

Impressum:

Angewandte Fernerkundung mit der Google Earth Engine

Georg Stauch (Hrsg.)

Geographisches Institut der RWTH Aachen

Templergraben 55

52056 Aachen

Aachen, 2024

120 S.

Verfügbar über das institutionelle Repositorium der RWTH Aachen University:

DOI: [10.18154/RWTH-2024-03408](https://doi.org/10.18154/RWTH-2024-03408)



[CC BY 4.0 Deed | Attribution 4.0 International | Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Dieser Sammelband wird lizenziert unter der CC-BY Lizenz, ausgenommen hiervon sind Teile oder Werke, die ausdrücklich unter einer anderen Lizenz stehen.

Sommerliche Dürreereignisse und ihre Auswirkungen auf die Vegetation am Beispiel von Aragonien in Spanien – eine Untersuchung mit der Google Earth Engine

Jana Werres und Svenja Rakers

Abstract

Dürreereignisse und Trockenheit haben sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem Phänomen mit gravierenden sozioökonomischen und ökologischen Folgen entwickelt, von denen nahezu jede Region der Erde betroffen ist. In der wissenschaftlichen Praxis hat sich das Dürremonitoring daher zu einem bedeutenden Forschungsgebiet entwickelt. Zur Überwachung der raum-zeitlichen Verteilung von Dürren werden oftmals einzelne oder zusammengesetzte Fernerkundungsindizes genutzt. In dieser Studie wird die zeitliche Verteilung von Dürreereignissen im Zeitraum von 2001 bis 2022 und die räumlichen Auswirkungen der sommerlichen Dürre 2016 auf die Vegetation in Aragonien (Nordspanien) untersucht. Dabei kommt die Google Earth Engine-Plattform zum Einsatz. Unter Berücksichtigung verschiedener MODIS- und CHRIPS-Satellitendaten wird der SPI (Standardized Precipitation Index) als Indikator für meteorologische Dürreereignisse genutzt und mit der Temperatur, Bodenfeuchte, Waldbrandentwicklung sowie dem NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) zur Bewertung des Vegetationszustandes in Verbindung gesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits moderate Dürreperioden einen negativen Einfluss auf die Vegetation haben können. Das Ausmaß der Auswirkungen wird dabei maßgeblich durch die vorherrschenden Gegebenheiten beeinflusst und kann lokalräumlich stark variieren. Besonders starke Rückgänge in der Vegetationsvitalität sind die landwirtschaftlich geprägten semi-ariden Gebiete des Ebro-Tals im Zentrum der Provinz sowie in den Vorläufern des Iberischen Gebirges im Südwesten Aragoniens zu verzeichnen.

1 Einleitung

Mit dem Klimawandel und der globalen Erderwärmung in den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Dürreproblematik global zugespitzt.

Der jüngste Bericht des IPCC (2022) (Intergovernmental Panel on Climate Change) verdeutlicht die alarmierende Situation. Wenn gleich Dürre nicht auf direkte Weise durch die Erderwärmung ausgelöst wird, kann eine zu-

nehmende Verdunstung bei abnehmender Bodenfeuchte zu einer Verschärfung des Dürre-Risikos in Bezug auf die Häufigkeit, Dauer und Intensität führen (Samaniego et al. 2018:421). Dürre ist ein komplexes Phänomen des Erdsystems, welches auf einer Vielzahl an meteorologischen, hydrologischen und biophysikalischen Prozessen beruht und nur schwer zu definieren ist. Im Allgemeinen beschreibt eine Dürre ein gegenüber dem langfristigen Durchschnitt anhaltendes Niederschlagsdefizit. Damit sind Dürren nicht an ein spezifisches Klima geknüpft, sondern können in allen Teilen der Erdoberfläche auftreten (Tran et al. 2016:167).

Die Mittelmeerregion gilt aufgrund ihrer großen innerjährlichen Niederschlagsvariabilität und langen Zeiträumen mit niedrigen Niederschlägen als besonders dürregefährdet (Gouveia et al. 2017:15). Aktuelle Studien konnten einen Anstieg von Dürreereignissen in dieser Region belegen, der sich in Zukunft noch verschärfen wird (vgl. Caloiero et al. 2018; Raymond et al. 2019; Gu et al. 2020). Damit steigen auch die Auswirkungen auf die Vegetation und Landschaft. Dürren können den Wasserkreislauf in einen extremen Zustand versetzen, der alle abhängigen Systeme belastet. Dies ist problematisch, da die Vegetationsdynamik vieler mediterraner Pflanzenarten in starker Abhängigkeit zur Wasserverfügbarkeit stehen. Insbesondere die biophysischen Prozesse in Pflanzen werden durch ein Wasserdefizit beeinflusst, was zu einer Beeinträchtigung des Wachstums

und der Entwicklung, bis hin zu einer erhöhten Mortalität führen kann (Swann 2018:192). Damit haben langanhaltende Dürreereignisse nicht nur negative Auswirkungen auf die vorzufindenden Ökosysteme und Artenvielfalt, sondern sind häufig auch mit erheblichen Ernteeinbußen in der landwirtschaftlichen Produktion verbunden. Gleichzeitig bergen außergewöhnliche Trockenperioden ein erhöhtes Risiko von Waldbränden und Waldsterben. Damit können insbesondere in ariden und semiariden Gebieten Degradations- und Desertifikationsprozessen einhergehen (Gouveia et al. 2017:15f.).

Aus diesem Grund besteht eine große Notwendigkeit darin, die räumlich-temporale Verteilung von Dürren und ihre Auswirkungen auf die Vegetation und Ökosysteme zu überwachen. Nur das ermöglicht es, möglichst effizient auf aktuelle und zukünftige Veränderungen reagieren und geeignete Adaptionen- und Mitigationsstrategien entwickeln zu können (Tramblay 2020:3). In der jüngeren Vergangenheit hat sich im Dürremonitoring neben der Analyse lokaler meteorologischer Daten insbesondere die Nutzung von Fernerkundungsdaten etabliert. Diese bieten das Potenzial, große Territorien abdecken und zugleich lange Zeitreihenanalysen durchführen zu können (Gouveia et al. 2015:16). Gängige Praxis ist dabei die Bewertung der Dürreereignisse mittels unterschiedlicher Dürreindizes. In diesem Paper wird der Standardized Precipitation Index (SPI) verwendet. Er gilt als der am häufigsten genutzte In-

situ-Parameter, um meteorologische Dürren zu überwachen (Pande et al. 2022:2040). Darüber hinaus stützt sich die Untersuchung u.a. auf die Verwendung des Normalized Difference Vegetation Indexes (NDVI) und den Einbezug der Bodenfeuchte, welche sich weltweit zur Quantifizierung von Dürrefolgen auf Vegetation etabliert haben (Dutta et al. 2015:54).

Verschiedene Studien, darunter Gouveia et al. (2015) und Zribi et al. (2016), konnten bereits deutliche Fortschritte in der Überwachung von Dürreereignissen im Mittelmeerraum und dem Verständnis ihrer Auswirkungen auf die Vegetation machen. Auf regionaler Maßstabsebene bestehen jedoch weiterhin erhebliche Forschungslücken. Spanien ist aufgrund der starken Heterogenität der Vegetation und des Klimas innerhalb des Landes besonders interessant. Ziel dieses Papers ist es daher, die Ausprägung von Dürreereignissen und ihre Folgen für die ansässige Vegetation auf regionaler Ebene in Spanien zu analysieren. Der zeitliche Fokus der Untersuchung liegt dabei auf den Sommermonaten, da die Vulnerabilität gegenüber Wasserdefiziten aufgrund des erhöhten Wasserbedarfs von Natur und Gesellschaft in diesem Zeitraum durchschnittlich am höchsten ist (Van der Weil et al. 2023:1786). In ersten Auswertungen mittels des SPIs (vgl. Kapitel 3) wurde eine Konzentration der letzten sommerlichen Dürreperiode im Jahr 2016 auf die wissenschaftlich bisher nur eingeschränkt beachtete

Region Aragonien im Norden des Landes festgestellt. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Paper zwei konkrete Fragestellungen mit Hilfe satellitengestützter Daten aus der MODIS-Collection, CHIRPS und GPM sowie der Google Earth Engine untersucht:

- 1) Welche saisonalen Dürreereignisse lassen sich anhand des Standardized Precipitation Indexes in Aragonien in den letzten 20 Jahren identifizieren?*
- 2) Inwieweit können Auswirkungen auf die Vegetationsbestände durch eine sommerliche Dürreperiode in der Region im jahreszeitlichen Verlauf festgestellt werden?*

Hierzu wird das Untersuchungsgebiet zunächst mit seinen geographischen und klimatischen Charakteristika dargestellt und die Datengrundlage und Methodik der Studie präsentiert. Darauf aufbauend werden signifikante Dürreperioden in Aragonien im zeitlichen Verlauf ausgemacht und die Vegetationsvitalität im von sommerlicher Dürre gekennzeichneten Jahr 2016 mit den wachstumsbedingenden Faktoren Bodenfeuchte, Lufttemperatur und Waldbränden in Verbindung gesetzt. Abgeschlossen wird das Paper mit einer kritischen Diskussion der Ergebnisse und einer schlussfolgenden Beantwortung der Forschungsfragen.

2 Untersuchungsgrundlagen

2.1 Untersuchungsgebiet

Aragonien (Aragón) liegt mit einer Fläche von mehr als 47.000 km² im Nordosten Spaniens und ist maßgeblich durch seine differenzierte Orographie geprägt. In dem an Frankreich angrenzenden Norden befinden sich die Pyrenäen, während sich der Mittellauf des Ebro durch die Ebene im zentralen Teil Aragoniens zieht. Bedeutende Nebenflüsse des Ebro sind der Aragón, der Gállego, der Segre und der Jalón. Das Iberische Randgebirge liegt im Süden der Region. In Abbildung 1 sind das Untersuchungsgebiet sowie die vorhandenen Höhenunterschiede von bis zu 2200 m zu erkennen. Die Hauptstadt Saragossa (Zaragoza) liegt im Zentrum der im Vergleich zu ganz Spanien dünn besiedelten Provinz (Gobierno de Aragon 2022).

Im aragonischen Gebiet herrscht ein kontinentales Mittelmeerklima vor, welches durch kalte

Winter und heiße Sommer gekennzeichnet ist, die zu thermischen Amplituden von mehr als 55°C führen können. Weiter gibt es zwei Niederschlagsperioden im Frühjahr und Herbst, während die Sommermonate besonders niederschlagsarm sind. Insgesamt weist der untersuchte Raum eine Heterogenität des Klimas auf, welches auf die Höhenunterschiede zwischen den Gebirgen und den Ebenen zurückzuführen ist (Gobierno de Aragon 2020a, b). In Bezug auf die Flächennutzung lässt sich Aragonien in mehrere Gebiete gliedern. Die Pyrenäen sowie das Iberische Gebirge sind vorwiegend durch Waldgebiete gekennzeichnet, die sich von den Vorläufern bis zu den Tallagen des Ebro immer stärker mit landwirtschaftlicher Nutzung vermischen. Die Siedlungsstrukturen konzentrieren sich vorwiegend auf die tieferen Lagen. Eine detaillierte Flächennutzungskarte ist dem Anhang 1 zu entnehmen.

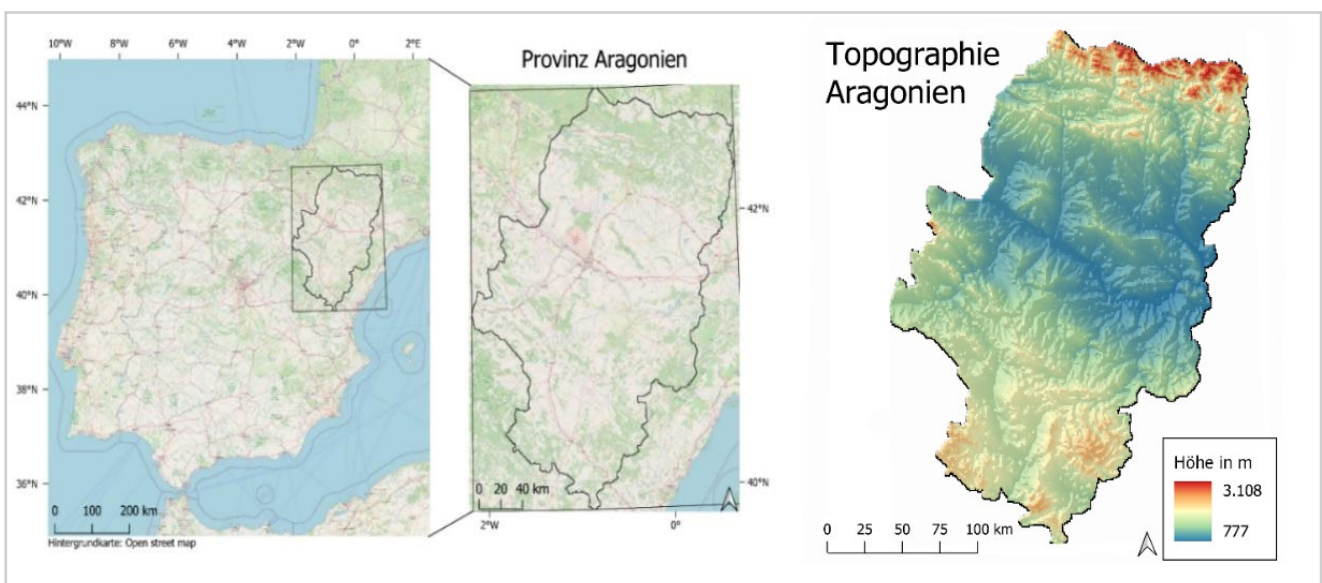


Abb. 1: Untersuchungsgebiet (Hintergrund: OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/)) sowie Topographie von Aragonien.

2.2 Datengrundlage

Zur näheren Analyse des Untersuchungsgebietes mit der Google Earth Engine wurde auf eine Bandbreite an Fernerkundungsdaten der cloud-basierten Geodatenverarbeitungsplattform zurückgegriffen.

Die Niederschlagsdaten aus dem *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data* (CHIRPS) Datensatz wurden zur Berechnung des Dürreindexes SPI verwendet. Die Daten mit einer Auflösung von $0,05^\circ$ reichen fortlaufend vom 01.01.1981 (Stand 2023) und umfassen alle Längengrade auf einer Breite von 50° S bis 50° N. Durch den nahezu globalen Datensatz können Niederschlagsschwankungen über einen langen Zeitraum hinweg im Raum beobachtet und verglichen werden (Funk et al. 2015).

Der MODIS Datensatz *MOD11A2.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km*, aus der Terra MODIS Collection beinhaltet die Landoberflächentemperatur pro Pixel, wobei die Pixelwerte den Durchschnitt von acht Tagen bilden. Die Raster von 1200×1200 km mit einer Auflösung von einem Kilometer stehen für den Zeitraum vom 18.02.2000 bis zum 09.11.2022 global zur Verfügung. Die Temperaturen werden in Kelvin angegeben (Wan et al. 2015).

Die Daten des Vegetationsindexes Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sind dem

Datensatz *MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m* aus der Terra MODIS Collection zu entnehmen und stehen seit dem 18.02.2000 bis heute (Stand 2023) auf einem globalen Maßstab zur Verfügung. Alle 16 Tage werden Daten mit einer räumlichen Auflösung von 250 m generiert. Dabei kommt jeweils der Pixelwert aus dem Erfassungszeitraum zur Verwendung, der die geringste Wolkenbedeckung bei gleichzeitig höchstem NDVI-Wert aufweist (Didan 2021).

Aus den *Global Land Data Assimilation System* Daten, welche aus drei Komponenten bestehen, wurde die Kollektion GLDAS-2.1 genutzt. Die Werte der Bodenfeuchtigkeit in 1 m Tiefe beziehen sich auf den fortlaufenden Zeitraum ab dem 01.01.2000 (Stand 2023) und basieren sowohl auf Modell-, als auch auf Beobachtungsdaten (Rodell et al. 2004).

In welchem Umfang und zu welchem Zeitpunkt es in dem Untersuchungsgebiet gebrannt hat, lässt sich anhand der *MODIS Burned Area Monthly Global 500m* Daten in einem Zeitraum vom 01.11.2000 bis heute (Stand 2023) nachvollziehen. Diese werden mit dem MCD64A1 Version 6 Burned Area-Datenprodukt von Terra und Aqua kombiniert. Aus den MODIS-Oberflächenreflexionsbilder aus 500 m Entfernung und den aktiven MODIS-Brandbeobachtungen aus 1 km Entfernung werden mit dem brennempfindlichen Vegetationsindex (VI) dynamische Schwellenwerte erstellt, die weltweit

in Rastern von 50 m die Waldbranddaten ausgeben (Giglio et al. 2015).

3 Methodik

3.1 Methodische Herangehensweise

Die zuvor vorgestellten Datensätze wurden genutzt, um jahreszeitliche Dürreperioden der letzten 20 Jahre in der Provinz Aragonien zu identifizieren und deren Auswirkungen auf die Vegetationsdynamik zu beurteilen. Für die Identifikation der Dürreperioden kam der standardisierte Niederschlagsindex (Standardized Precipitation Index SPI) zur Verwendung. Dieser wurde aufgrund der zeitlichen Begrenzung der Vergleichs-Datensätze aus der MODIS-Kollektion für einen Zeitraum von 2000 bis Mitte 2022 erstellt. Auf räumlicher Ebene wurde der SPI zunächst auf Spanien angewendet, um eine von sommerlicher Dürre betroffene Region für die Analyse auf kleinräumiger Skala auszumachen. Anhand der Ergebnisse wurde die Provinz Aragonien für die nähere Betrachtung hinzugezogen und mittels des SPI auf jahreszeitliche Dürreperioden untersucht. Die Provinz Aragonien erwies sich aufgrund der starken Dürrebetroffenheit sowie der Variabilität der Topographie und des damit verbundenen Klimas als besonders relevant.

Als Index zur näheren Untersuchung der Dürreauswirkungen auf die Vegetation wurde der Normalized Difference Vegetation Index NDVI genutzt und die Oberflächentemperatur,

der Niederschlag sowie die Bodenfeuchte als wachstumsrelevante Faktoren aus den zuvor beschriebenen Datensätzen in die Betrachtung mit einbezogen (Vincente-Serrano 2007:178, Tran et al. 2017:173). Außerdem wurden die Landnutzungsformen als weiterer Einflussfaktor berücksichtigt und die Waldbrände in dem ausgewählten Dürrejahr untersucht. Zu den einzelnen Parametern wurde jeweils Graphiken erstellt, die zum einen den Verlauf im Dürrejahr und zum anderen ein 20-jähriges Mittel als Referenzzeitraum beinhalten. Hierzu wurden die Mittelwerte aller Parameter pro Monat berechnet. Außerdem wurden Darstellungen der räumlichen Konzentrationen der Untersuchungsaspekte im Dürrejahr pro Jahreszeit mithilfe der Google Earth Engine erzeugt und anschließend mit QGIS aufbereitet. Auch der langjährige Durchschnitt der Sommermonate wurde vergleichend dargestellt. Diese Vorgehensweise ermöglicht einen direkten Vergleich des Dürrejahres mit dem Referenzzeitraum von 2000-2022. Die Funktionsweisen der beiden erwähnten Indizes werden im Folgenden näher beschrieben.

3.1 Standardized Precipitation Index SPI

Der Standardisierte Niederschlagsindex SPI wurde von McKee et al. (1993) entwickelt und ist ein klimatologischer, auf niederschlagsdatenbasierender Dürreindex. Es ist einer der am häufigsten verwendeten Indizes zur Identifikation von Dürren und wird von der World Mete-

orological Organization (WMO) als Maß für meteorologische Dürren empfohlen (Ag-haKouchak et al. 2015:454, EDO 2020:1f.). Der Index bietet eine standardisierte und einfach zu handhabende Klassifizierung für die Abweichungen der Niederschläge vom Mittelwert des Gesamtniederschlags in einem bestimmten Gebiet und zu einem bestimmten Zeitraum (EDO 2020:2). Da er nur Niederschlagsdaten erfordert, hängt seine Genauigkeit von der Qualität und Länge der Niederschlagsreihen ab (Vincente-Serrano 2007:178f., DWD 2018:1).

Die kumulativen Niederschlagswahrscheinlichkeiten der Gammaverteilung müssen in eine Standardnormalverteilung überführt werden, da die Niederschläge nicht normalverteilt sind. Das Ziel ist hierbei, dass die mittleren SPI-Werte bei Null liegen (EDO 2020:2). Somit ist der SPI die Anzahl der Standardabweichungen, um die der Niederschlag vom langjährigen Mittel abweicht (Vincente-Serrano 2007:178).

Ein negativer SPI- Wert steht für eine Trockenperiode bzw. für eine trockenere Periode als im langjährigen Mittel. Nach dem Deutschen Wetterdienst (2018) handelt es sich bei einem SPI von -1 bis -1.5 um eine moderate Dürre, von -1,5 bis -2 um eine schwere Dürre und darüber hinaus um eine extreme Dürre. Positive Werte verweisen auf eine Regenperiode (Ag-haKouchak et al. 2015:454, DWD 2015, EDO 2020:2). Es können demnach sowohl niederschlagsreiche als auch niederschlagsarme Perioden identifiziert werden (EDO 2020:4).

Der SPI kann Wasserdefizite für verschiedene Zeitskalen berechnen. In diesem Fall wurde aufgrund der Schwerpunktsetzung der Studie auf die Sommermonate eine Akkumulationsperiode von drei Monaten ausgewählt, sodass jahreszeitliche Ausprägungen und Stärken unterschieden werden können. Geringere Akkumulationsperioden verweisen auf direkte Auswirkungen der Dürren, darunter auch die Reduzierung der Bodenfeuchtigkeit (EDO 2020:2, Vincente-Serrano 2007:179)

3.2 *Normalized Difference Vegetation Index*

Der normalized difference vegetation index (NDVI) ist ein Indikator zur Beurteilung der Vegetationsbedeckung und der allgemeinen Vegetationsgesundheit. Er wurde in den frühen 1980er Jahren im Goddard Space Flight Center der NASA entwickelt (Tran et al. 2017:173). Es ist der am weitesten verbreitete Vegetationsindex, der auf Fernerkundungsdaten basiert (Vincente-Serrano 2007:177). Die Grundlage des Index bildet die Differenz zwischen der Absorption und Reflexion von rotem und nahinfrarotem Licht der grünen Blätter, da jedes Objekt unterschiedliche spektrale Reaktionen aufweist (Tran et al. 2017:173 f.; Huang et al. 2021:3).

Mathematisch wird der NDVI wie folgt ausgedrückt:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (-1 < NDVI < 1)$$

(Tran et al. 2017:174, Huang et al. 2021:3).

Die NDVI- Werte reichen von -1 bis +1, wobei nicht-vegetative Flächen wie Gewässer negative Werte aufweisen, Steine, Sand und Betonoberflächen nahe 0 sind und positive Werte auf das Vorhandensein lebendiger Vegetation hindeuten. Je höher der Wert, desto dichter und gesünder ist die Vegetation (Tran et al. 2017:174, Huang et al. 2021:3). In dem Google Earth Engine Datensatz *MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m* wird eine Skala von -0,2 bis 1 genutzt, womit nur auf die Vegetation eingegangen wird (Didan 2021).

Es wurden ausschlaggebende Zusammenhänge zwischen dem NDVI und der Oberflächentemperatur, dem Niederschlag sowie der Bodenfeuchtigkeit beschrieben (AghaKouchak et al. 2015:459). Der Temperatur- und der Feuchtigkeitsstress können zur Überwachung von Dürren in Bezug auf ihre räumliche Ausdehnung und Auswirkungen auf die Vegetation genutzt werden (Vincente-Serrano 2007:178, Tran et al. 2017:173).

4 Ergebnisse

4.1 *Standardized Precipitation Index*

Der in den Graphen dargestellte Standardized Precipitation Index zeigt die über drei Monate anhaltenden Dürreereignisse im Zeitraum von 2000 bis Mitte 2022 in Spanien (Abb. 2) und in Aragonien (Abb. 3).

Großräumig betrachtet wird aus dem Diagramm zu Spanien deutlich, dass das Land regelmäßig von den in Rot dargestellten trockenen Perioden gekennzeichnet ist. Die letzte sommerliche Dürre, bei der der SPI Grenzwert von -1 unterschritten wird, ist im Jahr 2016 zu verzeichnen. Der in Abbildung 4 abgebildeten räumlichen Darstellung des SPIs von Spanien ist zu entnehmen, dass es in gesamt Spanien im Jahr 2016 trockener als im 20-jährigen Durchschnitt ist. Im Norden des Landes lässt sich eine ausgeprägte sommerliche Dürre feststellen.

Die in Spanien aufgezeigten Dürreereignisse sind auch auf kleinräumiger Ebene sichtbar, unterscheiden sich jedoch teilweise in der Intensität und Dauer. In der zur näheren Betrachtung ausgewählten Provinz Aragonien sind insbesondere im Zeitraum von 2015 bis 2018 trockene Phasen und Dürren sichtbar. 2017 war das Gebiet beispielsweise von einer starken Herbstdürre betroffen. Die letzte sommerliche Dürre ist 2016 mit einem SPI von -1,49 zu verzeichnen. Damit handelt es sich entsprechend der Klassifizierung des Deutschen Wetterdienstes (2018:3) um eine moderate Dürre an der Grenze zu einer schweren Dürre. Sie konzentriert sich auf den Nordwesten und Nordosten der Provinz sowie auf den Bereich des Ebro-Tals. Der Süden ist weniger betroffen (Abb. 5).

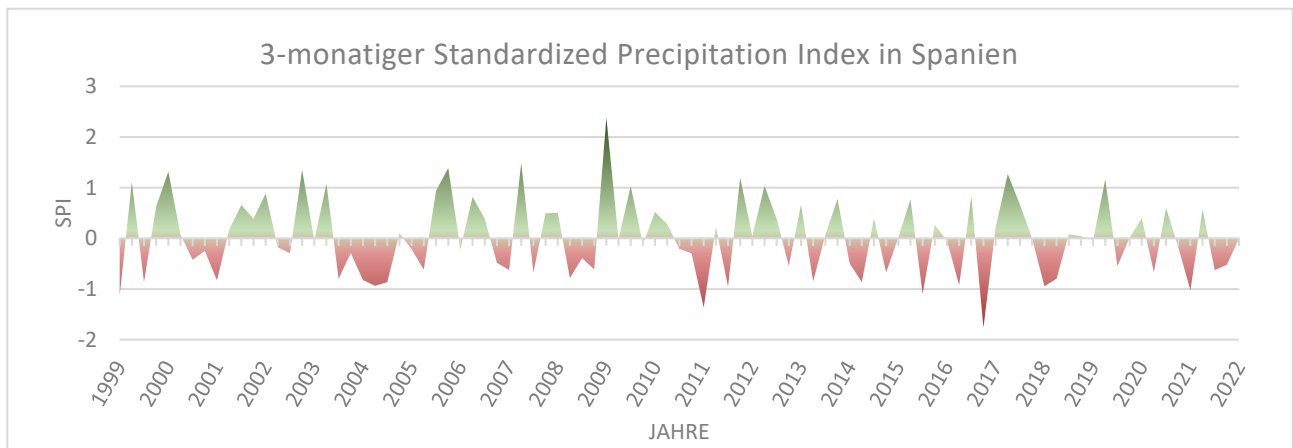


Abb. 2: 3-monatiger SPI von Spanien zwischen 2000 und 2022 (Eigene Darstellung).

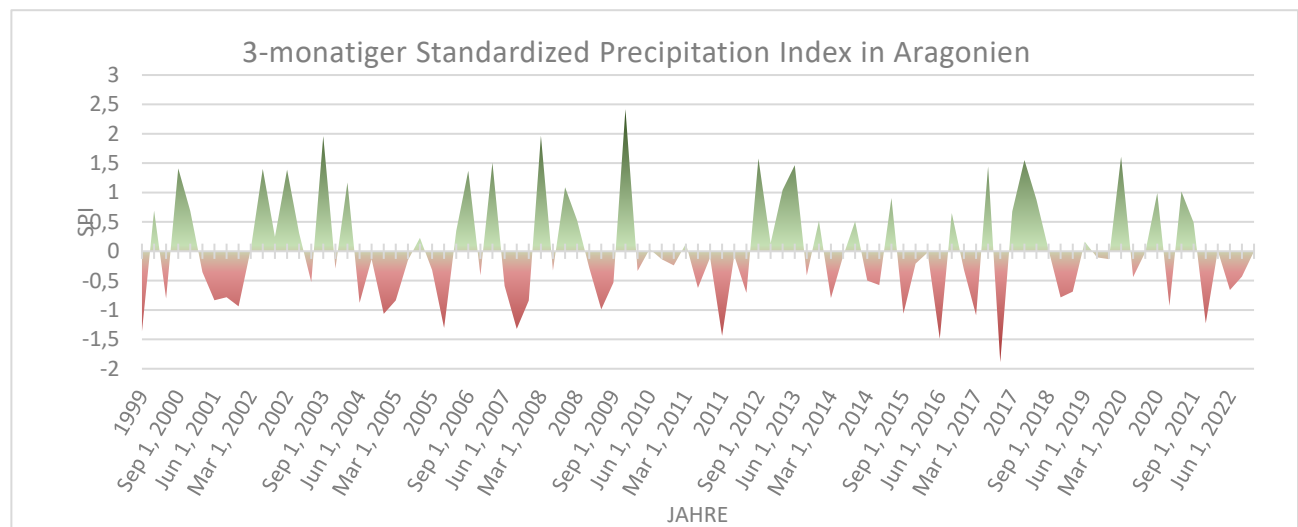


Abb. 3: 3-monatiger SPI von Aragonien (Eigene Darstellung)

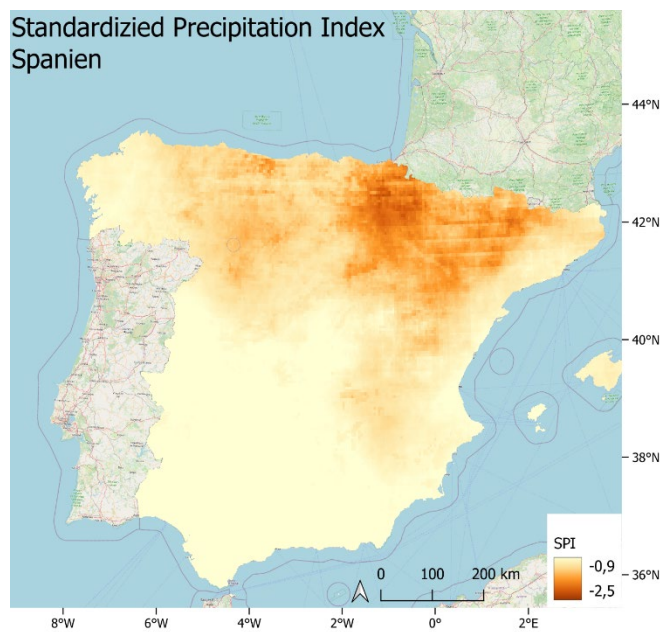


Abb. 4: Räumliche Darstellung des 3-monatigen SPIs im Sommer 2016 von Spanien (Eigene Darstellung, Hintergrundkarte: OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](#)).

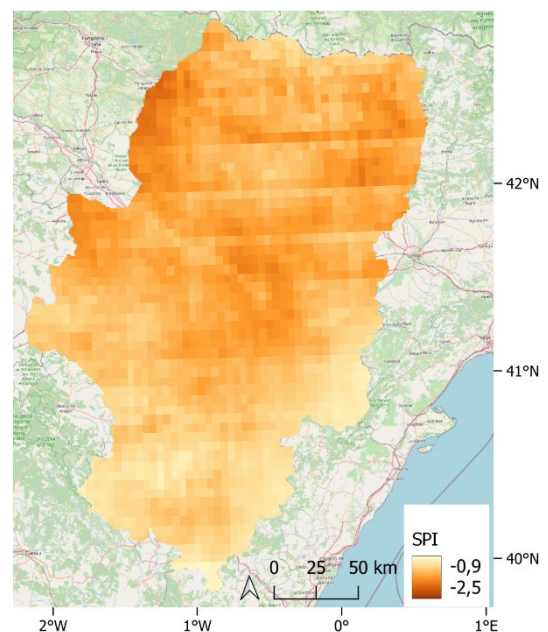


Abb. 5: räumliche Darstellung des 3-monatigen SPIs im Sommer 2016 von Aragonien (Eigene Darstellung, Hintergrundkarte: OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](#)).

4.2 Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse

Aragonien weist, wie bereits beschrieben, eine hohe Variabilität in der Orologie auf, aber auch in seinem Klima. Für einen Überblick und einen Vergleich von den Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen in Aragonien im Jahr 2016 und dem 20-jährigen Durchschnitt lassen sich Abbildung 6 und Abbildung 7 gegenüberstellen. In beiden Diagrammen werden die Temperaturen in °C auf der Y1-Achse und die Monatssummen der Niederschläge in mm auf der Y2-Achse in Bezug auf die Monate (X-Achse) dargestellt. Die Temperaturkurven verlaufen über das Jahr gesehen recht ähnlich, mit den höchsten Temperaturen im Juli mit 35,09 °C im 20-jährigen Mittel bzw. 35,99 °C 2016 und den geringsten Temperaturen im Januar mit 7,52 °C bzw. 8,93 °C. Jeweils im Frühling und im Spätherbst sind Niederschlagsmaxima zu verzeichnen, wobei 2016 im Februar und November vergleichsweise hohe Niederschläge mit 93,67 mm und 126,97 mm fielen. Im langjährigen Mittel belaufen sich die höchsten Niederschlagssummen pro Monat auf 71,70 mm im April und 69,96 mm im November. Das Jahr 2016 ist dagegen in den Sommermonaten von einer höheren Aridität gekennzeichnet als der 20-jährige Durchschnitt. Im August wird beispielsweise eine Monatsniederschlagssumme von 12,10 mm verzeichnet.

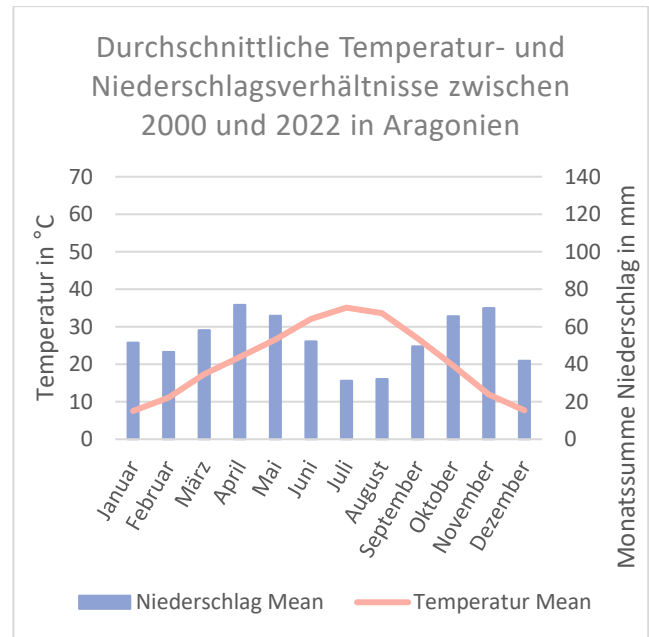


Abb. 6: Temperatur und Niederschlag in Aragonien im langjährigen Durchschnitt 2000-2022 (Eigene Darstellung).

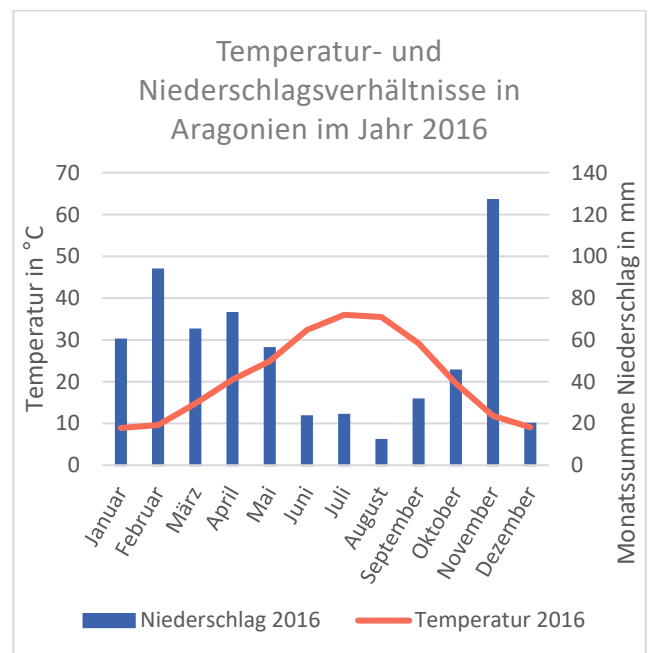


Abb. 7: Temperatur und Niederschlag in Aragonien für das Jahr 2016 (Eigene Darstellung).

Werden die Niederschlagsdaten in mm/Monat in Abbildung 8 für das Jahr 2016 und den 20-jährigen Durchschnitt in Aragonien vergleichend betrachtet, wird deutlich, dass die Nie-

derschläge im Sommer 2016 unter dem Durchschnitt liegen, während sie im Frühling und November überschreiten. In Abbildung 9 werden die räumlichen Verteilungen der Niederschläge über Aragonien in mm/Monat dargestellt. Es ist zu erkennen, dass insbesondere der Norden im Jahresverlauf durch vergleichsweise hohe Niederschläge gekennzeichnet ist (c-e). Im langjährigen Durchschnitt sind diese dort auch im Sommer zu verzeichnen (a). In den Sommermonaten 2016 blieben sie allerdings aus (b).

In Bezug auf die Temperaturen in Aragonien ist in Abbildung 10 zu erkennen, dass sie im Jahr 2016 von Februar bis Juni unter dem 20-jährigen Durchschnitt und im Sommer ca. 2 °C darüber lag. Im Herbst nähern sich die Temperaturgraphen einander wieder an. Räumlich betrachtet weisen die Gebirgsräume im Norden und Süden der Provinz geringere Temperaturen auf (im Winter bis zu -7,59 °C) als die tieferen Lagen, wie beispielsweise die Gebirgstäler und die Ebro-Senke. Auch die Flussbecken sind kühler als ihr unmittelbares Umfeld (Abb. 11, c-d). Die höheren Temperaturen in den Sommermonaten 2016 im Vergleich zum Durchschnitt lassen sich insbesondere im südwestlichen Gebirgsvorland und im Zentrum erfassen, sind allerdings grundsätzlich im ganzen Untersuchungsgebiet aufzufinden (a, b). Es werden Temperaturen von bis zu 43 °C gemessen. Der Temperaturgradient liegt, mit 11 °C, die im Norden verzeichnet wurden, bei 32 °C.

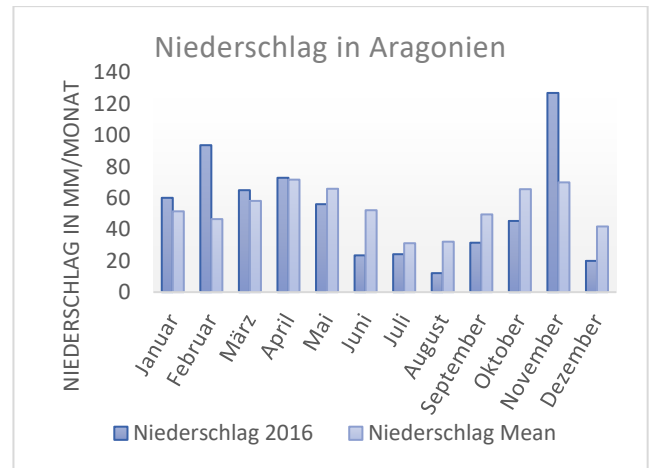


Abb. 8: Niederschläge in Aragonien für das Jahr 2016 und dem Durchschnitt von 2000-2020 im Vergleich (Eigene Darstellung).

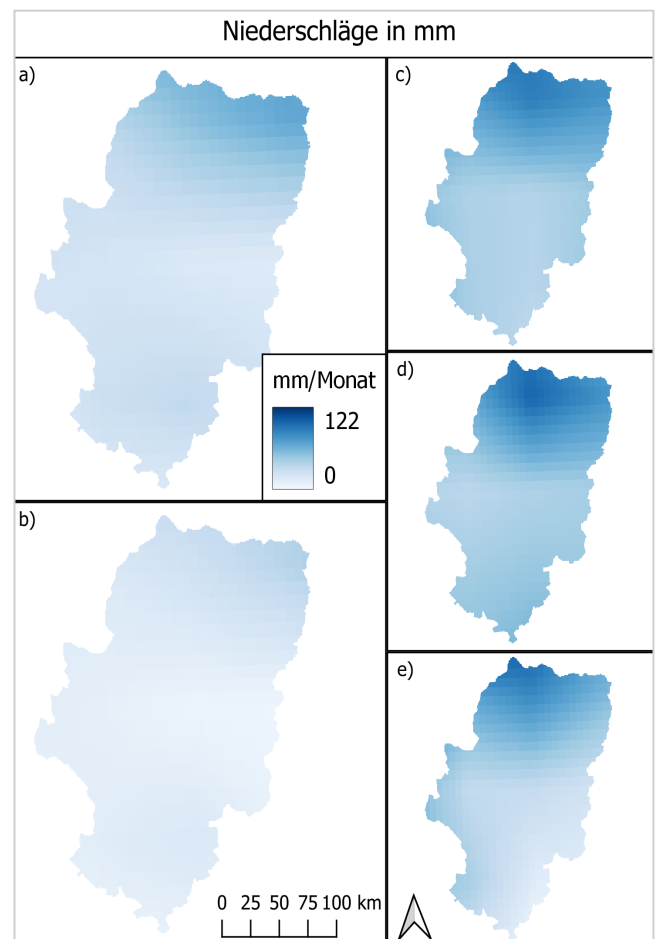


Abb. 9: Räumliche Verteilung der Niederschläge in Aragonien für a) den langjährigen Durchschnitt der Sommermonate 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).

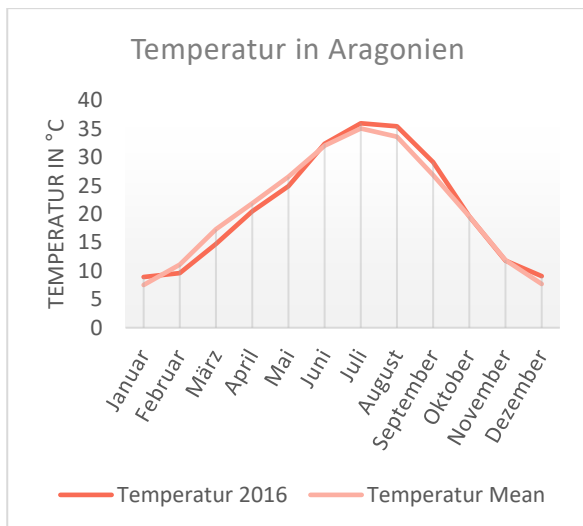


Abb. 10: Temperaturen in Aragonien für das Jahr 2016 und dem langjährigen Durchschnitt von 2000-2020 im Vergleich (Eigene Darstellung).

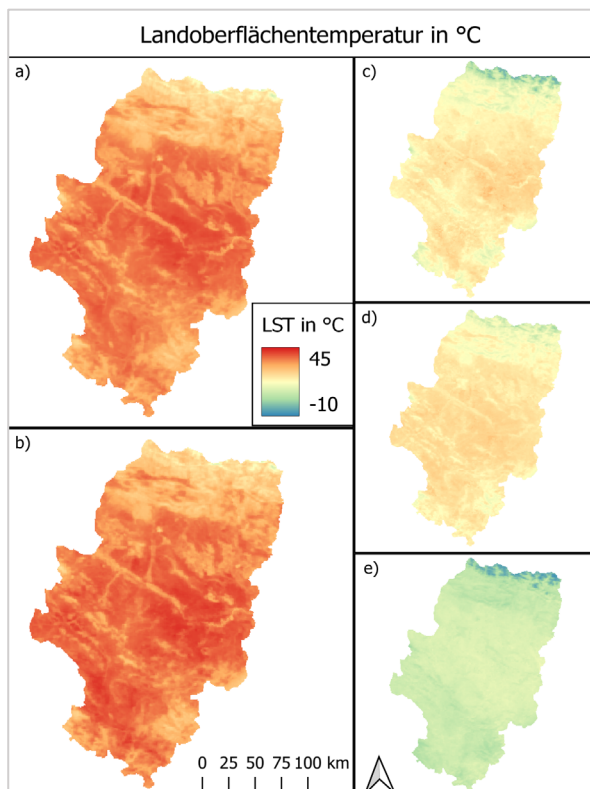


Abb. 11: Räumliche Verteilung der Temperaturen in Aragonien für a) den Durchschnitt der Sommermonate 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).

4.3 Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte in 1 m Tiefe in kg/m^2 liegt im gesamten Jahr 2016 unter dem allgemeinen

Durchschnitt von Aragonien (Abb. 12). Die höchste Differenz zwischen den zwei Graphen ist im Januar festzustellen. Zwischen April und Oktober liegt die Differenz nahezu gleichbleibend bei etwa 10 kg/m^2 . Im Dezember nähern sich die Werte einander wieder an. Ähnlich wie die Niederschlagsverläufe weisen die Werte der Bodenfeuchte zwei Peaks im Jahresverlauf auf, wobei sie den Niederschlagshöchstwerten im November mit einer leichten zeitlichen Verschiebung von einem Monat folgen. Entsprechend wird die höchste Bodenfeuchte mit 162 kg/m^2 im März gemessen, auf den ein Abfall bis 112 kg/m^2 im November erfolgt, gefolgt von einem deutlichen Anstieg bis Dezember. Im Jahr 2016 lagen die maximalen Bodenfeuchtigkeitswerte bei 153 kg/m^2 im April und die minimalen bei 103 kg/m^2 im September.

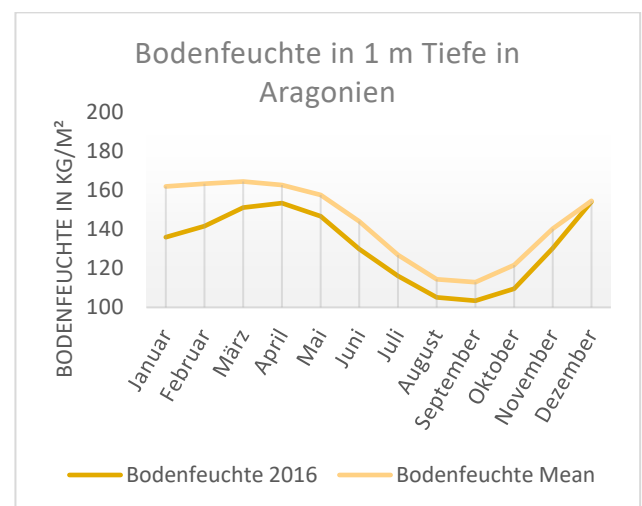


Abb. 12: Bodenfeuchte in Aragonien für das Jahr 2016 und den Durchschnitt von 2000-2022 im Vergleich (Eigene Darstellung).

Eine hohe Bodenfeuchte wird erneut besonders in den Gebirgsregionen und im Bereich der Flussbetten identifiziert. Die Gebirgsvorländer

im Norden und insbesondere der Süden sind durch deutlich niedrigere Bodenfeuchten gekennzeichnet (Abb. 13). Die trockene Periode in Aragonien erreichen ihren Höhepunkt im Herbst (d). Im Frühling und Winter erstreckt sich das Gebiet mit feuchten Böden auf 1 m Tiefe von Norden bis ins Zentrum von Aragonien (c-e). Die verringerte Bodenfeuchtigkeit im Sommer 2016 im Gegensatz zum 20-jährigen Durchschnitt prägt sich im gesamten Gebiet aus (a,b).

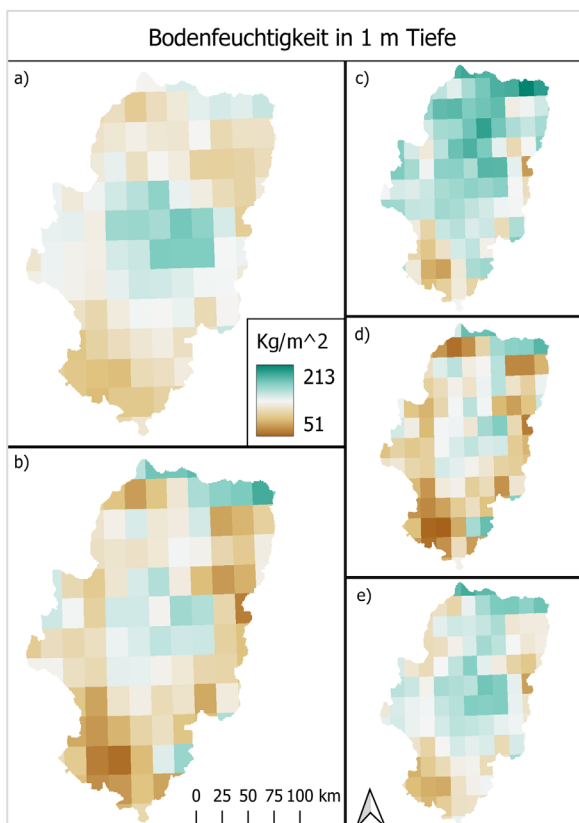


Abb. 13: Räumliche Verteilung der Bodenfeuchte in Aragonien für a) den langjährigen Durchschnitt der Sommermonate von 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).

4.4 NDVI

Der Normalized Difference Vegetation Index in Aragonien ist in Abbildung 14 im Jahresverlauf

für beide Untersuchungszeiträume angegeben. Im durchschnittlichen Jahresverlauf ist der NDVI durch einen Anstieg im Februar und einen Höhepunkt (0,46) im Mai charakterisiert. Ab da an fällt der NDVI bis August (0,38) und es folgt ein schwacher Anstieg. Im Jahr 2016 sind Unterschiede erkennbar: Bis Mitte Mai liegen die Werte deutlich über dem 20-jährigen Durchschnitt. Ab Mitte Mai bis Oktober liegt der NDVI in Aragonien dagegen unter dem Durchschnitt. Der Peak ist bereits im April und erreicht einen NDVI Wert von 0,48. Damit wird er etwas früher als im langjährigen Mittel und mit einem geringfügig höheren Wert erreicht. Im Mai fällt der Wert stärker als im Referenzzeitraum, bis das Minimum mit 0,36 im August erreicht wird. Im Oktober gleichen sich die Graphen dann wieder an.

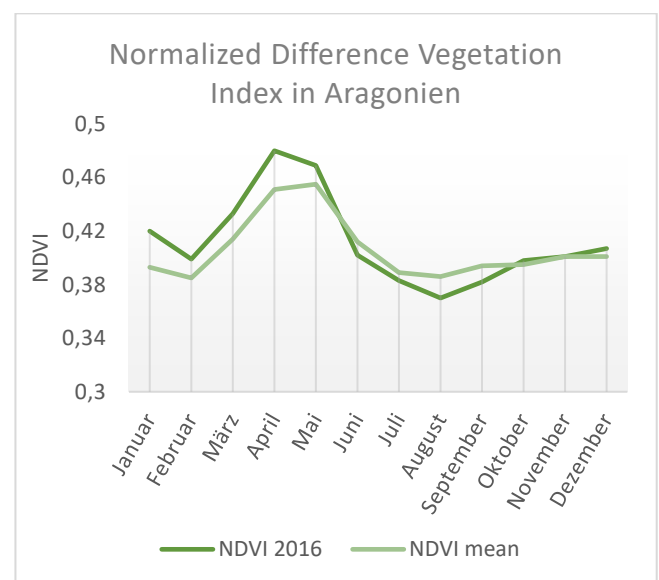


Abb. 14: Der NDVI in Aragonien für das Jahr 2016 und den langjährigen Durchschnitt von 2000-2020 im Vergleich (Eigene Darstellung).

Im Norden ist in den höchsten Lagen keine vitale Vegetation vorhanden, ansonsten sind im

nördlichen Teil Aragoniens überdurchschnittlich hohe NDVI Werte zu verzeichnen, genauso wie unmittelbar im Umfeld der Flussufer. Die niedrigeren Lagen im Zentrum und im Südwesten weisen einen geringeren NDVI und damit schwächere Vegetation auf (Abb. 15, c-e). Im Sommer fällt der NDVI in den niedrigeren Lagen sowohl im Referenzzeitraum als auch im Jahr 2016 deutlich ab (a, b). Auffallend ist, dass die südwestliche Vorgebirgsregion 2016 vergleichsweise sensible reagiert. Dort sind gegenüber dem sommerlichen Durchschnitt deutlich niedrigere Werte angegeben. In kleinerem Ausmaß hat sich die Grenze der niedrigeren NDVI-Werte sowohl im Zentrum als auch im Übergangsbereich zum nördlichen Gebirge räumlich in Richtung Norden verschoben.

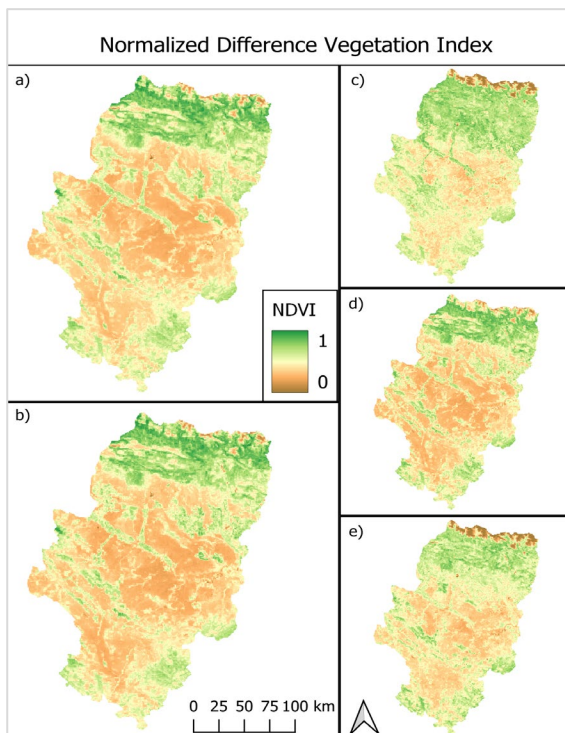


Abb. 15: Räumliche Verteilung des NDVIs in Aragonien für a) den langjährigen Durchschnitt der Sommermonate von 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).

4.5 Waldbrände

Kleinere Waldbrände brachen im Jahr 2016 vereinzelt in Regionen im Nordwesten von Aragonien aus. Die größten Brände entstanden nordwestlich von Saragossa und nordöstlich von Huesca. Westlich von Sariñena und östlich von Lanaja ereignete sich ein vergleichsweise kleiner Waldbrand. Der einzige Brand, der mit einiger Entfernung zu Siedlungen ereignete, entstand westlich von Sabiñánigo (Abb. 16).

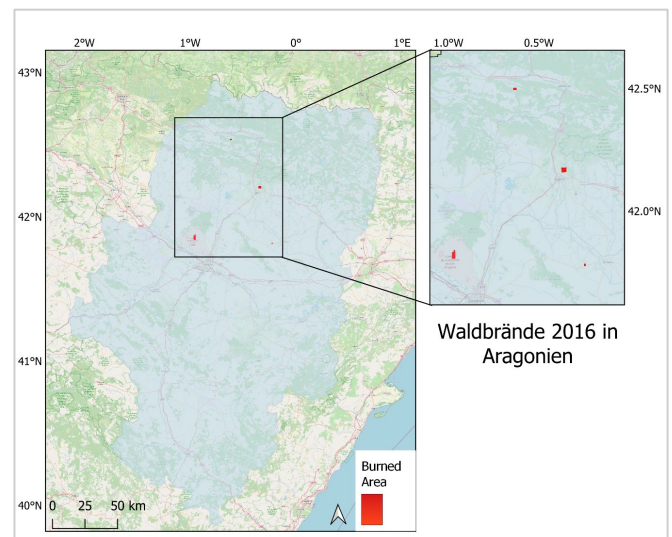


Abb. 16: Räumliche Verteilung der Waldbrände in Aragonien 2016 (Eigene Darstellung, Hintergrundkarte: OpenStreetMap, CC BY-SA 2.0).

In Bezug auf einer gemeinsamen Betrachtung der untersuchten Aspekte lässt sich der Norden Aragoniens als regenreichste Region mit der höchsten Bodenfeuchte auf einem Meter Tiefe, den geringsten Temperaturen in den höheren Lagen und der vitalsten Vegetation beschreiben. Das Zentrum und der Süden weisen dagegen geringe Niederschläge und höhere Temperaturen auf mit geringen NDVI-Werten. Ausnahmen sind die Flussbetten und das Iberische

Randgebirge. Während im zentralen Teil der Provinz eine hohe Bodenfeuchte gemessen wird, ist diese im Süden gering.

5 Diskussion

5.1 Identifikation von Dürreereignisse in Aragonien mittels des SPI

Diese Ergebnisse der Studie unterstreichen, dass der SPI als Index zur Identifizierung von Dürreereignissen in Aragonien genutzt werden und als Grundlage zur Bewertung von räumlichen und zeitlichen Auswirkungen von Dürren auf die Vegetation dienen kann. Die mehrjährige Trockenheit mit deutlich negativen Wasserbilanzen zwischen 2015 und 2018, die weite Teile West- und Mitteleuropas betroffen hat (Freund et al. 2023:2f.), wird auch in Aragonien deutlich. Wenngleich die Zeitreihe von 23 Jahren für die Aussage über langfristige Trends nicht ausreichend ist, ist auffallend, dass nur geringe Veränderungen des durchschnittlichen SPI über den gesamten Zeitraum der zwei Jahrzehnte hinweg zu beobachten sind. Damit scheinen die Ergebnisse zunächst anderen Studien zu widersprechen, die eine Zunahme der Dürreereignisse in Aragonien in den vergangenen Jahrzehnten festgestellt haben (vgl. Vincente-Serrano 2021:6). Sie sind jedoch der Tatsache geschuldet, dass der SPI ausschließlich den Niederschlag mit einbezieht und anderen Parametern gegenüber unempfindlich ist. Als

Rückschluss ist der konstante SPI damit zu erklären, dass die festgestellte Zunahme der Trockenheit im Mittelmeerraum vorwiegend auf einen steigenden atmosphärischen Verdunstungsbedarf zurückzuführen ist, während sich die Niederschläge in den vergangenen Jahrzehnten nicht maßgeblich verändert haben (Vincente-Serrano et al. 2020:11). Dieses Ergebnis stimmt mit der jüngsten Forschung ähnlicher Studien zum SPI in Südeuropa überein (vgl. Gaitán et al. 2020, Vicente-Serrano 2020).

5.2 Auswirkungen des Dürresommers 2016 auf die Vegetationsdynamik in Aragonien

Die Ergebnisse der wachstumsrelevanten Faktoren unterstreichen, dass die sommerliche Dürreperiode 2016 einen nachweislichen negativen Einfluss auf die Vegetation gehabt hat und lassen damit Rückschlüsse auf das Verhalten der Vegetationsbestände auf Wasserdefizite zu. Die Ausprägung der Vegetationsaktivität sind eng mit den topographischen und klimatischen Faktoren sowie der Art der Bodenbedeckung verknüpft (Vincente-Serrano 2006:199). Der visuelle Vergleich des NDVI im Referenzzustand zeigt eine reguläre räumliche Variabilität des Vegetationszustandes innerhalb Aragoniens. Die niederschlagreichen Waldregionen im Norden Aragoniens sind vorwiegend durch vitale Laubwälder gekennzeichnet, während tiefer gelegenen Flächen des Ebro-Tals ganzjährig deutlich geringere NDVI-Werte aufweisen,

welche auf das umliegende semiaride Klima und die landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen sind. Die natürlichen Unterschiede in Aragonien erschweren es, generalisierte Aussagen über die Auswirkungen sommerlicher Dürreereignisse auf die Vegetation und deren Hintergründe zu treffen. Gleichwohl macht der Vergleich der NDVI-Graphen deutlich, dass der Sommer 2016 gegenüber dem Referenzzeitraum durch einen Rückgang der Vitalität der Vegetation in Aragonien gekennzeichnet ist. Insbesondere mit Beginn der Dürre im Mai ist ein rapider Rückgang des NDVIs um fast 7 % innerhalb eines Monats zu verzeichnen, der sich deutlich vom landjährigen Durchschnitt unterscheidet. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf einen Stresszustand der Vegetation, welcher mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die ungewöhnliche Trockenheit ausgelöst wurde.

Die Ergebnisse des SPI haben eine Konzentration besonders schweren Dürreerscheinungen in der Grenzregion zu Navarra im Nordwesten Aragoniens sowie in den tieferen Lagen in den Randgebieten des Ebro-Tals ergeben. Interessanterweise zeigt der NDVI im Vergleich dazu nur geringe Verschiebungen der Vegetationsdynamik in den Pyrenäen und ihren Vorläufern gegenüber den weniger stark dürre betroffenen Regionen im Süden. Dieser Unterschied ist auf die klimatisch feuchtere und kühlere Ausgangssituation im Gebirge und die sich differierenden Vegetationsformen zurückzuführen.

Die Pyrenäen und Vorpyrenäen sind vorwiegend durch eine großräumige Laub- und Mischbewaldung sowie Nadelwäldern in den Hochlagen gekennzeichnet. Die natürliche Vegetation im Mittelmeerraum hat sich über die Jahrhunderte hinweg durch verschiedene morphologische und phänologische Strategien gut an wiederkehrende Dürreereignisse anpassen können (Gouveia et al. 2017:16). Im Allgemeinen reagieren Laubwälder und bewässerte Flächen unempfindlicher auf Dürreereignisse als Sträucher, Weideflächen und Trockenlandwirtschaften (Vincento-Serrano 2007:199). Insbesondere in den höheren Lagen der Pyrenäen befinden sich zudem Gebiete mit einem Wasserüberschuss, in denen genügend Abflüsse erzeugt werden, um die Vegetationsaktivität trotz zeitlich begrenzter Niederschlagsdefizite aufrechtzuerhalten (Vincento-Serrano et al. (2021:16).

Dem gegenüber stehen das Ebro-Tal und der Südwesten Aragoniens, die durch ein eher semi-arides Klima und eine starke landwirtschaftliche Nutzung dürregefährdeter sind. Hier konnte ein verhältnismäßig starker Rückgang der Wasserverfügbarkeit im Boden während der gegenüber dem Referenzzeitraum erfasst werden, der in einem direkten Zusammenhang mit dem Rückgang des Niederschlags bei gleichzeitig überdurchschnittlich hohen Temperaturen steht. In dessen Folge ist es zu einer vergleichsweise starken Abnahme der Vegetationsvitalität gegenüber anderen Regionen im Jahr 2016 gekommen. Dieses Ergebnis deckt

sich mit früheren Studien, die unterstreichen, dass die Bodenfeuchte und die Wasserverfügbarkeit die wesentlichen limitierenden Faktoren in der Pflanzendynamik des Mittelmeerraums darstellen (vgl. Vincento-Serrano 2007, Gouveia et al. 2017). Eine Vielzahl an Nutzpflanzen sind nicht an Trockenheit angepasst und sind nicht durch ein Wurzelwert gekennzeichnet, das bis in tiefere Bodenschichten reicht. Dadurch ist das Risiko höher, dass sie während einer Dürreperiode austrocknen (Samaniego/Thober 2018:25ff.). Insbesondere eine sommerliche Dürre im Ebro-Tal ist als problematisch zu betrachten, da diese mit Saragossa als bevölkerungsreichste Stadt der Provinz und der ausgeprägten Landnutzung eine besonders hohe Vulnerabilität gegenüber Dürreperioden und deren sozioökonomische Auswirkungen aufweist.

5.3 *Rückschlüsse der sommerlichen Dürreperiode 2016 auf zukünftige Dürren*

Es bleibt die Frage offen, als wie schwerwiegend die Auswirkungen des Dürresommers 2016 auf die Vegetationsdynamik zu bewerten sind und welche Rückschlüsse dies auf generelle Aussagen zu sommerlicher Dürrefolgen zulässt. Aus den Ergebnissen der Studie wird deutlich, dass die Bodenfeuchte als Schlüsselfaktor im Vegetationswachstum im Jahr 2016 ganzjährig unter dem langjährigen Mittel liegt. Gleichwohl ändert sich die durchschnittliche Differenz gegenüber dem Referenzzeitraum

auch während der im Niederschlagsdefizit befindlichen Sommermonate und deren Folgemonate nicht maßgeblich, sondern verhält sich entsprechend der natürlichen jahreszeitlichen Schwankungen. Dieses Ergebnis könnte darauf hinweisen, dass die sommerlichen Dürremonate 2016 nicht in einer starken, längerfristigen Austrocknung der tieferen Bodenschichten resultiert sind und die vorhandenen Wasserreserven in Aragonien trotz des Niederschlagsdefizit bis zu den Herbstniederschlägen weitestgehend erhalten geblieben zu sein scheinen. Derweil haben die überdurchschnittlich hohen Niederschlagswerte im Februar und November des Jahres eine Annäherung der Bodenfeuchte an das Referenzjahr zur Folge gehabt. Eine Erklärung für diese Gegebenheiten ist das *soil moisture memory* (engl.), welches besagt, dass der Boden als Speicher fungiert und mit einer zeitlichen Verzögerung auf positive oder negative klimatische Einflüsse reagiert (Martínez-Fernández 2021:2). In Aragonien könnte diese Tatsache insgesamt zu einer leichten Abmilderung der lokalräumlich vorhandenen Dürreauswirkungen geführt haben. Einerseits lässt die konstante Bodenfeuchtedifferenz vermuten, dass die Vegetation im Sommer noch von einem verbliebenen Wasserreservoir aus den überdurchschnittlich feuchten Frühlingsmonaten profitiert hat. Andererseits scheint das Risiko von langfristigen Folgen für die Vegetation durch das Einsetzen der Regenzeit im Herbst gemindert worden zu sein. Diese Schlussfolgerung wird durch die rasche Angleichung des

NDVI im Oktober an den Referenzzeitraum bekräftigt. Als Schnittstelle zwischen den gemäßigten und trockenen Biomen ist der mediterrane Raum zudem der waldbrandgefährdetste aller gemäßigten Ökosysteme (Tramblay 2020:3). Vergangene Studien haben festgestellt, dass das Ausmaß der Brandschäden wesentlich von der Vegetationsdichte und der Wasserverfügbarkeit im Frühling und Frühsommer beeinflusst wird. Bereits vergleichsweise kurze Dürreperioden können das Risiko von Waldbränden deutlich erhöhen und die Genesungszeit der Vegetation um mehrere Monate verzögern (Gouveia et al. 2012:3123). Im Jahr 2016 haben sich die Waldbrände auf wenige räumlich konzentrierte Waldflächen begrenzt. Dies stimmt mit dem offiziellen Waldbrand-Monitoring der Provinz Aragonien überein (Gobierno de Aragon 2020c) und lässt ebenfalls auf Feuchtigkeitsreserven in den Waldgebieten aus den Frühjahrsmonaten schließen.

Dennoch ist die Wirkung sommerlicher Dürreereignisse nicht zu unterschätzen. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass Dürreperioden insbesondere auf loklräumlicher Ebene bereits nach kurzer Dauer einen negativen Einfluss auf die Vegetation haben. Diese Belastung wird sich durch die anhaltende Klimaerwärmung auch in Aragonien erhöhen. In ihrer Studie prognostizieren Gaitán et al. (2020:15) für die Provinz bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine deutliche Verschärfung von

Dürren in Dauer und Intensität, welche im Besonderen auf den Anstieg der Temperaturen und der Evapotranspiration zurückzuführen sein werden. Gleichzeitig ist infolge der wärmer und trockener werdenden Bedingungen mit einer Zunahme der Waldbrände zu rechnen, die durch verbesserte Brandmanagementstrategien abgefangen werden müssen (Tramblay 2019:11). Insbesondere das Ebro-Tal und der Südwesten werden mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer Zunahme an Dürreereignissen betroffen sein (Gaitán et al. 2020:13). Somit liegt die räumliche Konzentration gezielt auf den Gebieten, die bereits innerhalb der Studie als besonders dürregefährdet und vulnerabel herausgestellt wurden. Während die sommerliche Dürre 2016 noch in relativ milden Folgen resultierte, kann eine zukünftige Anhäufung und Wiederkehr von sommerlichen Dürren eine gravierende Auswirkung auf die Vegetation und Landwirtschaft in Aragonien haben. Die Bodenfeuchte und der Grundwasserspiegel können sich bei mehreren aufeinander folgende Sommertrockenperioden im Winter gegebenenfalls nicht vollständig regenerieren (van der Weil et al. 2023:1796). Das macht das System anfälliger für weitere Dürren und kann von erheblichen Ernteverlusten, über großflächige Waldbrände bis hin zu Prozessen der Landdegradation führen (Vicente-Serrano 2007:173 f.).

4.4 *Methodenkritik und zukünftige Untersuchungen*

Abschließend soll die angewandte Methodenauswahl kritisch diskutiert werden. Die Google Earth Engine bietet als cloud-basierte Plattform eine große Bandbreite an frei verfügbaren Daten mit schnellen Verarbeitungs- und Berechnungszeiten an (Khan et al. 2021:412). Damit stellt sie in der Studie eine leistungsstarke Plattform dar, die es ermöglicht hat, unterschiedliche Satellitendaten mit einer hohen Flächenabdeckung zur Analyse von Dürreauswirkungen miteinander zu kombinieren. Vor dem Hintergrund dieser Studie hat sich der SPI besonders gut für das Dürremonitoring geeignet, da er bei vergleichsweise einfacher Anwendung zur Identifikation verschiedener Dürrentypen und Auswirkungen für beliebig viele Zeiträume geeignet ist (EDO 2020). Die größte Einschränkung dieses Indexes liegt darin, dass er ausschließlich auf dem Parameter des Niederschlags beruht. Dadurch hat er sich in Aragonien zur Identifikation von Trendentwicklung als eingeschränkt nutzbar erwiesen. Andere Studien haben in diesem Zusammenhang den SPEI als Dürreindex genutzt (vgl. Gaitán et al. 2020; Vicente-Serrano et al. 2021). Dieser bezieht als zusätzliche Komponente die Evapotranspiration mit ein und ist daher dazu geeignet, auch Temperatureinflüsse in das Dürremonitoring miteinfließen zu lassen (Gaitán et al 2020:12). Insbesondere im Kontext des voran-

schreitenden Klimawandels und der prognostizierten zunehmenden Temperaturen in Aragonien ist der SPEI zur Beurteilung von Dürren dem SPI in zukünftigen Untersuchungen vorzuziehen.

Der NDVI und die Bodenfeuchte haben sich als bedeutende Faktoren zur Beurteilung der Vegetationsdynamik herausgestellt. In Bezug auf die Bodenfeuchte ist zu beachten, dass die geringe räumliche Auflösung Aussagen über kleinräumige Veränderungen nur bedingt möglich gemacht hat. Dies ist der hohen Datenmenge geschuldet. Eine Untersuchung auf kleinerer Maßstabsebene, insbesondere im Umfeld der Flusssysteme, ist für weitere Forschungen zu Dürreauswirkungen in der Region interessant. Der NDVI ist ein weltweit anerkannter Index zur Einschätzung und Überwachung von Umweltbedingungen und konnte auch in dieser Studie effizient genutzt werden und wichtige Erkenntnisse für die Beurteilung der Dürreauswirkungen in der Provinz geben. Einige Studien empfehlen, zusätzlich zum NDVI den VCI (Vegetation Condition Index) zu nutzen, da dieser die langfristige Entwicklung des NDVI mit einbezieht (Dutta et al. 2015, Trambly 2020).

In dieser Studie wurde die bedeutende Rolle der Klimavariabilität auf den Einfluss von Dürreauswirkungen auf die Vegetation unterstrichen. Dennoch haben auch andere Aspekte wie die Landnutzungsveränderungen, Bodeneigenschaften, Vegetationstypen und Landmanagementstrategien einen wesentlichen Einfluss auf

die Empfindlichkeit von der Vegetation gegenüber Dürreereignisse (Gouveia et al. 2017:25). Um ein ganzheitliches Bild der Dürreauswirkungen auf die Vegetation abbilden zu können, sind weitere Untersuchungen lokaler Gegebenheiten daher sinnvoll.

6 Schlussfolgerungen

Dürre ist ein weitreichendes Phänomen, das sich in seiner räumlichen und zeitlichen Ausprägung stark unterscheidet. In dieser Studie wurden saisonale Dürreereignisse und der Einfluss sommerlicher Dürreperioden auf die Vegetationsdynamik in Aragonien untersucht. Anhand des Standardized Precipitation Indexes konnten in Aragonien in den letzten 20 Jahren eine Vielzahl wiederkehrender Trockenperioden und Dürreereignisse identifiziert werden. Insbesondere sommerliche Dürren sind als problematisch zu betrachten, da die Nachfrage nach Wasser in diesen Monaten besonders hoch ist. Die letzte sommerliche Dürre 2016 in der Region führte bereits in einem kurzen Zeitraum zu einem negativen Einfluss auf die Vegetationsvitalität. Die semi-ariden und landwirtschaftlich geprägten Gebiete des Ebro-Tals und die nordwestlichen Vorläufer des Iberischen Gebirges sind besonders stark von abnehmenden Vegetationsdynamiken durch die sommerliche Dürreperiode gekennzeichnet. Demgegenüber weisen die Waldflächen in den feuchteren Pyrenäen und Vorpyrenäen trotz starker Dürreerscheinungen nur geringe Verluste der

der Vegetationsvitalität auf. Dies verdeutlicht, dass sich die Auswirkungen von Dürren in Aragonien entsprechend der lokalräumlichen Gegebenheiten deutlich unterscheiden. Vor allem die Landnutzung mit Fokus auf die landwirtschaftlichen Flächen und Waldgebiete sowie die Wasserverfügbarkeit konnten als Schlüsselfaktoren identifiziert werden. Diese Faktoren könnten somit als Basis für weiterführende Forschungsansätze in der Region dienen.

Die Ergebnisse der Studie sind als Grundlage zu sehen, um die Relevanz der Dürreproblematik zu unterstreichen. Es konnte herausgestellt werden, dass die Auswirkungen der Vegetation auf Dürre räumlich variieren und durch die gegebenen Umstände beeinflusst werden. Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird auch in Aragonien eine deutliche Verschärfung der Dürreproblematik prognostiziert, sodass von einer Intensivierung der Dauer und Häufigkeit von Dürren ausgegangen werden kann. Diese länger anhaltenden Wasserdefizite führen heute und zukünftig zu einer deutlich erhöhten Vulnerabilität gegenüber Ernteverlusten, Landdegradation und der Waldbrandgefahr. Für eine aussagekräftige Beurteilung von sommerlichen Dürrefolgen ist es daher unerlässlich, alle Wechselwirkungen zwischen der Vegetation und ihrem Umfeld zu berücksichtigen. Nur das macht ein langfristiges Dürremonitoring möglich.

Literaturverzeichnis

- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D. & Hain, C. R. (2015): Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. In: *Reviews of Geophysics* 53, 452-480.
- Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P. & Frustaci, F. (2018): Drought analysis in europe and in the Mediterranean Basin using the standardized Precipitation Index. In: *Water* 10, 1043.
- Didan, K. (2021): MODIS, Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N.R., Saha, S.K. & Siddiqui, A.R. (2015): Assesment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). In: *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 18, 53-63.
- [DWD] Deutscher Wetterdienst (2015): Standardized Precipitation Index (SPI). <<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions,glossar.html?lv2=102248&lv3=603324>> zuletzt abgerufen am 26.05.2023.
- [DWD] Deutscher Wetterdienst (2018): RCC Node-CM Produktbeschreibung Version 3.1.1. Dürre. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/rcccm/int/descriptions/spi/pds_spi_de.pdf;jsessionid=71F7FEB3E14FDB12E675A633744D0601.live31093?__blob=publicationFile&v=9> zuletzt abgerufen am 26.05.2023.
- [EDO] Copernicus European Drought Observatory (2020): Standardized Precipitation Index (SPI). <https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_spi.pdf> zuletzt abgerufen am 26.06.2023.s
- Freund, M.B., Helle, G., Balting, D.F, Basllis, N., Schleser, G.H. & Cubasch, U. (2023): European tree-ring isotopes indicate unusual recent hydroclimate. In: *Communications Earth & Environment* 4(26), 1-8.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, J., Hoell, A. & Michaelsen, J. (2015): The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. In: *Scientific Data* 2, 150066.
- Gaitán, E., Monjo, R., Pórtoles, J., Pino-Otín, M.R. (2020): Impact of climate change on drought in Aragon (NE Spain). In: *Science of the Total Environment* 740, 1-18.
- Giglio, L., Justice, C., Boschetti, L. & Roy, D. (2015). MCD64A1 MODIS, Terra + Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <<https://doi.org,10.5067,MODIS,MCD64A1.006>> zuletzt abgerufen am 30.06.2023.

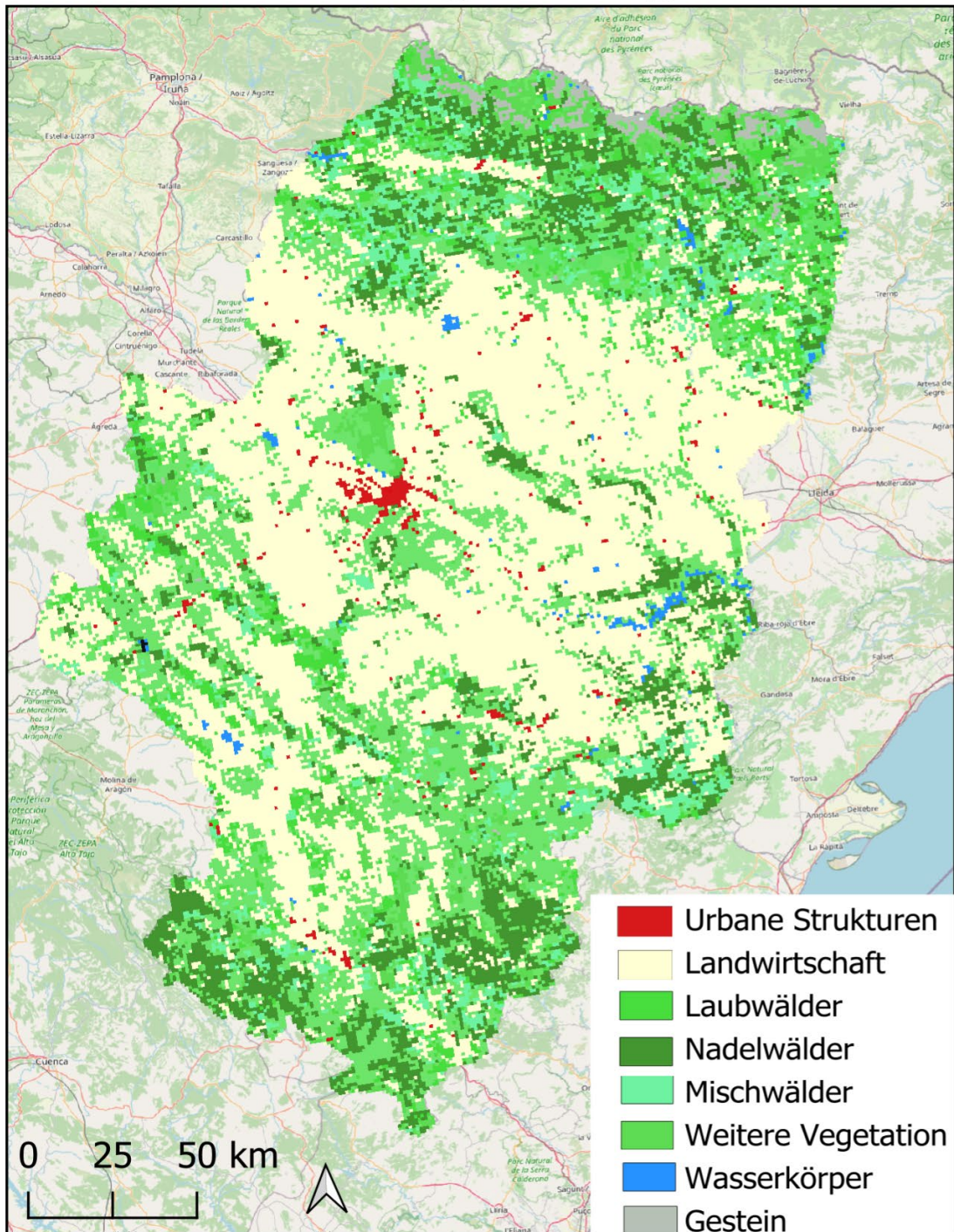
- Gobierno de Aragon (2020a): ATLAS CLIMÁTICO DE ARAGÓN. <<https://idearagon.aragon.es/atlas/Clima>> zuletzt abgerufen am 26.05.2023.
- Gobierno de Aragon (2020b): Serie histórica diaria de precipitaciones. <<https://idearagon.aragon.es/atlas/Clima/info/atlas-climatico-aragon,precipitacion/serie-historica-diaria-de-precipitaciones>> zuletzt abgerufen am 26.05.2023.
- Gobierno de Aragon (2020c): Evolución histórica de los incendios forestales en Aragón entre 2001 y 2019. <<https://www.aragon.es/documents/20127/3647218/Incendios+Evolucion+historica+2001-2019.pdf/df1a7354-05be-f705-afd6-9695258e7988?t=1651234056537>> zuletzt abgerufen am 26.06.2023.
- Gobierno de Aragon (2022): Densidad de población. <<https://idearagon.aragon.es/atlas/Aragon/info/poblacion/densidad-de-poblacion/densidad-de-poblacion>> zuletzt abgerufen am 26.05.2023
- Gouveia, C. M., Bastos, A., Trigo, R. M. & DaCamara, C. C. (2012): Drought impacts on vegetation in the pre- and post-fire events over Iberian Peninsula. In: *Natural Hazards Earth System Sciences* 12, 3123–3137.
- Gouveia, C.M., Trigo, R.M., Beguería, S. & Vicente-Serrano, S.M. (2017): Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. In: *Global and Planetary Change* 151, 15-27.
- Gu, L., Chen, J., Yin, J., Sullivan, S.C., Wang, H.-M., Guo, S., Zhang, L. & Kim, J.-S. (2020): Projected increases in magnitude and socioeconomic exposure of global droughts in 1.5 and 2 °C warmer climates. *Hydrological Earth System Sciences* 24, 451–472.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y. & Shao, G. (2021): A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. In: *J. For. Res.* 32 (1), 1-6.
- IPCC (2022): *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability; IPCC Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA.
- Khan, R. & Gilani, H. (2021): Global drought monitoring with drought severity index (DSI) using Google Earth Engine. In: *Theoretical and Applied Climatology* 146, 411-427.
- Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A. & Almendra-Martín, L. (2021): Soil moisture memory and soil properties: an analysis with the stored precipitation fraction. In: *Journal of Hydrology* 593, 1-10.
- Pande, C.B., Al-Ansari, N., Kushwaha, N.L., Srivastava, A., Noor, R., Kumar, M., Moharir, K.N. & Elbeltagi, A. (2022): Forecasting of SPI and Meteorological Drought Based on the Artificial Neural Network and M5P Model Tree. In: *Land* 11, 2040-2064.

- Qazvini, A.T. & Carrion, D. (2023): A Spatiotemporal Drought Analysis Application Implemented in the Google Earth Engine and Applied to Iran as a Case Study. In: *Remote Sensing* 15, 2218-2234.
- Raymond, F., Ullmann, A., Camberlin, P., Drobinski, P. & Smith, C.C. (2016): Extreme dry spell detection and climatology over the Mediterranean Basin during the wet season. In: *Geophysical Research Letters* 43, 7196–7204.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Toll & D. (2004): The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 85(3), 381-394.
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E.F. & Marx, A. (2018): Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. In: *Nature Climate Change* 8(5), 421-426.
- Swann, A.L.S. (2018): Plants and drought in a changing climate. In: *Current Climate Change Reports* 4, 192–201.
- Tramblay (2020): Challenges für drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. In: *Earth Science Reviews* 210, 1-24.
- Tran, H.T., Campbell, J.B., Tran, T.D. & Tran, H.T. (2017): Monitoring drought vulnerability using multispectral indices observed from sequential remote sensing. In: *GIScience & Remote Sensing* 52(2) 167-184.
- Van der Weil, K., Batelaan, T. J. & Wanders, N. (2023): Large increases of multi-year droughts in north-western Europe in a warmer climate. In: *Climate Dynamics* 60, 1781-1800.
- Vincente-Serrano, S. (2007): Evaluating the Impact of Drought Using Remote Sensing in a Mediterranean, Semi-arid Region. In: *Natural Hazards* 40, 173-208.
- Vicente-Serrano, S., Domínguez-Castro, F., Murphy, C. Hannaford, J., Reig, F., Peña- Angulo, D., Tramblay, Y., Trigo, R., MacDonald, N., Luna, M., McCarthy, M., Schrier, G., Turco, M., Camuffo, D., Noguera, I., El Kenawy, A., García-Herrera, R., Becherini, F. & Valle, A. (2020): Long term variability and trends of droughts in Western Europe (1851-2018). In: *International Journal of Climatology* 41, E690-E717.
- Wan, Z., Hook, S. & Hulley, G. (2015): MOD11A2 MODIS, Terra Land Surface Temperature, Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. (2015) < <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006>> zuletzt abgerufen am 30.06.2023.

Anhang

Anhang 1: Landnutzungsformen in Aragonien (Eigene Darstellung, OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](#)).

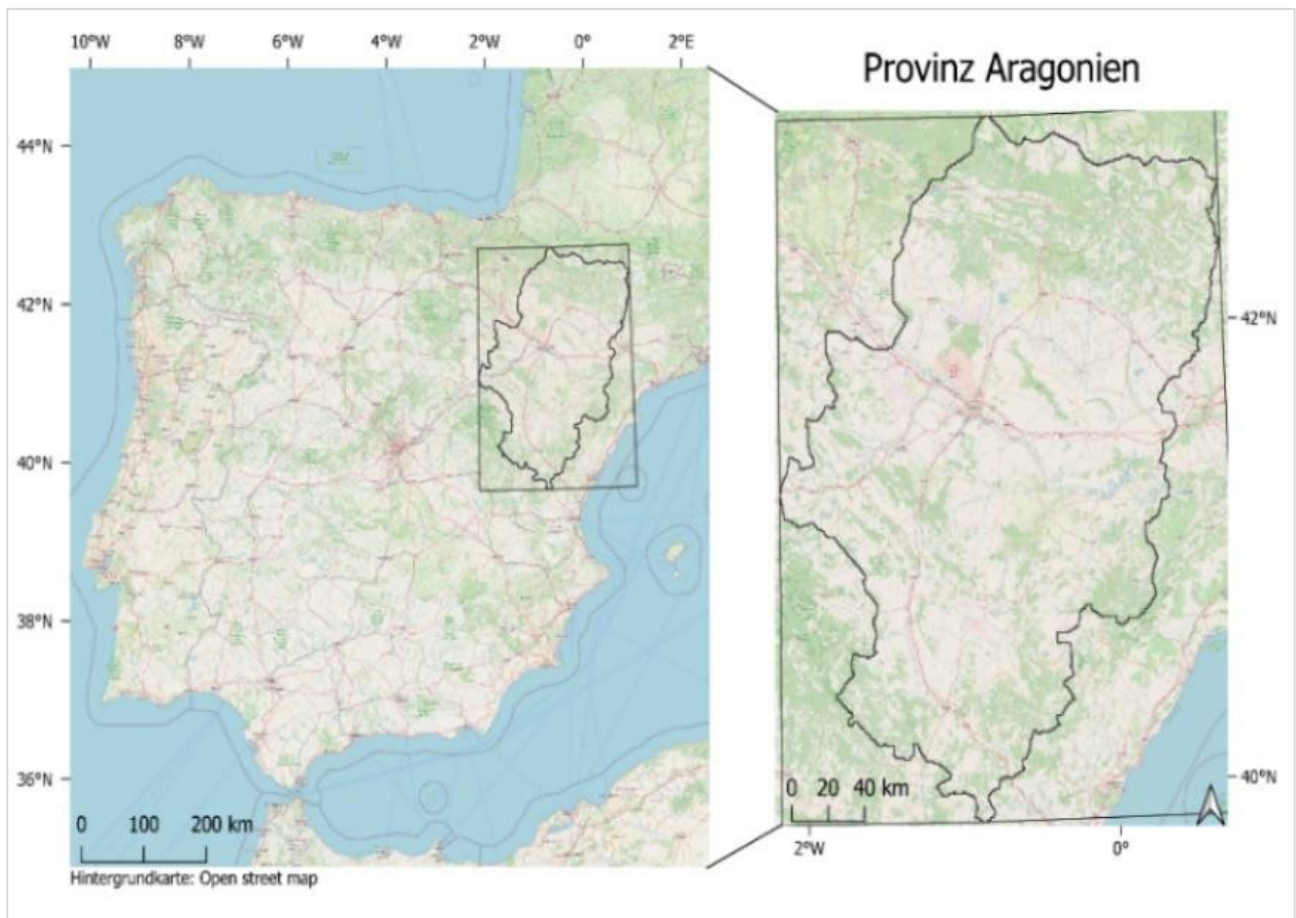
Landnutzung in Aragonien

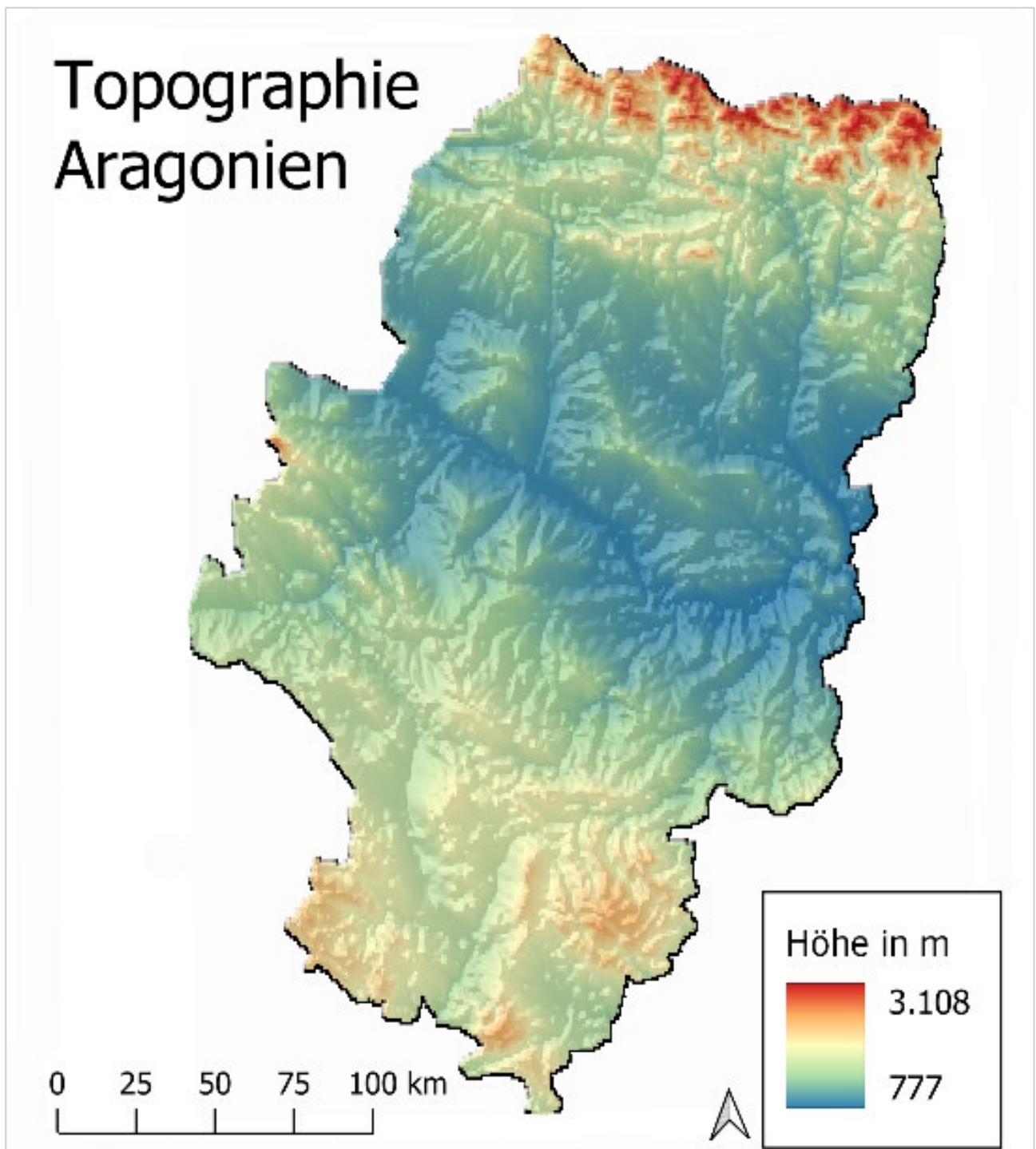


Hintergrundkarte: Open Street Map

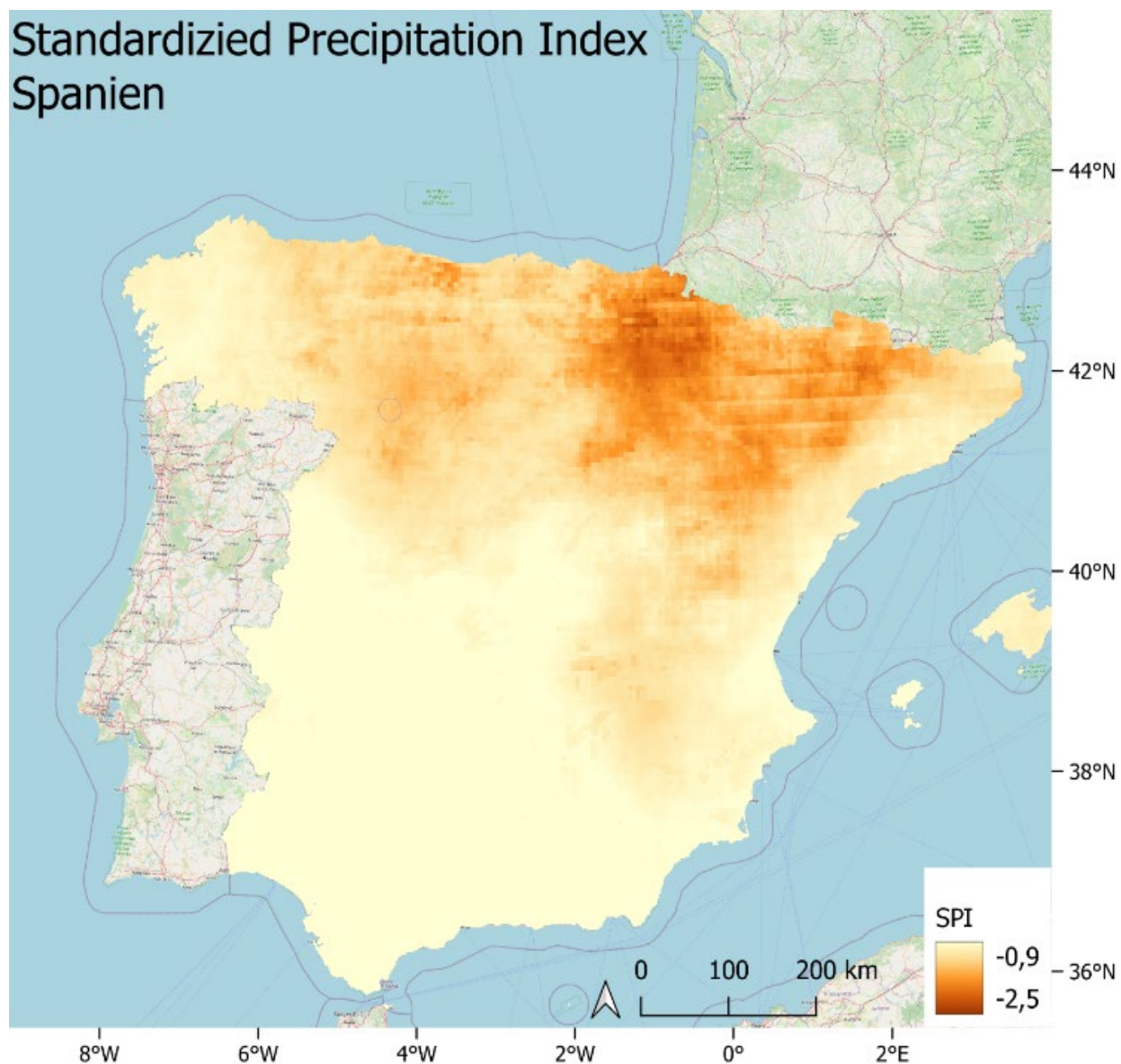
Datengrundlage: Copernicus CORINE Land Cover

Anhang 2: Untersuchungsgebiet Aragonien (Eigene Darstellung, OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](#)).

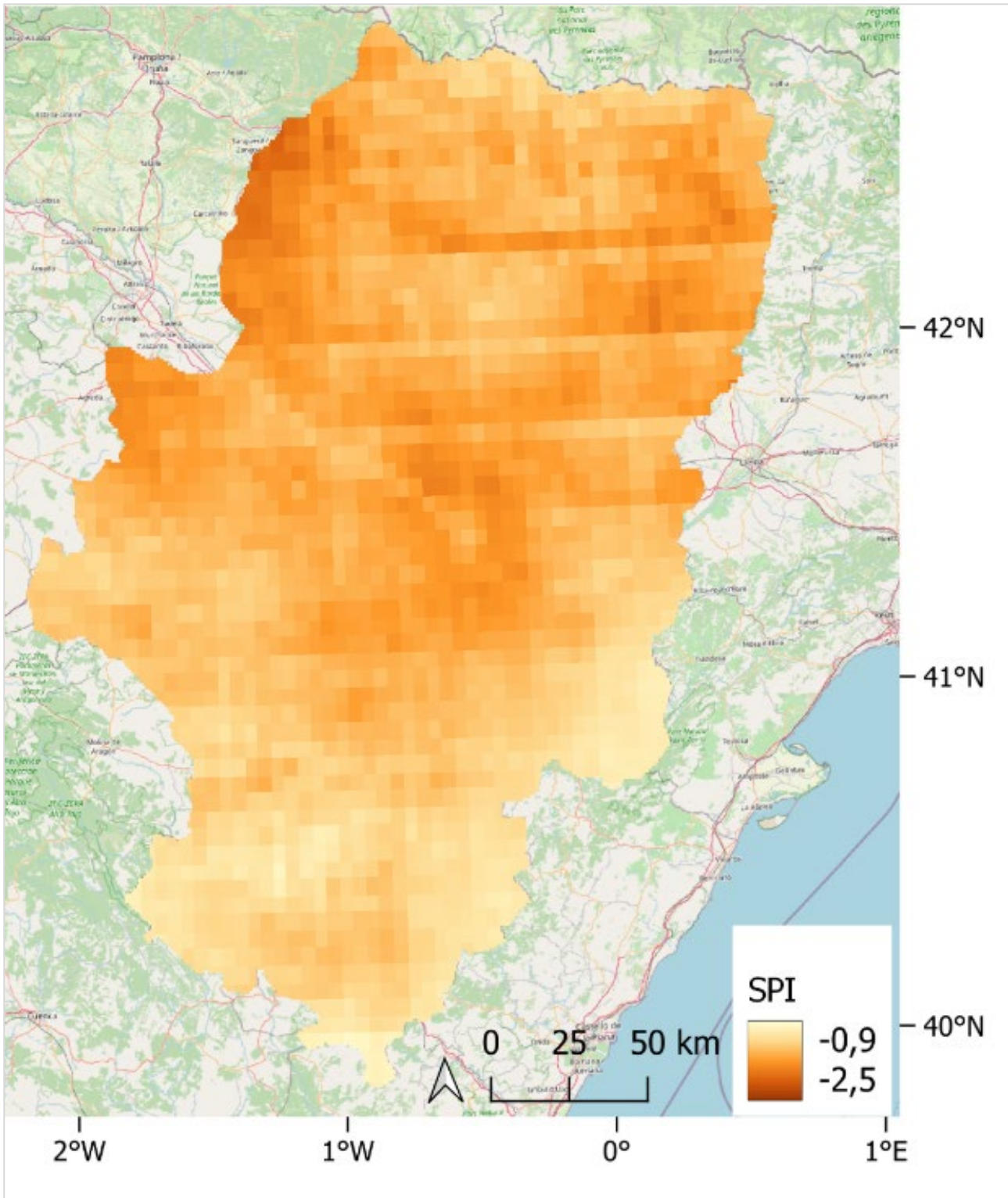




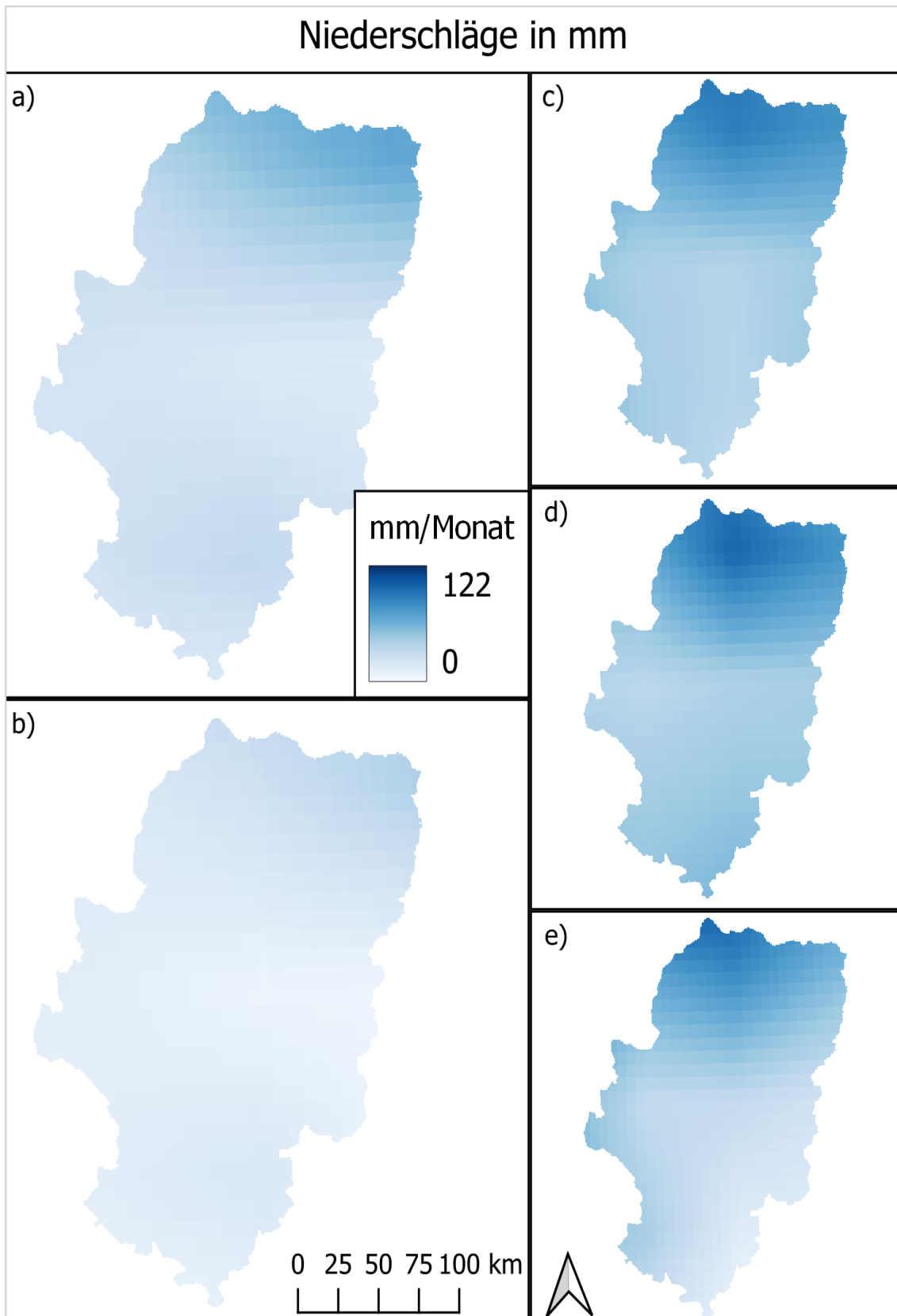
Anhang 4: Räumliche Darstellung des 3-monatigen SPIs im Sommer 2016 von Spanien (Eigene Darstellung, Hintergrundkarte: OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](#)).



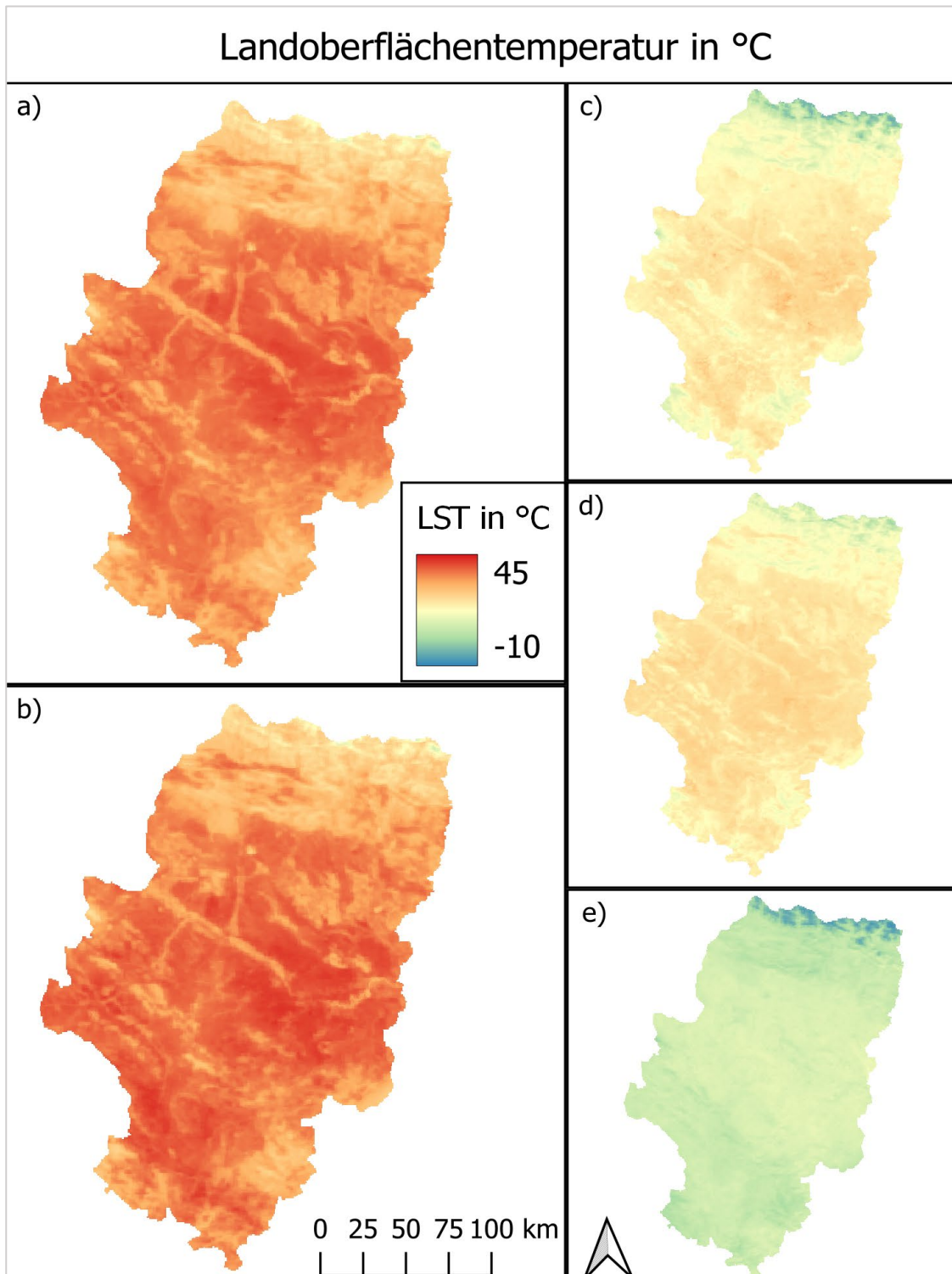
Anhang 5: Räumliche Darstellung des 3-monatigen SPIs im Sommer 2016 von Aragonien (Eigene Darstellung, Hintergrundkarte: OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](#)).



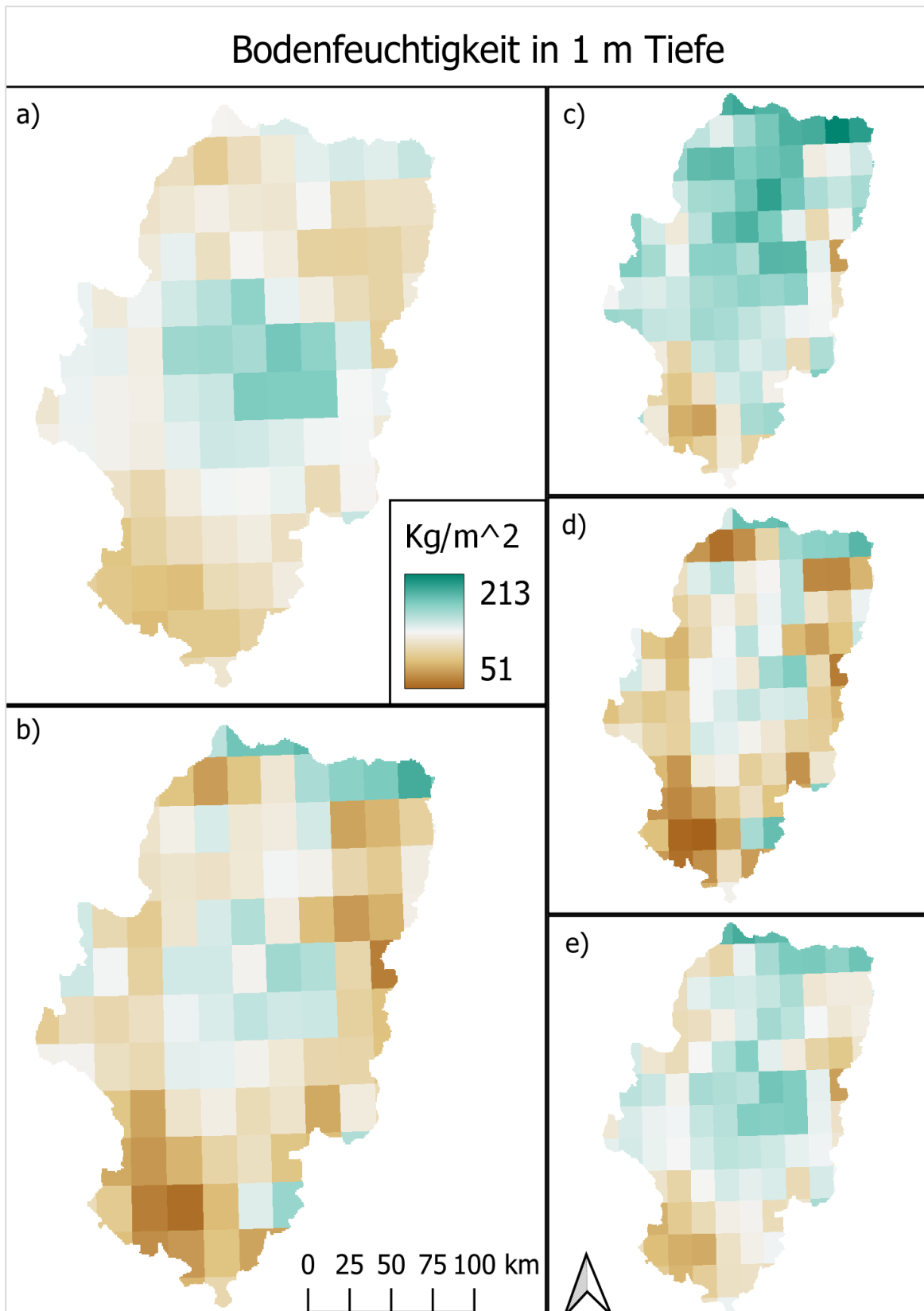
Anhang 6: Räumliche Verteilung der Niederschläge in Aragonien für a) den langjährigen Durchschnitt der Sommermonate 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).



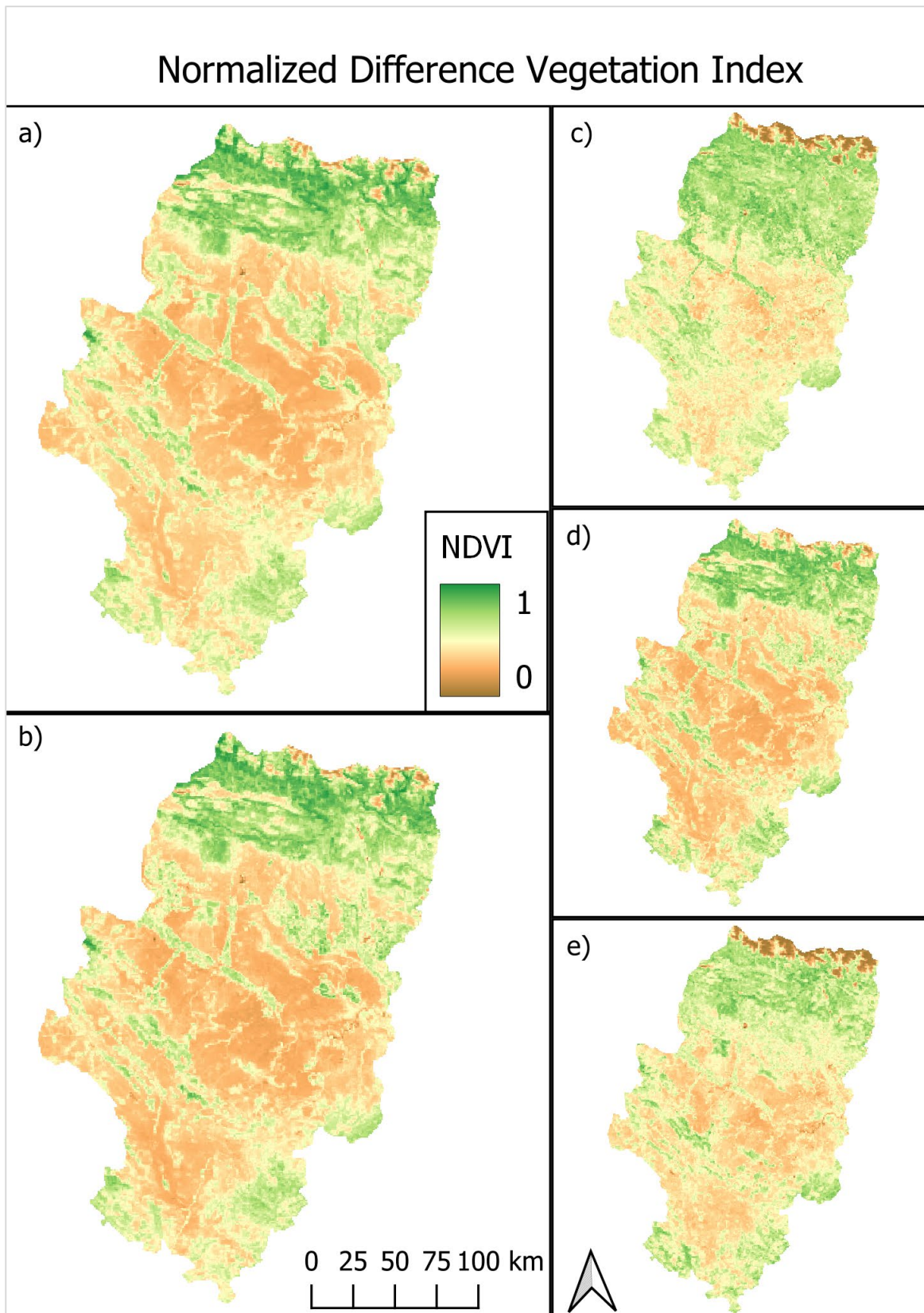
Anhang 7: Räumliche Verteilung der Temperaturen in Aragonien für a) den Durchschnitt der Sommermonate 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).



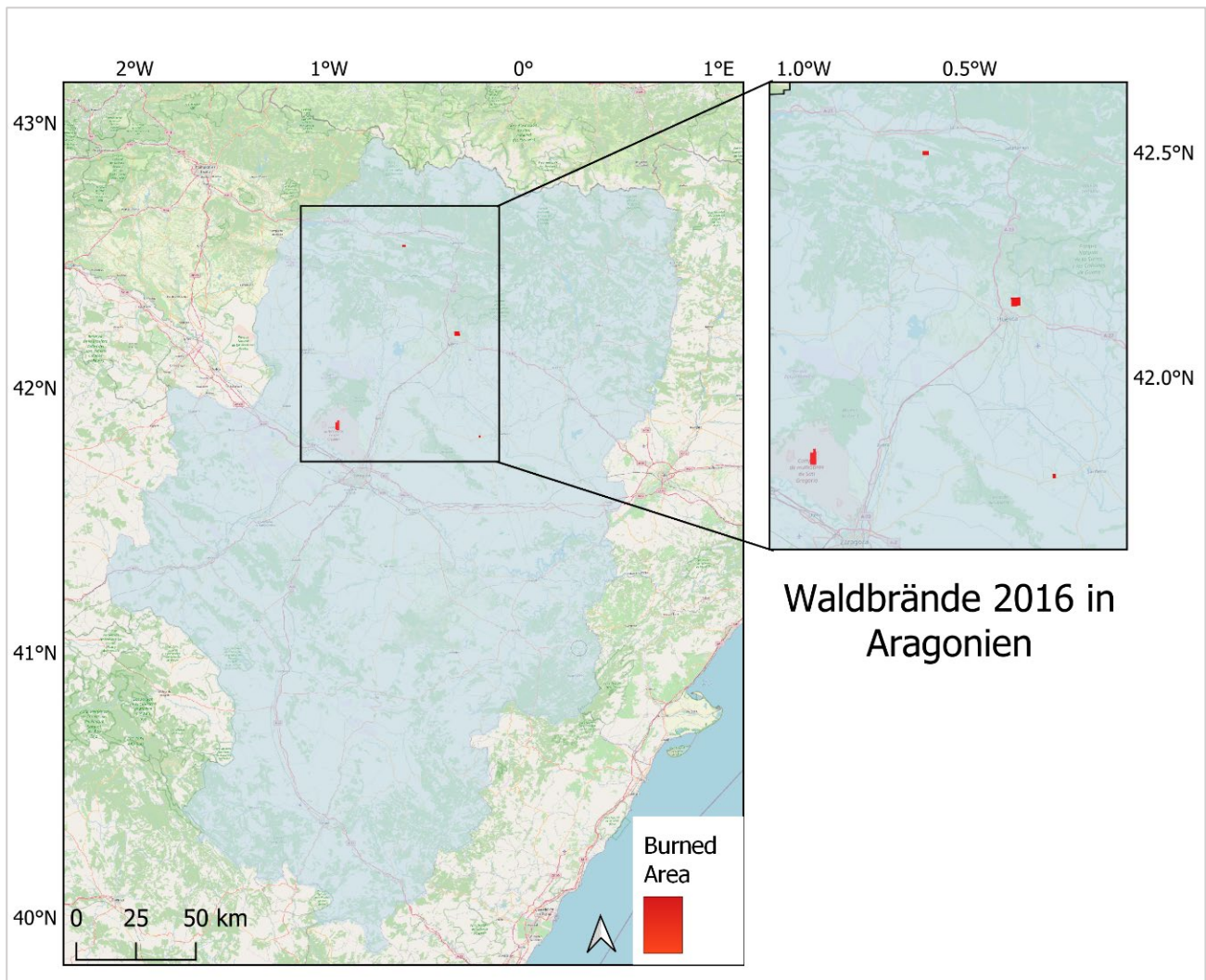
Anhang 8: Räumliche Verteilung der Bodenfeuchte in Aragonien für a) den langjährigen Durchschnitt der Sommermonate von 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).



Anhang 9: Räumliche Verteilung des NDVIs in Aragonien für a) den langjährigen Durchschnitt der Sommermonate von 2000-2020, b) die Sommermonate 2016, c) den Frühling 2016, d) den Herbst 2016 und e) den Winter 2016 (Eigene Darstellung).



Anhang 10: Räumliche Verteilung der Waldbrände in Aragonien im Jahr 2016 (Eigene Darstellung, Hintergrundkarte: OpenStreetMap, [CC BY-SA 2.0](#)).



Werres, J. & Rakers, S. (2024): Sommerliche Dürreereignisse und ihre Auswirkungen auf die Vegetation am Beispiel von Aragonien in Spanien – eine Untersuchung mit der Google Earth Engine. In Stauch, G. (Hrsg.): Angewandte Fernerkundung mit der Google Earth Engine. S. 8 – 40.

[DOI: 10.18154/RWTH-2024-03414](https://doi.org/10.18154/RWTH-2024-03414)