

DISS. ETH NO. 29274

Unraveling the complexities in fire regimes by modeling of fire occurrence and burned area

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

(Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by

İSMAİL BEKAR

M.Sc. Ecology,

Hacettepe University

born on 30.04.1991

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Harald Bugmann, examiner

Dr. G. Boris Pezzatti, co-examiner

Prof. Dr. Davide Ascoli, co-examiner

2023

Summary

Fire is an ancient phenomenon, with its presence on Earth dating back to the Silurian period. This long history of fire has caused ecosystems to co-evolve with fire, resulting in adaptations from individual species to the ecosystem level. However, human activities have begun to push fire activities around the world beyond natural regimes. Fires that exceed beyond natural ranges move from being a natural disturbance that is co-shaping the ecosystem to becoming perturbations that disrupt ecosystem functioning. Furthermore, these alterations are expected to be exacerbated by anthropogenic climate change. It is therefore crucial to develop a solid understanding of fire regimes and how they will be affected by future changes.

The overall goal of this thesis is to deepen our understanding of the relationship between fire occurrence, burned area, and the environmental variables that influence them. Additionally, this thesis seeks to contribute to the improvement of modeling and prediction of these phenomena by investigating methodological aspects that can enhance modeling success.

In Part I, I investigated the importance of environmental variables and grain size (resolution) for modeling fire occurrence across multiple regions in the European Alps and the Mediterranean Basin. I investigated the importance of different groups of environmental variables in fire occurrence models: climate, anthropogenic, forest, and topography at two grain sizes (100 m and 1 km). Finally, I assessed the spatial transferability by applying models between regions. I also created a cross-regional model that included all regions to investigate the effect of spatial scale on transferability. I found that grain size influences model performance. Fine resolution models consistently exhibited higher performance compared to coarse resolution models. The influence of grain size on the relative importance of environmental variables varied between regions. The highest transferability between models was found for the cross-regional model. However, it was also found that model transfer is possible between regions with similar environmental variables.

In Part II, I assessed the performance of the Cumulative Logarithmic Area Ranking Efficiency (CLARE), a novel measure recently developed for predicting fire size, across eleven regions in Europe that feature diverse environmental conditions. By incorporating CLARE in the model selection process in addition to AUC, we can better evaluate a model's capacity to predict both fire occurrence and burned area. I investigated the effects on CLARE of 1) different groups of input variables (meteorological variables vs. fire weather indices); 2) model

complexity (multi-variable vs. single-variable models); and 3) modeling techniques (Generalized Linear Models vs. Maxent). Models exhibiting a high AUC performance in predicting fire occurrence may not necessarily feature high performance in predicting burned area. The use of multi-variable models is likely to result in higher CLARE performance compared to single-variable models. Such an approach also led to a better performance with multi-variable meteorological models compared to single-variable fire weather index models in specific regions. This approach may have particular advantages in areas where the calculation of fire weather indices is not feasible. The differences between modeling methods were primarily associated with the region or input variable groups that are in question. Maxent demonstrated slightly better performance in high fire activity regions for fire weather index models, whereas GLMs outperformed Maxent in low to intermediate fire activity regions for meteorological models. Overall, my findings highlight the potential for incorporating burned area into fire danger assessments.

In Part III, I tested how the performance of meteorological variables and fire weather indices changes with temporal resolution. In addition, I evaluated predictions for fire counts under a future climate change scenario to aid the interpretation of projections. The performance of fire occurrence models varied with respect to temporal resolution across study regions. The results also demonstrated that variations in temporal resolution affected model performance, primarily due to structural changes in the fire weather indices. This calls for caution when using fire weather indices at temporal resolution other than daily. Finally, fire occurrence predictions under a climate change scenario indicated that while models perform similarly under current conditions, models at lower resolution predict a higher number of fires. This suggests that although temporal resolution may not influence model performance under current conditions, it could distort future projections.

My thesis has provided insight into two key aspects of fire regimes: fire occurrence and burned area. Investigating the influence of environmental variables, spatial and temporal resolution, and modeling techniques on model performance has demonstrated the importance of considering these factors when assessing fire occurrence. In addition, my thesis has demonstrated the potential for incorporating burned area into fire danger assessments to provide a more comprehensive understanding of burned area. Through this work, I contributed to improving the modeling and prediction of fire occurrence and burned area, which is essential for informing fire management and policy decisions.

Zusammenfassung

Feuer ist ein uraltes Phänomen, das auf der Erde bereits seit dem Silur vorkommt. Diese lange Geschichte des Feuers hat dazu geführt, dass sich die Ökosysteme gemeinsam mit dem Feuer entwickelt haben, was zu Anpassungen von einzelnen Arten bis hin zur Ebene der Ökosysteme geführt hat. Der Mensch hat jedoch begonnen, die Feueraktivität weltweit über das natürliche Mass hinaus zu steigern. Brände, die über das natürliche Mass hinausgehen, werden damit von einer natürlichen Störung, die das Ökosystem mitgestaltet, zu einem Faktor, der das Funktionieren des Ökosystems beeinträchtigt. Darüber hinaus wird erwartet, dass diese Veränderungen durch den vom Menschen verursachten Klimawandel noch verstärkt werden, da er sich erheblich auf die Feuerregime auswirken wird. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, ein besseres Verständnis der Feuerregime zu entwickeln und zu untersuchen, wie diese durch zukünftige Veränderungen beeinflusst werden.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, unser Verständnis für die Beziehung zwischen dem Auftreten von Bränden, ihrer Grösse und den Umweltvariablen, die diese beeinflussen, zu vertiefen. Darüber hinaus soll diese Arbeit einen Beitrag zur Verbesserung der Modellierung und Vorhersage dieser Phänomene leisten, indem methodische Aspekte untersucht werden, die den Erfolg der Modellierung verbessern können.

In Teil I untersuchte ich die Bedeutung von Umweltvariablen und der räumlichen Auflösung für die Modellierung des Auftretens von Bränden in verschiedenen Regionen der europäischen Alpen und des Mittelmeerraums. Ich untersuchte die Bedeutung verschiedener Gruppen von Umweltvariablen in Modellen für das Auftreten von Bränden: Klima, anthropogene Einflüsse, Wald und Topographie in zwei Auflösungsstufen (100 m und 1 km). Schliesslich bewertete ich die räumliche Übertragbarkeit, indem ich Modelle zwischen Regionen anwendete. Ausserdem erstellte ich ein regionen-übergreifendes Modell, das alle Regionen einschloss, um die Auswirkung des räumlichen Massstabs auf die Übertragbarkeit mit Hilfe des regionen-übergreifenden Modells zu untersuchen. Ich fand heraus, dass die Auflösung die Modellleistung und in einigen Regionen auch die relative Bedeutung der Umweltvariablen beeinflusst. Modelle mit feiner Auflösung wiesen durchwegs eine höhere Leistung auf als Modelle mit grober Auflösung. Der Einfluss der Auflösung auf die relative Bedeutung der Umweltvariablen variierte von Region zu Region. Die beste Übertragbarkeit der Modelle

ergab sich für das regionen-übergreifende Modell. Generell ist eine Modellübertragung zwischen Regionen mit ähnlichen Umweltvariablen möglich.

In Teil II bewertete ich die Leistung der «Cumulative Logarithmic Area Ranking Efficiency» (CLARE), eines neuartigen Masses, das vor kurzer Zeit für die Vorhersage der Brandgrösse entwickelt worden war, in elf europäischen Regionen mit unterschiedlichen Umweltbedingungen. Durch die Einbeziehung von CLARE in den Modellauswahlprozess zusätzlich zu AUC können wir die Leistungsfähigkeit eines Modells, sowohl das Auftreten von Bränden als auch die Brandfläche vorherzusagen, besser bewerten. Ich untersuchte die Auswirkungen auf CLARE von 1) verschiedenen Gruppen von Eingangsvariablen (meteorologische Variablen vs. Feuerwetter-Indizes); 2) Modellkomplexität (Multivariablen- vs. Einzelvariablenmodelle); und 3) Modellierungstechniken (verallgemeinerte lineare Modelle [GLMs] vs. Maxent). Modelle, die eine hohe AUC-Leistung bei der Vorhersage des Auftretens von Bränden aufweisen, müssen nicht unbedingt eine hohe Leistung bei der Vorhersage der Brandfläche aufweisen. Die Verwendung von Modellen mit mehreren Variablen führt meist zu einer höheren CLARE-Leistung im Vergleich zu Modellen mit einer Variablen. Ein solcher Ansatz führte in bestimmten Regionen auch zu einer besseren Leistung mit multivariablen meteorologischen Modellen im Vergleich zu Brandwetterindexmodellen mit einer Variable. Dieser Ansatz kann insbesondere in Gebieten von Vorteil sein, in denen die Berechnung von Brandwetterindizes nicht möglich ist. Die Unterschiede zwischen den Modellierungsmethoden hängen in erster Linie mit der jeweiligen Region oder den Gruppen von Eingangsvariablen zusammen. Maxent zeigte eine etwas bessere Leistung in Regionen mit hoher Feueraktivität für Feuerwetterindex-Modelle, während GLMs in Regionen mit geringer bis mittlerer Feueraktivität für meteorologische Modelle besser abschnitten. Insgesamt unterstreichen meine Ergebnisse das Potenzial für die Einbeziehung der Grösse der Brandfläche in die Bewertung der Brandgefahr.

In Teil III habe ich getestet, wie sich die Leistung der meteorologischen Variablen und der Indizes für das Feuerwetter mit der zeitlichen Auflösung verändert. Ausserdem bewertete ich die Vorhersagen für die Anzahl der Brände unter einem zukünftigen Klimawandelszenario, um die Interpretation der Vorhersagen für das Auftreten von Bränden unter zukünftigen Klimabedingungen zu erleichtern. Die Leistung der Modelle variierte in Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung in den verschiedenen Untersuchungsregionen. Die Ergebnisse zeigten auch, dass unterschiedliche zeitliche Auflösungen die Leistung des Modells beeinflussten,

was in erster Linie auf strukturelle Veränderungen in den Feuerwetter-Indizes zurückzuführen ist. Dies zeigt, dass bei der Verwendung von Feuerwetter-Indizes mit einer anderen zeitlichen Auflösung als täglich Vorsicht geboten ist. Schliesslich zeigten die Vorhersagen des Auftretens von Bränden unter einem Klimawandel-Szenario, dass die Modelle unter den derzeitigen Bedingungen zwar ähnlich leistungsfähig sind, Modelle mit geringerer Auflösung aber eine höhere Anzahl von Bränden vorhersagen. Dies deutet darauf hin, dass die zeitliche Auflösung zwar keinen Einfluss auf die Leistung der Modelle unter den derzeitigen Bedingungen hat, aber zukünftige Vorhersagen verzerren könnte.

Im Rahmen meiner Dissertation habe ich Einblicke in zwei Schlüsselaspekte des Feuerregime gewonnen: das Auftreten von Bränden und die Grösse der Brandfläche. Die Untersuchung des Einflusses von Umweltvariablen, der räumlichen und zeitlichen Auflösung und der Modellierungstechniken auf die Modelleistung hat gezeigt, wie wichtig es ist, diese Faktoren bei der Bewertung des Auftretens von Bränden zu berücksichtigen. Darüber hinaus hat meine Arbeit gezeigt, dass es möglich ist, die Grösse der Brandfläche in die Bewertung der Brandgefahr einzubeziehen, um ein umfassenderes Verständnis der verbrannten Fläche zu erhalten. Mit dieser Arbeit habe ich dazu beigetragen, die Modellierung und Vorhersage des Auftretens von Bränden und der verbrannten Fläche zu verbessern, was für das Brandmanagement und die Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen von wesentlicher Bedeutung ist.