forest – nature reserve) | 426c,h (gospodarczy las liściasty) / 426c,h (deciduous forest – managed) | |
|---------------------------------|---|---|--|---|---|--------|
| 2018 | IV | NDVI wyższe w lesie gospodarczym sosnowym niż w obu lasach liściastych / NDVI higher in managed pine forests than in both deciduous forests | 0,560 | 0,587* | 0,469* | 0,449* |
| | VI | NDVI niższe dla lasu sosnowego niż liściastego / NDVI lower for pine than deciduous forest | 0,838* | 0,828* | 0,895* | 0,895* |
| | VII | | 0,822* | 0,806* | 0,881* | 0,879* |
| | VIII | | 0,830 | 0,826* | 0,886* | 0,880 |
| 2019 | II | NDVI wyższe dla lasu sosnowego niż liściastego, NDVI lasu sosnowego gospodarczego wyższe niż lasu sosnowego gospodarczego / NDVI higher for pine than deciduous forest, NDVI of the managed pine forest higher than the managed pine forest | 0,533* | 0,567* | 0,458* | 0,436* |
| | IV | NDVI wyższe dla lasu sosnowego niż liściastego / NDVI higher for pine than deciduous forest | 0,498 | 0,533* | 0,415 | 0,392* |
| | IX | NDVI lasu sosnowego gospodarczego niższy niż lasu liściastego w rezerwacie / The NDVI of the managed pine forest lower than that of the deciduous forest in the nature reserve | 0,790 | 0,798* | 0,86* | 0,838 |
| | XI | NDVI lasu sosnowego gospodarczego wyższy niż lasu liściastego / NDVI of the managed pine forest higher than the managed deciduous forest | 0,680 | 0,696* | 0,640 | 0,600* |
| | XII | | 0,596 | 0,638* | 0,520 | 0,505* |
| | I | | 0,605 | 0,650* | 0,524 | 0,512* |
| 2020 | II | | 0,630 | 0,678* | 0,548 | 0,538* |
| | III | NDVI wyższe dla lasu sosnowego niż liściastego / NDVI higher for pine than deciduous forest | 0,617 | 0,658* | 0,531* | 0,517* |
| | IV | | 0,557 | 0,595* | 0,474 | 0,463* |
| | VIII | NDVI lasu liściastego w rezerwacie wyższe niż lasu gospodarczego sosnowego / NDVI of the deciduous forest in the reserve higher than the managed pine forest | 0,853 | 0,852* | 0,914* | 0,902 |
| | X | NDVI lasu liściastego wyższe niż lasu sosnowego w lesie gospodarczym / NDVI of the deciduous forest higher than the pine forest in the managed forest | 0,775 | 0,781* | 0,827 | 0,839* |

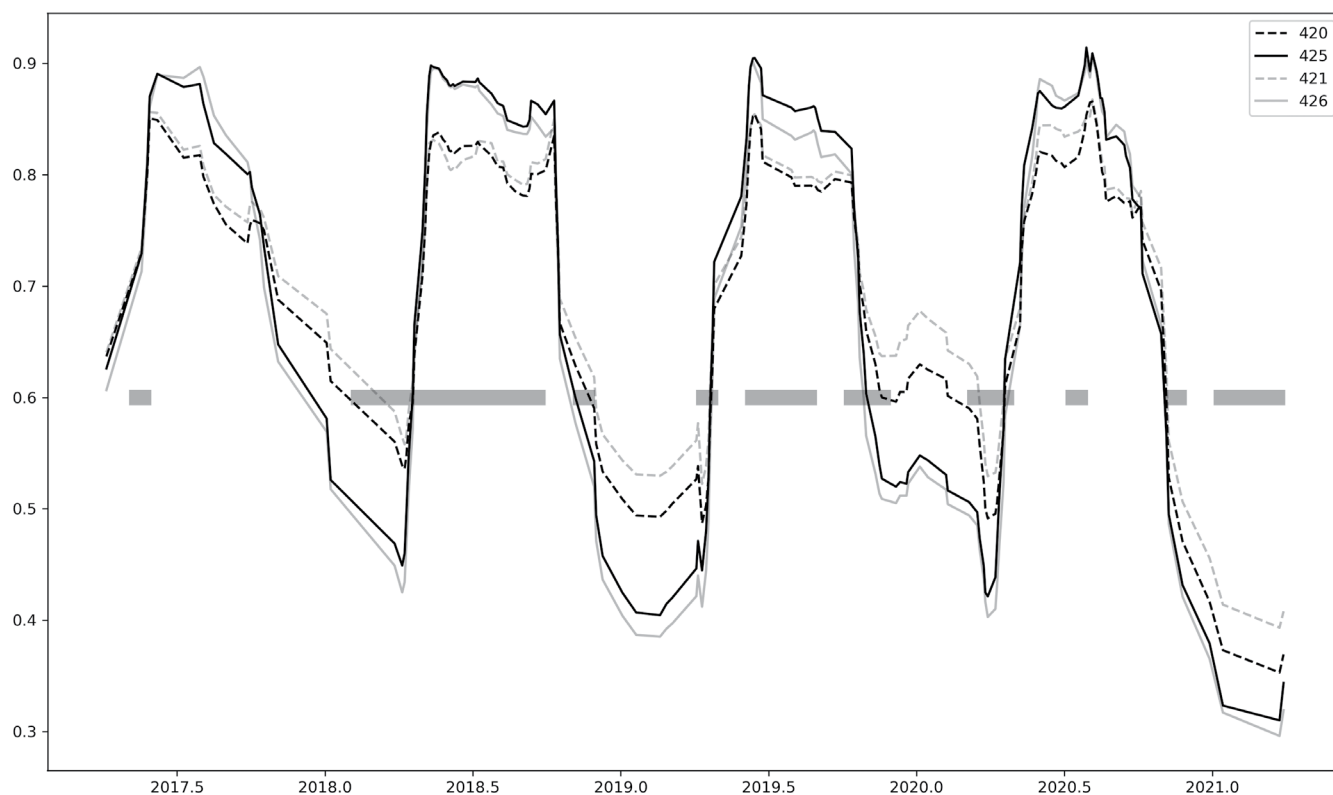
Tabela 3b. Analiza statystyczna wskaźnika NDWI w latach 2017–2021. W tabeli zaznaczono znakiem * wartości dla których zachodzi istotne statystycznie zróżnicowanie wskaźnika.**Table 3b. Statistical analysis of the NDWI indicator in the 2017–2021. * values with a statistically significant differentiation of the indicator.**

| Rok i miesiąc Year and month | Zaobserwowane zróżnicowanie Observed differentiation | 420a (las sosnowy – rezerwat) 420a (pine forest – nature reserve) | 421a (gospodarczy las sosnowy) 421a (pine forest – managed) | 425g (las liściasty – rezerwat) 425g (deciduous forest – nature reserve) | 426c,h (gospodarczy las liściasty) / 426c,h (deciduous forest – managed) | |
|---------------------------------|---|--|--|---|---|---------|
| 2017 | IV | NDWI niższy w lasach sosnowych niż w liściastych, NDWI niższy w lesie liściastym w rezerwacie niż w lesie liściastym gospodarczym / NDWI lower in pine forests than in deciduous forests, NDWI lower in the deciduous forest in the reserve than in the managed deciduous forest | –0,075 | –0,078 | –0,053 | –0,023 |
| | V | | –0,227 | –0,231 | –0,211 | –0,188 |
| | X | NDWI wyższy w lasach sosnowych niż w liściastych / NDWI is higher in pine than in deciduous forests | –0,708* | –0,718* | –0,771* | –0,787* |
| 2018 | VI | | –0,757* | –0,743* | –0,819* | –0,812* |
| | VII | | –0,752* | –0,736* | –0,818* | –0,810* |
| | VIII | | –0,761 | –0,756* | –0,819* | –0,807 |
| 2019 | II | NDWI gospodarczego lasu iglastego jest niższy niż pozostałych powierzchni badawczych / The NDWI of the economic coniferous forest is lower than that of the remaining research areas | –0,520* | –0,554* | –0,508* | –0,491* |
| | VIII | NDWI wyższy w lasach sosnowych niż w liściastych / NDWI is higher in pine than in deciduous forests | –0,711* | –0,713* | –0,768* | –0,760 |
| | VIII | NDWI wyższy w lasach sosnowych niż w liściastych / NDWI is higher in pine than in deciduous forests | –0,700* | –0,701* | –0,722* | –0,723* |

Tabela 3c. Analiza statystyczna wskaźnika MSI w latach 2017–2021. W tabeli zaznaczono znakiem * wartości dla których zachodzi istotne statystycznie zróżnicowanie wskaźnika.**Table 3c. Statistical analysis of the MSI indicator in the 2017–2021. * values with a statistically significant differentiation of the indicator.**

| Rok i miesiąc Year and month | Zaobserwowane zróżnicowanie Observed differentiation | 420a (las sosnowy – rezerwat) 420a (pine forest – nature reserve) | 421a (gospodarczy las sosnowy) 421a (pine forest – managed) | 425g (las liściasty – rezerwat) 425g (deciduous forest – nature reserve) | 426c,h (gospodarczy las liściasty) / 426c,h (deciduous forest – managed) | |
|---------------------------------|---|--|--|---|---|--------|
| 2017 | IV | MSI wyższy w lasach sosnowych niż w liściastych / MSI higher in pine than in deciduous forests | 0,316* | 0,320* | 0,255* | 0,257* |
| | V | | 0,304* | 0,308* | 0,258* | 0,247* |
| | X | | 0,398* | 0,413* | 0,439* | 0,438* |
| 2018 | III | MSI wyższy w gospodarczym lesie sosnowym niż w lasach liściastych / MSI higher in managed pine forests than in deciduous forests | 0,324 | 0,341* | 0,262* | 0,240* |

| Rok i miesiąc Year and month | Zaobserwowane zróżnicowanie Observed differentiation | 420a (las sosnowy – rezerwat) 420a (pine forest – nature reserve) | 421a (gospodarczy las sosnowy) 421a (pine forest – managed) | 425g (las liściasty – rezerwat) 425g (deciduous forest – nature reserve) | 426c,h (gospodarczy las liściasty) / 426c,h (deciduous forest – managed) | |
|---------------------------------|---|--|--|---|---|---------|
| 2018 | IV | MSI wyższy w lasach sosnowych niż w liściastych / MSI higher in pine than in deciduous forests | 0,07* | 0,102* | -0,053* | -0,077* |
| | V | | 0,057* | 0,09* | -0,024* | -0,007* |
| | VII | MSI w rezerwacie wyższy w lesie liściastym niż sosnowym / The MSI in the reserve is higher in deciduous than pine forest | 0,380* | 0,400 | 0,441* | 0,417 |
| | XII | MSI wyższy w gospodarczym lesie sosnowym niż w gospodarczym lesie liściastym / MSI higher in managed pine forest than in managed deciduous forest | 0,354 | 0,380* | 0,325 | 0,289* |
| 2019 | III | MSI wyższy w lasach sosnowych niż w liściastych / MSI higher in pine than in deciduous forests | 0,292* | 0,334* | 0,194* | 0,178* |
| | IV | | 0,088* | 0,126* | -0,006* | -0,025* |
| | XI | MSI wyższy w gospodarczym lesie sosnowym niż w gospodarczym lesie liściastym / MSI higher in managed pine forest than in commercial deciduous forest | 0,262 | 0,289* | 0,223 | 0,163* |
| | XII | MSI w liściastym lesie w rezerwacie niższy niż w obu lasach gospodarczych / MSI in the deciduous forest in the reserve lower than in both managed forests | 0,249* | 0,281* | 0,193 | 0,139* |
| 2020 | I | | 0,222* | 0,284* | 0,102* | 0,086* |
| | II | MSI wyższy w lasach sosnowych niż w liściastych / MSI higher in pine than in deciduous forests | 0,198* | 0,265* | 0,066* | 0,053* |
| | III | | 0,142* | 0,203* | 0,021* | 0,003* |
| | IV | | 0,020* | 0,067* | -0,082* | -0,103* |
| | VI | MSI w rezerwacie wyższy w lesie liściastym niż w lesie sosnowym / The MSI in the reserve is higher in a deciduous forest than in a pine forest | 0,387* | 0,404 | 0,453* | 0,532 |
| | XI | MSI w gospodarczym lesie iglastym wyższy niż w obu lasach liściastych / MSI in Forests coniferous Forests higher than in both deciduous forests | 0,324 | 0,356 | 0,297 | 0,285 |



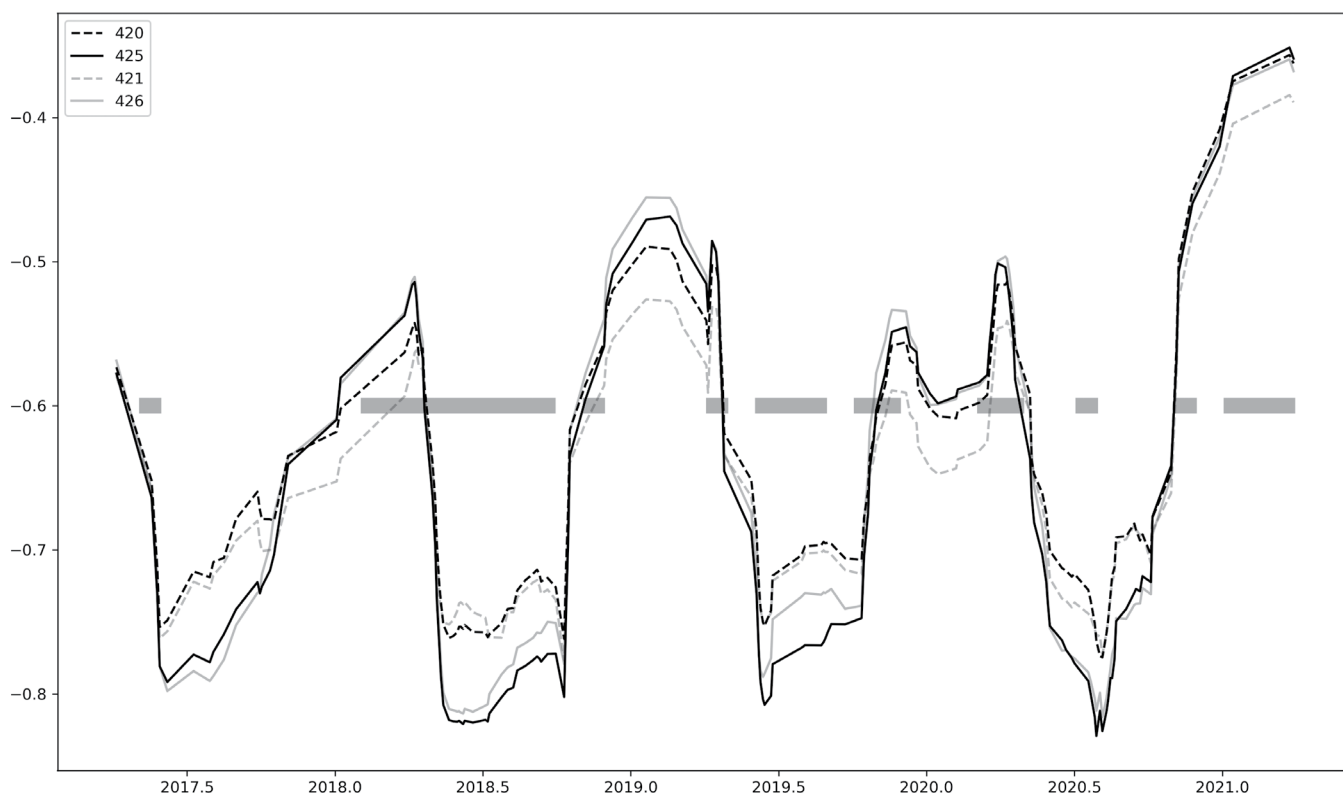
Rycina 1a. Wartość wskaźnika NDVI dla czterech powierzchni badawczych w oddziałach leśnych Lasu Młochowskiego: 420 (czarna linie przerywana), 425 (czarna linia ciągła), 421 (szara linie przerywana), 426 (szara linia ciągła). Oddziały 420 i 425 obejmują rezerwat przyrody Młochowski Grąd, oddziały 421 i 426 obejmują las gospodarczy. Szarą linią poziomą zaznaczono okres występowania suszy. Figure 1a. NDVI values for four research areas in forest divisions of the Młochowski Forest: 420 (black dotted line), 425 (black solid line), 421 (grey dotted line), 426 (grey solid line). Departments 420 and 425 include the Młochowski Grąd nature reserve, departments 421 and 426 include a commercial forest. The period of drought is marked with the horizontal grey line.

Rozkład miesięcznych zmian wskaźników NDVI, NDWI i MSI dla miesięcy bez suszy, z suszą lekką oraz z suszą umiarkowaną przedstawia rycina 2. Zmiany omawianych wskaźników w miesiącach bez suszy rozkładają się symetrycznie wokół wartości 0,0. W przypadku suszy lekkich następował wzrost wskaźników NDVI i MSI oraz spadek wskaźnika NDWI. W trakcie suszy umiarkowanych wskaźnik MSI charakteryzował się tendencją spadkową.

4. Dyskusja wyników

Obliczone na podstawie zobrażeń satelitarnych wskaźniki dla każdego z miesięcy porównano pomiędzy poszczególnymi oddziałami. Należy zauważyć, że w miesiącach od późnej jesieni do wczesnej wiosny wskaźniki NDVI oraz MSI są wyższe dla powierzchni o wysokim udziale sosny zwyczajnej (420a, 421a). Dla wskaźnika NDVI różnica ta wynosiła ok. 0,1 w kwietniu 2018 i 2019 roku oraz 0,2 w lutym 2019 roku. Na przełomie lat 2019 i 2020 była ona widoczna w części gospodarczej lasu. Jest to charakterystyczna różnica pomiędzy lasami liściastymi a iglastymi lub o znacznej domieszce drzew iglastych. Przepuszczalność świetlna warstwy

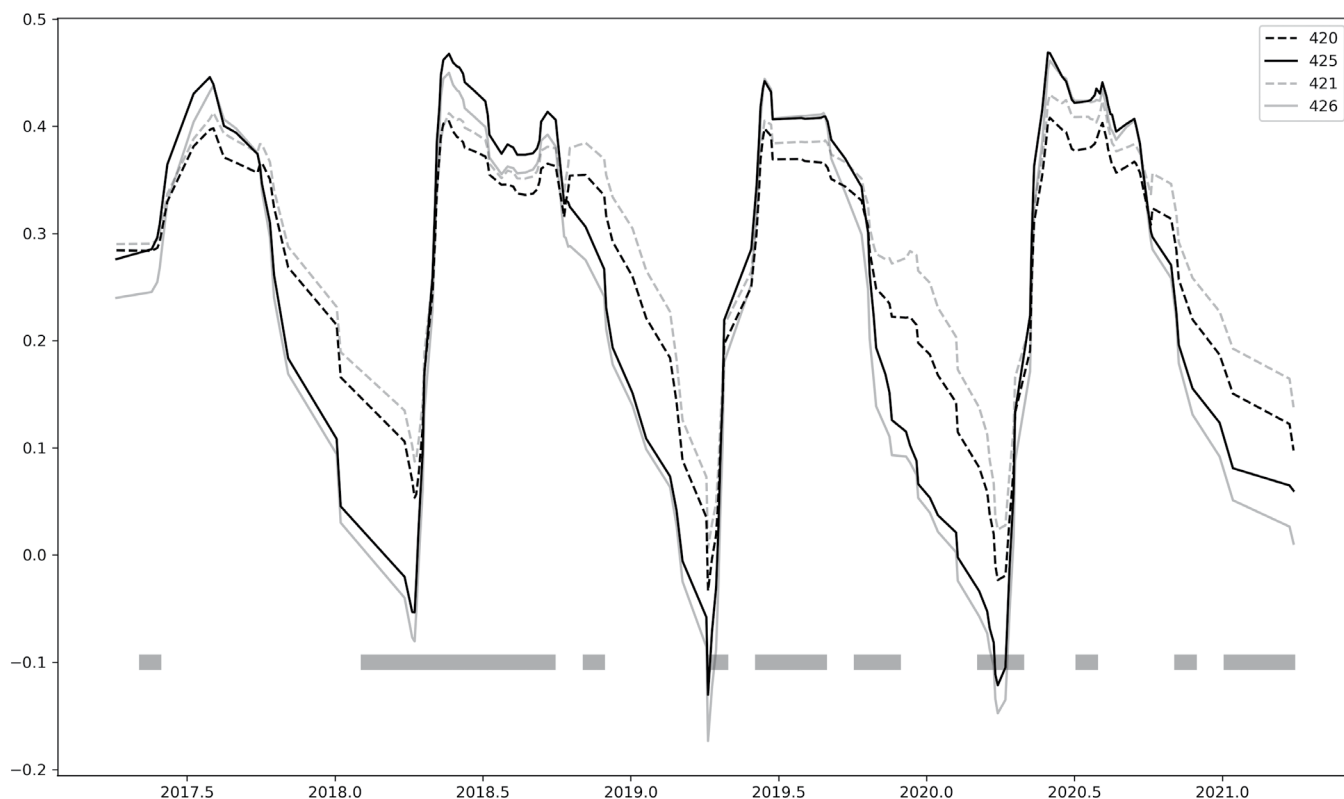
koron drzewostanów dębowych wynosi w przypadku drzewostanów ulistnionych 3–35%, nieulistnionych 43–69%. Dla drzewostanów sosnowych przepuszczalność ta wynosi 22–40% dla całego roku (Geiger 1959). Jeżeli zatem w niższych warstwach lasu nie występują gatunki iglaste, to dla okresu drzewostanów nieulistnionych na zobrażeniach satelitarnych nie zostanie uwidoczniła charakterystyka spektralna biomasy. Charakterystyka spektralna lasów mieszanych będzie zmieniać się głównie w części domieszki liściastej drzewostanu. Stąd wynika charakterystyczna fluktuacja wskaźników NDVI i MSI w wydzieleniach głównie liściastych 425g i 426c,h i spadek tych wskaźników w miesiącach, gdy drzewostany te są nieulistnione. Innym ciekawym okresem, w którym dzięki tym wskaźnikom odwzorowano w sposób istotny statystycznie udział w składzie gatunkowym sosny zwyczajnej, jest listopad 2019 – kwiecień 2020. Zarówno NDVI jak i MSI były wyższe dla lasów sosnowych niż dla lasów liściastych, przy czym dla NDVI różnica ta była istotna statystycznie tylko w części gospodarczej lasu, natomiast dla wskaźnika MSI dla lasów gospodarczych i objętych ochroną ścisłą. Oceniając wpływ suszy na odpowiedź spektralną drzewostanów, należy wziąć pod uwagę ten czynnik.



Rycina 1b. Wartość wskaźnika NDWI dla czterech powierzchni badawczych w oddziałach leśnych Lasu Młochowskiego: 420 (czarna linie przerywana), 425 (czarna linia ciągła), 421 (szara linia przerywana), 426 (szara linia ciągła). Oddziały 420 i 425 obejmują rezerwat przyrody Młochowski Grąd, oddziały 421 i 426 obejmują las gospodarczy. Szarą linią poziomą zaznaczono okres występowania suszy.
 Figure 1b. NDWI values for four research areas in forest divisions of the Młochowski Forest: 420 (black dotted line), 425 (black solid line), 421 (grey dotted line), 426 (grey solid line). Departments 420 and 425 include the Młochowski Grąd nature reserve, departments 421 and 426 include a commercial forest. The period of drought is marked with the horizontal grey line.

Należy zwrócić uwagę na charakterystyczne wartości wskaźnika NDWI dodatnio skorelowanego z obecnością wody powierzchniowej oraz wody obecnej na liściach drzew, np. dostarczanej poprzez proces transpiracji (Gao 1996): w trakcie długotrwałej suszy w roku 2018 NDWI było niższe w wydzieleniach głównie liściastych (425g i 426c,h) niż w wydzieleniach o wysokim udziale sosny (420a i 421a). Taka konfiguracja powtórzyła się jeszcze w trakcie suszy umiarkowanej w sierpniu 2019 r. (tylko wydzielenie 425g) i w sierpniu 2020 r. (ponownie wydzielenia 425g i 426c,h). Należy tu uwzględnić fakt, że w wydzieleniach leśnych boru mieszanego występują rośliny charakterystyczne dla środowisk suchych, natomiast transpiracja i związane z nią zapotrzebowanie na wodę roślin żyjących w takich środowiskach są wyższe niż w środowiskach wilgotnych. Rośliny żyjące w takich środowiskach przede wszystkim zabezpieczają dostęp do wody, nie zaś ograniczają jej zużycie i wyparowywanie (Motyka 1962, Obmiński 1975). Należy wziąć pod uwagę fakt, że mający miejsce w borze mieszanym, pomimo wystąpienia wielomiesięcznej suszy, proces transpiracji mógł wpłynąć na wyższą wartość wskaźnika NDWI. Takie fluktuacje tego wskaźnika po trwających co najmniej 2 miesiące suszy były już wcześniej

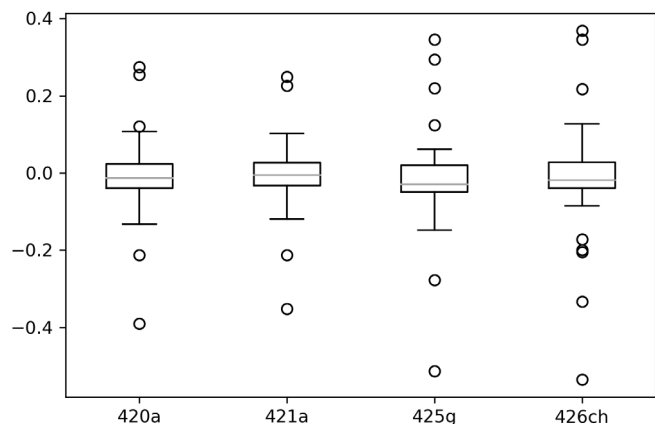
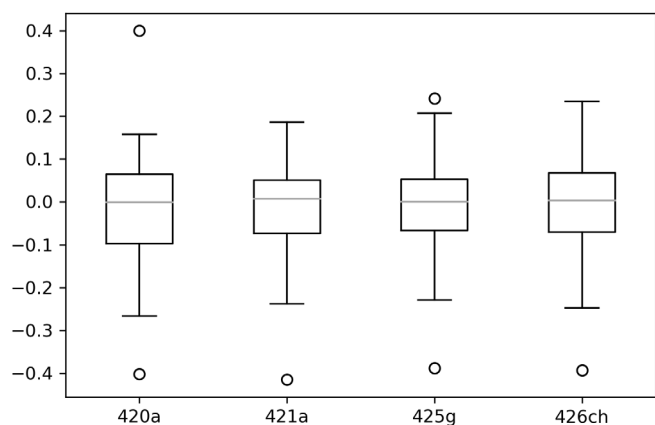
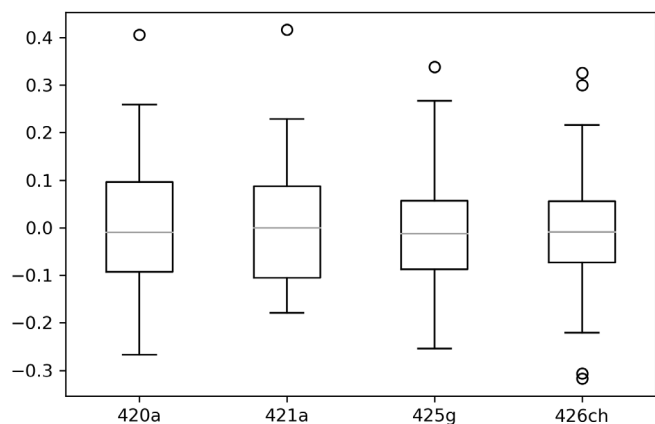
opisywane w literaturze (Karamihalaki et al. 2016, Serrano et al. 2019). W przypadku omawianych danych warto jednak zauważyć, że zróżnicowanie to jest w przypadku suszy 2018 roku odwrotne w przypadku wskaźników NDWI i NDVI. Istotnym wyjątkiem w danych jest zróżnicowanie pomiędzy lasami gospodarczymi a podlegającymi ochronie, które uwidoczniło się podczas miesięcy dotkniętych suszą. W maju 2017 r. NDVI było wyższe w lesie liściastym objętym ochroną niż w lesie liściastym gospodarczym (różnica wyniosła aż 0,29). Jednocześnie w tym miesiącu wskaźnik NDWI w lesie liściastym rezerwatu był niższy niż w lesie liściastym gospodarczym (różnica wyniosła 0,23). Zróżnicowanie pomiędzy lasami sosnowymi uwidoczniło się po całym okresie suszy 2018 roku: w lutym 2019 roku wskaźnik NDVI dla lasu sosnowego objętego ochroną był wyższy niż dla lasu sosnowego gospodarczego o 0,34. Należy stwierdzić zatem, że w wyniku wystąpienia suszy znaczne zróżnicowanie wskaźników pomiędzy wydzieleniami objętymi ochroną ścisłą a wydzieleniami gospodarczymi wystąpiło tylko w dwóch miesiącach: w maju 2017 r. i lutym 2019 r. Poza tymi dwoma miesiącami fakt objęcia ochroną ścisłą lasów liściastych i borów sosnowych nie różnicował odpowiedzi spektralnej lasu na suszę.



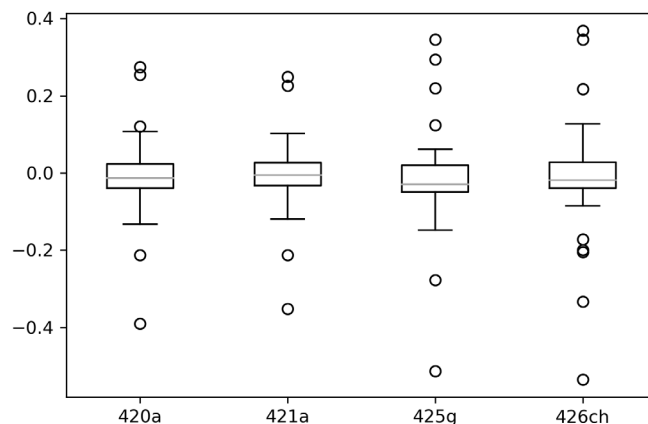
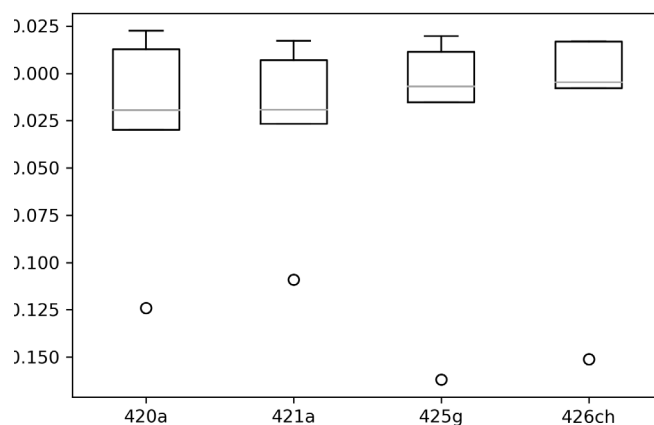
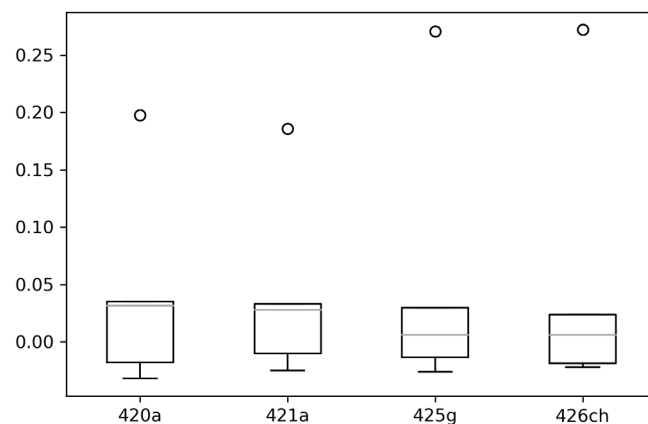
Rycina 1c. Wartość wskaźnika MSI dla czterech powierzchni badawczych w oddziałach leśnych Lasu Młochowskiego: 420 (czarna linie przerywana), 425 (czarna linia ciągła), 421 (szara linia przerywana), 426 (szara linia ciągła). Oddziały 420 i 425 obejmują rezerwat przyrody Młochowski Grąd, oddziały 421 i 426 obejmują las gospodarczy. Szarą linią poziomą zaznaczono okres występowania suszy. Figure 1c. MSI values for four research areas in forest divisions of the Młochowski Forest: 420 (black dotted line), 425 (black solid line), 421 (grey dotted line), 426 (grey solid line). Departments 420 and 425 include the Młochowski Grąd nature reserve, departments 421 and 426 include a commercial forest. The period of drought is marked with the horizontal grey line.

Bezpośredni wpływ susz można obserwować poprzez pomiar tendencji wzrostu lub spadku niektórych wskaźników podczas miesięcy bez susz, z suszami lekkimi i umiarkowanymi (ryc. 2). Należy zauważyć, że średnia miesięczna zmiana wskaźników w miesiącach bez susz rozkładała się symetrycznie wokół wartości 0,0, osiągając dla wskaźników NDVI i MSI wartości dodatnie w miesiącach wiosennych, ujemne w miesiącach jesiennych (ryc. 2a). W przypadku wskaźnika NDWI zależność ta była odwrotna. W przypadku wskaźników NDVI i NDWI zmienność ta rozkładała się w zakresie od $-0,1$ do $+0,1$. W przypadku MSI od $-0,05$ do $+0,05$. Zmienności te są typowe dla szeregów czasowych biomasy. W przypadku susz lekkich (ryc. 2b) można zaobserwować miesięczny wzrost wskaźników NDVI oraz MSI. Zmiana ta jest szczególnie zauważalna dla lasów sosnowych i wynosi $< +0,050$ w przypadku NDVI i $< +0,025$ w przypadku MSI. Należy tu zwrócić uwagę, że w latach 2017–2021 mieliśmy do czynienia z suszami lekkimi głównie w miesiącach letnich (VII–IX), podczas których standardowo występuje przyrost biomasy. Związany z nim wzrost wskaźników, np. NDVI, był jednak prawie dwukrotnie niższy niż w okresach bez występowania susz,

w którym wzrost wskaźników NDVI wynosił ok $+0,1$, MSI ok. $+0,05$ (ryc. 2a, kwartył 3 dla NDVI i MSI). Miesiącem o odrębnej zmienności wskaźników jest maj 2017 r., podczas którego wzrost wskaźników był charakterystyczny dla miesięcy wiosennych (Piao et al. 2006) i wynosił w przypadku wskaźnika NDVI ok. $+0,20$ dla lasów sosnowych i ok. $+0,25$ dla lasów liściastych. Należy tu jednak zwrócić uwagę, że maj 2017 r. był jedynym miesiącem podczas którego w sezonie wegetacyjnym 2017 r. wystąpiła susza. W przeciwieństwie do NDVI zmiana wskaźnika NDWI była w przypadku susz lekkich bardziej wyraźna. W przypadku każdej powierzchni badawczej zaobserwowano spadki tego wskaźnika nawet o $0,025$ w przypadku lasów sosnowych lub $0,015$ w przypadku lasów liściastych (zob. pierwszy kwartył na ryc. 2b). Wynik ten potwierdza wcześniejsze badania dowodzące, że wartości NDWI wykazują szybszą reakcję na warunki suszy lekkiej niż NDVI (Kotlarz et al. 2018, Nasiłowska et al. 2019, Schwartz et al. 2019), w związku z czym wskaźnik NDVI nie jest optymalny w badaniu bezpośredniego wpływu suszy na drzewostany (Gu et al. 2007). Wartość wskaźnika MSI w przypadku suszy lekkiej zachowywała się analogicznie do wskaźnika NDVI – ze względu



Rycina 2a. Zmiany wskaźników NDVI (po lewej), NDWI (w środku) i MSI (po prawej) w trakcie miesięcy bez suszy
Figure 2a. Changes in NDVI (left), NDWI (center) and MSI (right) indices during months without drought

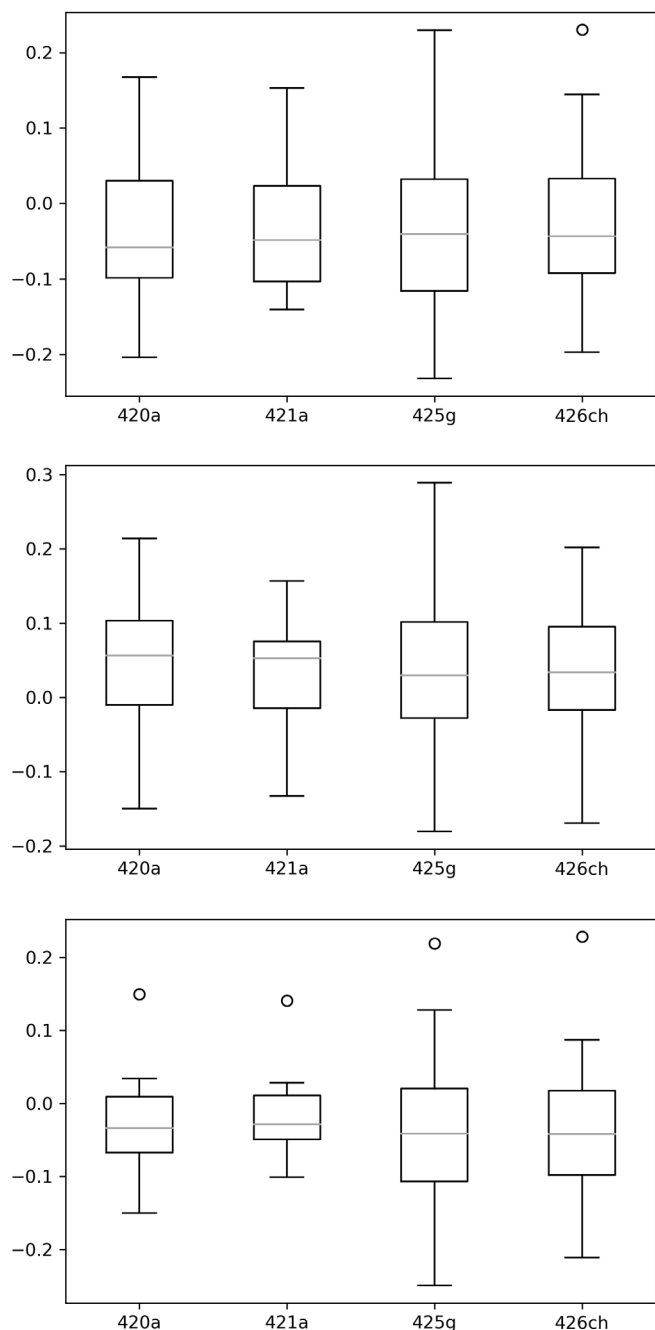


Rycina 2b. Zmiany wskaźników NDVI (po lewej), NDWI (w środku) i MSI (po prawej) w trakcie miesięcy z suszą lekką
Figure 2b. Changes in NDVI (left), NDWI (center) and MSI (right) indices during months with a light drought

na występowanie susz lekkich w okresie letnim wartość MSI wzrastała, jednak już w przypadku wystąpienia susz umiarkowanych (ryc. 2c) zauważyć można wyraźną tendencję spadkową wskaźnika (ryc. 2c, pierwszy kwartył wskaźnika MSI). Wskaźnik MSI spadł bardziej w wydzieleniach liściastych ($o -0,1$) niż sosnowych ($o -0,06$). Wyjątkowym miesiącem, w którym wskaźnik MSI w trakcie suszy wzrósł, był kwiecień 2018 r.

5. Wnioski

Analiza wielospektralnych zdjęć satelitarnych grądu wysokiego i boru mieszanego w Lesie Młochowskim w latach 2017–2021 pozwoliła na pośredni monitoring wpływu długotrwałej suszy roku 2018 i serii krótkotrwałych susz roku 2019 na odpowiedź spektralną poszczególnych drzewostanów. Występowanie susz nie wpłynęło na typowe cechy rocznych



Rycina 2c. Zmiany wskaźników NDVI (po lewej), NDWI (w środku) i MSI (po prawej) w trakcie miesięcy z suszą umiarkowaną

Figure 2c. Changes in NDVI (left), NDWI (center) and MSI (right) indices during months with a moderate drought

zmienności wskaźników dla lasów liściastych i iglastych lub mieszanych. W miesiącach poza sezonem wegetacyjnym występowało charakterystyczne dla wskaźników biomasy różnicowanie pomiędzy lasami iglastymi (mieszanymi) a liściastymi. Występowanie suszy najbardziej wpłynęło na wartości, różnicowanie i mierzoną w odstępach miesięcznych zmienność wskaźnika NDWI oraz MSI w przypadku susz umiarkowanych. W okresie suszy długotrwałej

2018 roku oraz dwukrotnie w okresach susz krótkotrwałych wskaźnik ten był wyższy w oddziałach leśnych o składzie gatunkowym charakterystycznym dla boru mieszanego niż w oddziałach o wyższym udziale gatunkowym drzew liściastych, w tym podlegającym ochronie ścisłej obszarze grądu wysokiego. Spadek wskaźnika NDWI był charakterystyczny dla miesięcy, w których występowała susza lekka, natomiast spadek wskaźników MSI oraz NDVI był wyraźny dla miesięcy, w których występowała długotrwała susza umiarkowana. W przypadku wskaźnika MSI spadek ten był wyraźniejszy w liściastych wydzieleniach leśnych niż w wydzieleniach z borem sosnowym.

Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

Źródło finansowania

Badania sfinansowano ze środków własnych autora.

Literatura

- Andrzejewski R. 1980. Mała encyklopedia leśna. Warszawa, PWN, 126 s.
- Bigler C., Bräker O.U., Bugmann H., Dobbertin M., Rigling A. 2006. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9(3): 330–343. DOI 10.3929/ethz-b-000037035.
- Boczoń A., Kowalska A., Dudzińska M., Wróbel M. 2016. Drought in Polish Forests in 2015. *Polish Journal of Environmental Studies* 26(2): 1857–1862. DOI 10.15244/pjoes/62797.
- Dotzler S., Hill J., Buddenbaum H., Stoffels J. 2015. The potential of EnMAP and Sentinel-2 data for detecting drought stress phenomena in deciduous forest communities. *Remote Sensing* 7(10): 14227–14258. DOI 10.3390/rs71014227.
- Gao B.-C. 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment* 58(3): 257–266. DOI 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- Geiger R. 1959. The climate near the ground. Cambridge, Harvard University Press, 217 s.
- Gu Y., Brown J.F., Verdin J.P., Wardlow B. 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters* 34(6): L06407. DOI 10.1029/2006GL029127.
- Guttman N.B. 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association* 35(2): 311–322. DOI 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x.
- Hargreaves G., Samani Z. 1985. Reference crop evatranspiration from ambient air temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1: 96–99.
- Jaime L., Batllori E., Margalef-Marrase J., Navarro M.Á.P., Lloret F. 2019. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) mortality is explained by the climatic suitability of both host tree and bark beetle populations. *Forest Ecology and Management* 448: 119–129. DOI 10.1016/j.foreco.2019.05.070.

- Józefkiewicz-Kotlarz J., Prusinkiewicz Z. 2000. Dynamika odżywnia 70-letniej sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na siedlisku boru suchego (Cladonio-Pinetum). *Roczniki Gleboznawcze* 51(1–2): 47–64.
- Karamihalaki M., Stagakis S., Sykioti O., Kyparissis A., Parcharidis I. 2016. Monitoring drought effects on mediterranean conifer forests using SPOT-vegetation NDVI and NDWI Timeseries, w: Conference: ESA Living Planet Symposium 2016: 9–13.
- Karamuz E., Bogdanowicz E., Senbeta T.B., Napiórkowski J.J., Romanowicz R.J. 2021. Is it a drought or only a fluctuation in precipitation patterns? – Drought reconnaissance in Poland. *Water* 13: 807. DOI 10.3390/w13060807.
- Kotlarz J., Nasiłowska S.A., Rotchimmel K., Kubiak K., Kacprzak M., 2018. Species diversity of oak stands and its significance for drought resistance. *Forests* 9(3): 126. DOI 10.3390/f9030126.
- Kozłowski W. 1983. Zarządzenie ministra leśnictwa i przemysłu drzewnego (230), w: Monitor Polski. Warszawa, 346 s.
- Moser B., Kipfer T., Richter S., Egli S., Wohlgemuth T. 2015. Drought resistance of *Pinus sylvestris* seedlings conferred by plastic root architecture rather than ectomycorrhizal colonisation. *Annals of Forest Science* 72(3): 303–309. DOI 10.1007/s13595-014-0380-6.
- Motyka J. 1962. Ekologia roślin. Warszawa, PWRiL, 144 s.
- Nasiłowska S.A., Kotlarz J., Kacprzak M., Rynkiewicz A., Rotchimmel K., Kubiak K. 2019. The impact of drought in 2015 on the health forest condition determined using Landsat-8 OLI images. *Leśne Prace Badawcze* 80(1): 55–68. DOI 10.2478/frp-2019-0005.
- Niedzielko J., Milczarek M., Szepietowska M. 2012. Analiza zależności między zawartością wody w roślinach zmierzoną w terenie a teledetekcyjnymi wskaźnikami roślinności. *Teledetekcja środowiska* 47.
- Obmiński Z. 1975. Ekologia lasu. Warszawa, PWN, 207 s.
- Piao S., Mohammat A., Fang J., Cai Q., Feng J. 2006. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change* 16(4): 340–348. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.002.
- Schwartz N.B., Budsock A.M., Uriarte M. 2019. Fragmentation, forest structure, and topography modulate impacts of drought in a tropical forest landscape. *Ecology* 100(6): e02677. DOI 10.1002/ecy.2677.
- Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. 2019. Evaluation of normalized difference water index as a tool for monitoring pasture seasonal and inter-annual variability in a Mediterranean agro-silvo-pastoral system. *Water* 11(1): 62. DOI 10.3390/w11010062.
- Šiška B., Eliašová M., Kollár J. 2020. Carabus population response to drought in lowland oak hornbeam forest. *Water* 12(11): 3284. DOI 10.3390/w12113284.
- Siwkcki R., Ufnalski K. 1998. Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *European Journal of Forest Pathology* 28(2): 99–112. DOI 10.1111/j.1439-0329.1998.tb01171.x.
- Sohar K., Helama S., Läänelaid A., Raisio J., Tuomenvirta H. 2014. Oak decline in a southern Finnish forest as affected by a drought sequence. *Geochronometria* 41(1): 92–103. DOI 10.2478/s13386-013-0137-2.
- Stereńczak K., Mielcarek M. 2020. Influence of selected habitat and stand factors on bark beetle *Ips typographus* (L.) outbreak in the Białowieża Forest. *Forest Ecology and Management* 459(1): 117826. DOI 10.1016/j.foreco.2019.117826.
- Vicente-Serrano S., Beguería S., López-Moreno J. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7): 1696–1718. DOI 10.1175/2009JCLI2909.1.
- Wang Q., Adiku S., Tenheunen J., Granier A. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote sensing of environment* 94(2): 244–255. DOI 10.1016/j.rse.2004.10.006.