

Wykorzystanie Danych Satelitarnych w Symulacjach Pożarowych

Warsztaty Modelowanie Pożarowe

Adam Kochański

Warszawa, 22-gi Czerwca 2023

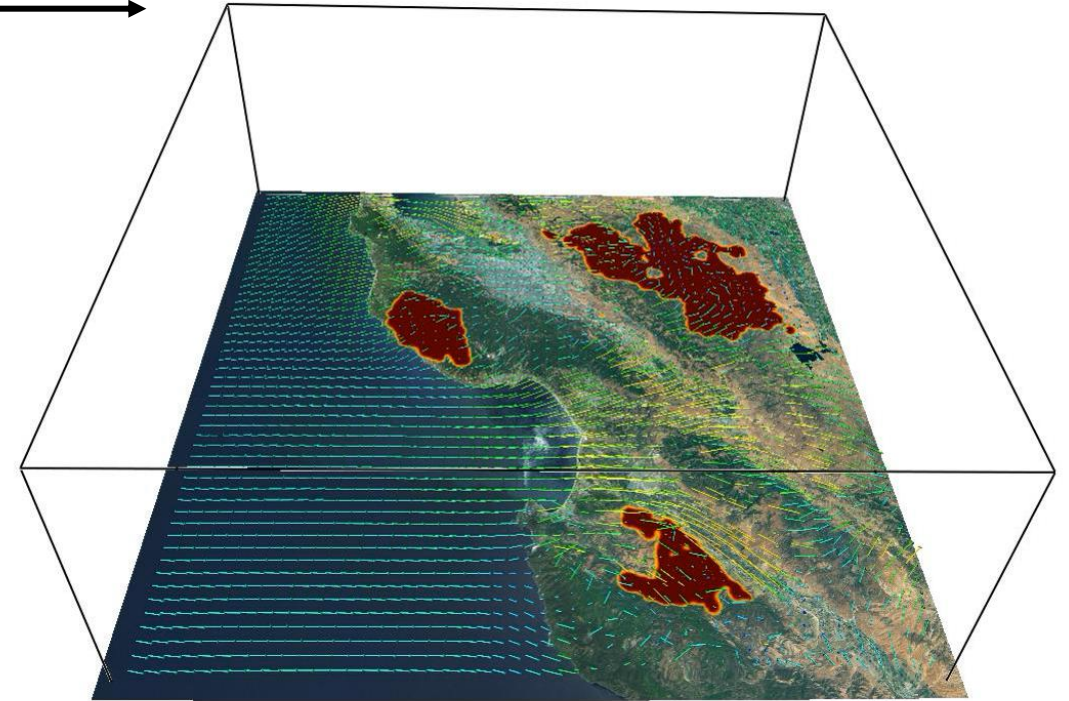
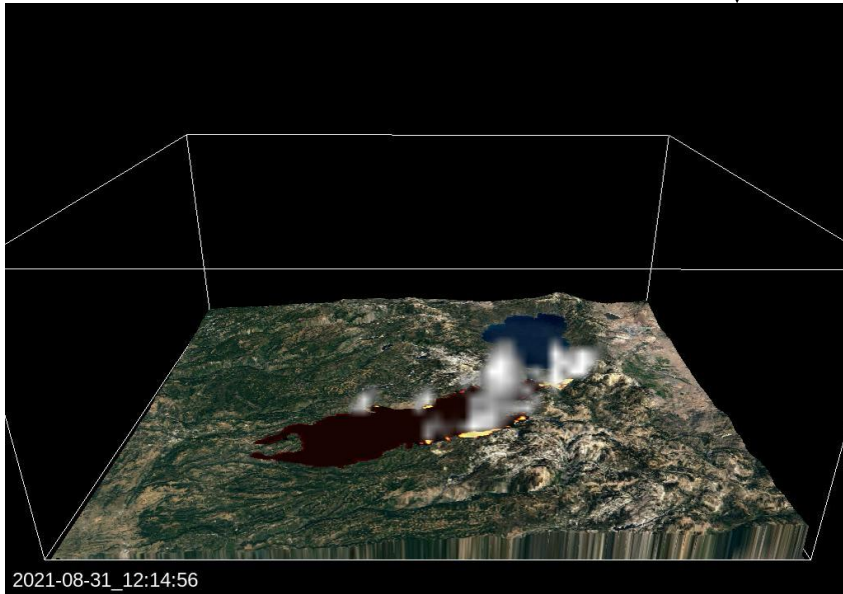


Centrum
Modelowania
Meteorologicznego

- Rekonstrukcja historii rozprzestrzeniania pożaru dla symulacji pożaru i dymu przy użyciu napędzanych satelitarnie maszyn wektorów nośnych (SVM)
 - Wieloskalowe symulacje pożaru/dymu
 - Budowanie bibliotek danych historycznych pożarów na potrzeby sztucznej inteligencji
- Metody inicjalizacji i wpływ metody inicjalizacji na symulacje rozprzestrzeniania pożaru i dymu
- Asymilacja danych pożarowych w sprzężonym modelu atmosferyczno-pożarowym
 - Znaczenie asymilacji danych pożarowych w sprzężonych modelach pożarowo-atmosferycznych
 - Prognozowanie pożarów z obserwacjami satelitarnymi

Obserwacje satelitarne w modelowaniu ognia i dymu przy użyciu modeli sprzężonych

- Historyczne rekonstrukcje progresji ognia przy użyciu maszyn wektorów nośnych (SVM)
- Historyczne symulacje zdarzeń dym
- Sztuczna Inteligencja - uczenie maszynowe
- Prognozowanie rozprzestrzeniania się ognia
- Prognozowanie dymu

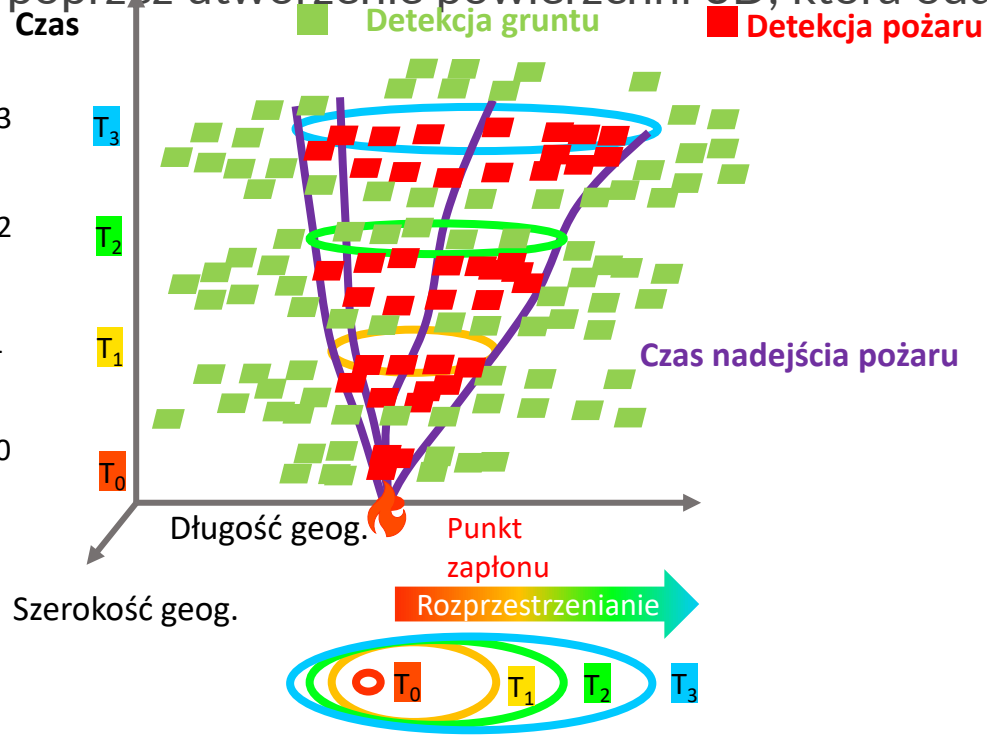


2020 Bay Area Fires Reconstructed using WRF-SFIRE and the satellite-driven SVM method

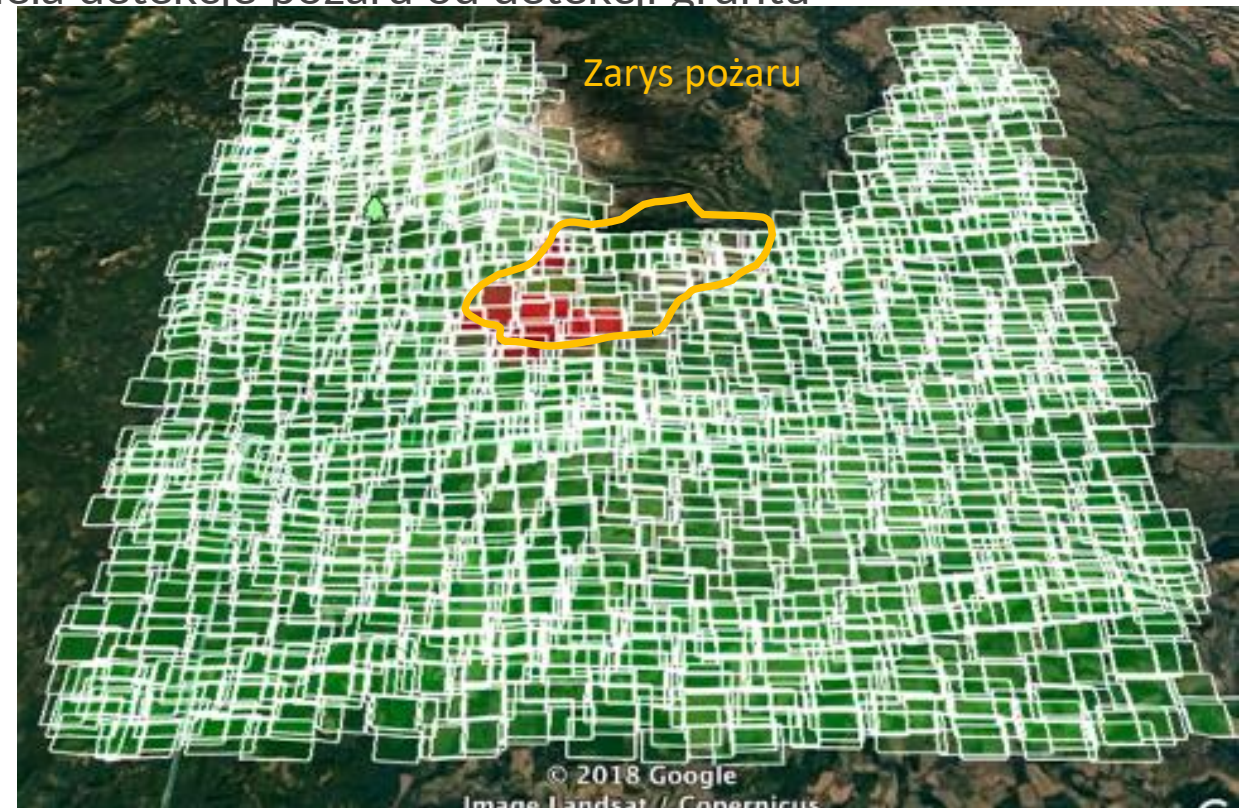
Example of a WRF-SFIRE coupled fire-atmosphere forecast for 2021 Caldor fire

Support Vector Machines (SVM) - Maszyna wektorów nośnych - Zastosowania Pożarowe

- Używamy chwilowych danych z satelitarnych, aby zrekonstruować zasięg pożaru i historię jego rozprzestrzeniania
- Celem jest zintegrowanie obserwacji z wielu platform w celu oszacowania stanu pożaru w dowolnym czasie poprzez utworzenie powierzchni 3D, która oddziela detekcję pożaru od detekcji gruntu



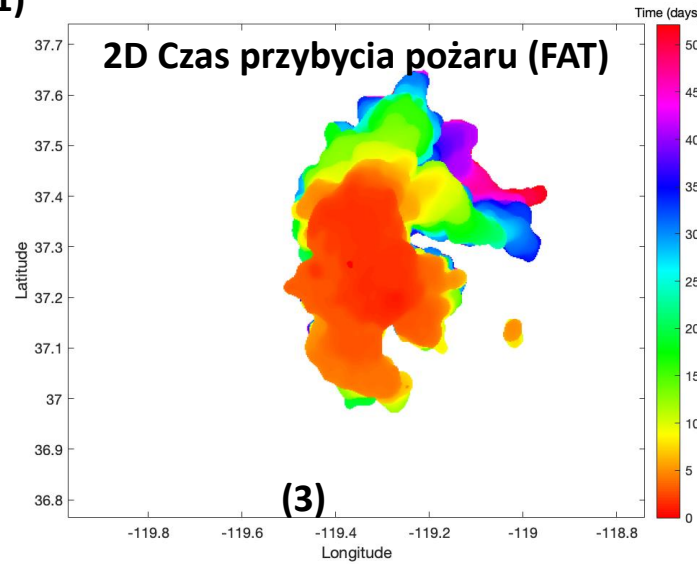
Syntetyczne obwody w czasach T_0, T_1, T_2, T_3 reprezentujące rozwój pożaru



Czas nadejścia pożaru jest granicą decyzyjną metody klasyfikacji rozróżniającej obszary pożarowe i niepożarowe, które można wykorzystać do oszacowania progresji pożaru

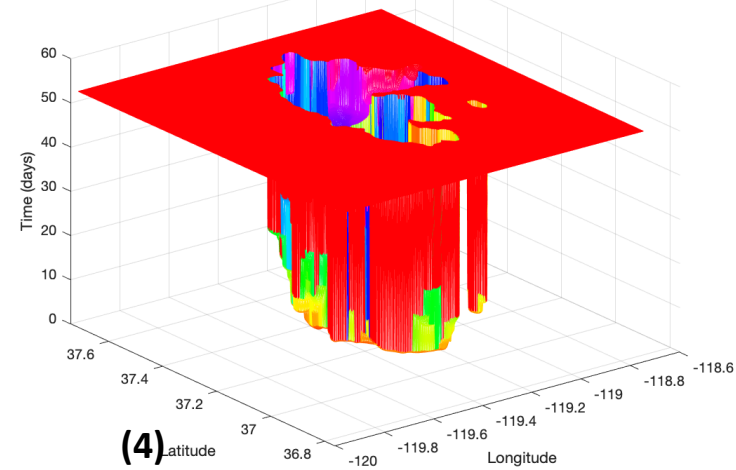
- W modelu ewolucja pożaru jest kodowana jako czas, w którym pożar dociera do każdej lokalizacji siatki (**czas nadejścia pożaru – FAT (1)**)
- **Czas nadejścia pożaru** definiuje powierzchnię czasoprzestrzenną podczas wykreślenia w 3D (2)
- Poziomy przekrój powierzchni FAT daje obwód pożaru na określonym poziomie przekroju poprzecznego czas (3) i (4)
- System plików 2D FAT pozwala ograniczyć historię progresji ognia w modelu i ominąć szybkość rozprzestrzeniania się modelu

(1)



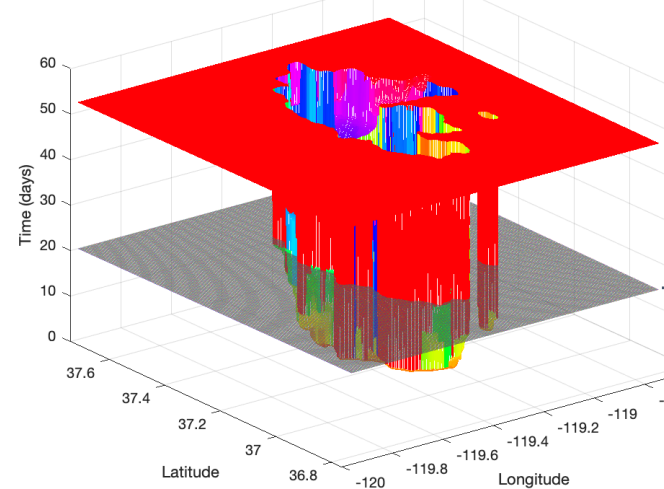
(2)

3D Czas przybycia pożaru (FAT)

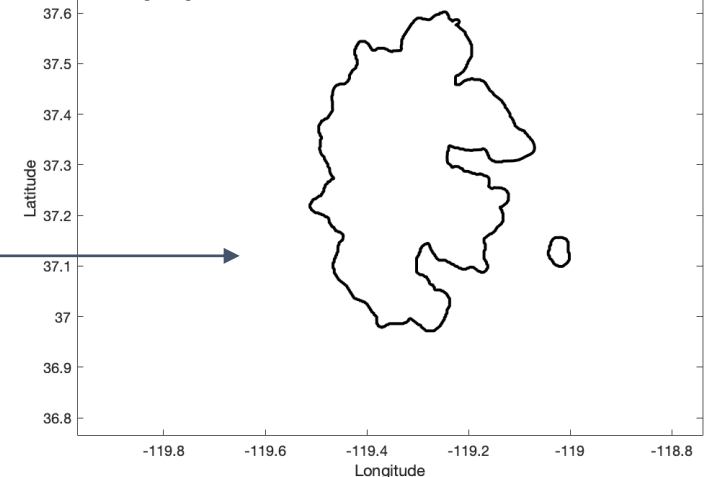


(3)

Poziomy przekrój FAT



Zays pożaru w czasie T=20 dni

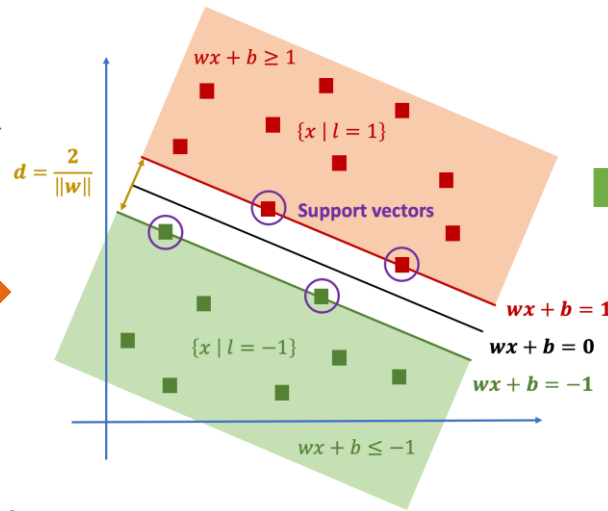


SVM (Maszyna Wektorów Nośnych)– Rekonstrukcja pożarów

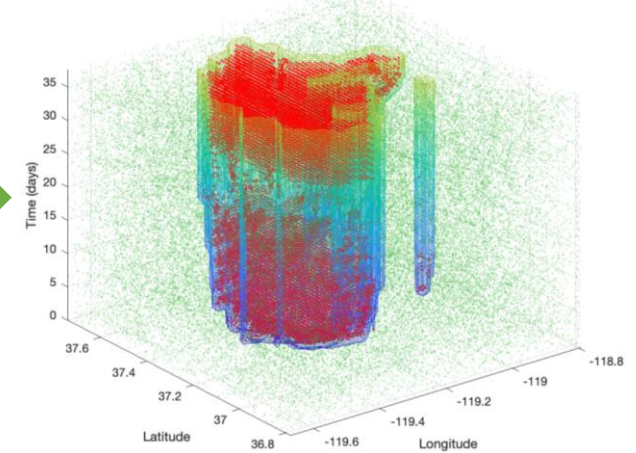
Dane Satelitarne L2 Active Fires



Uczenie Maszynowe Maszyna wektorów nośnych

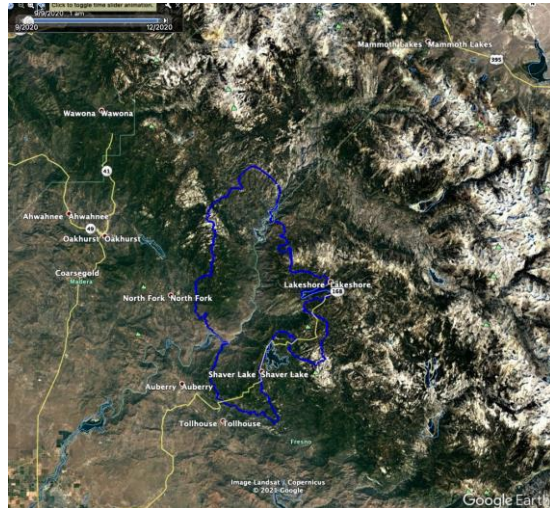


Predykcja Czas przybycia pożaru



Obserwacje

Mapy w podczerwieni (obwody pożarowe)

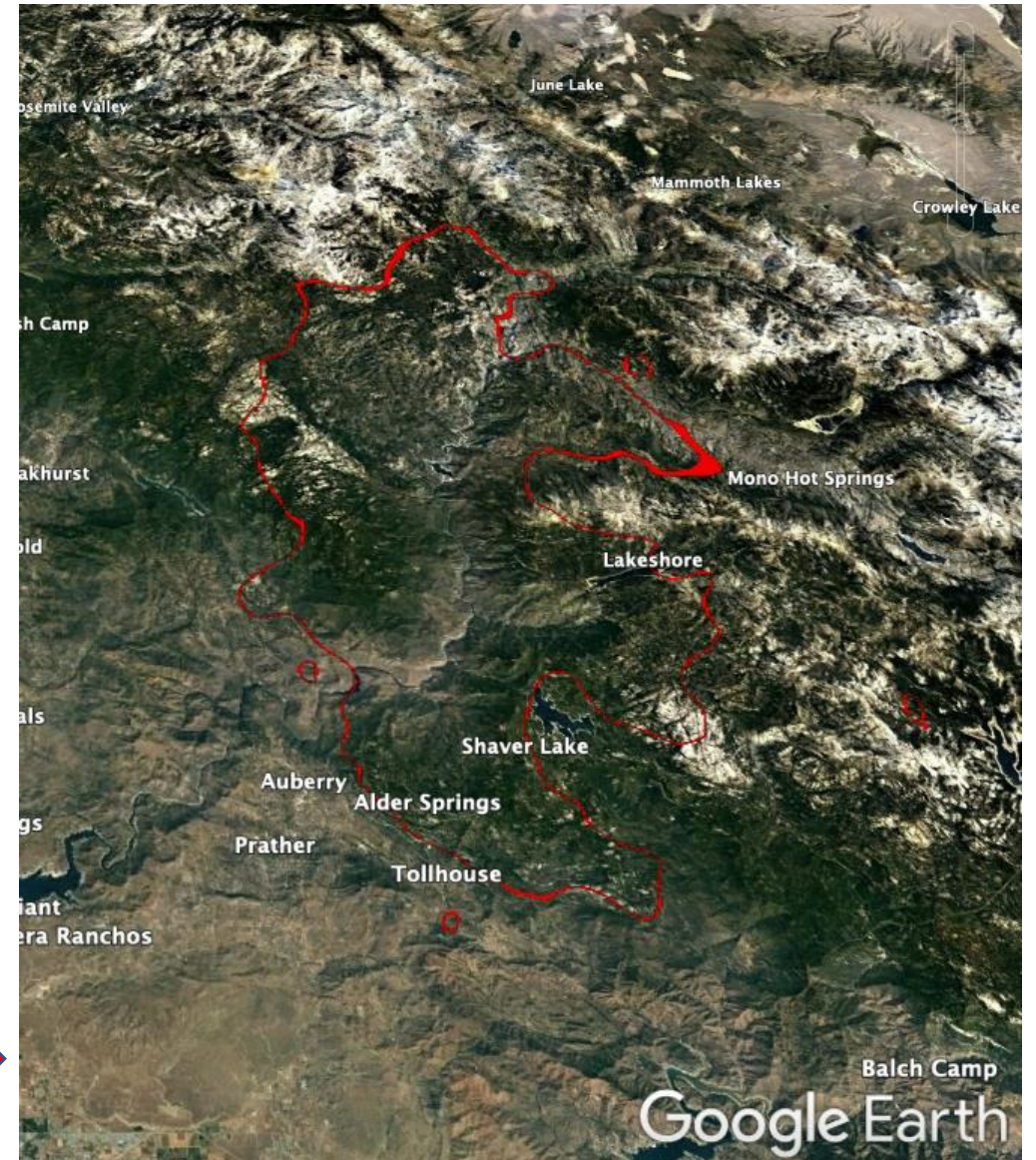
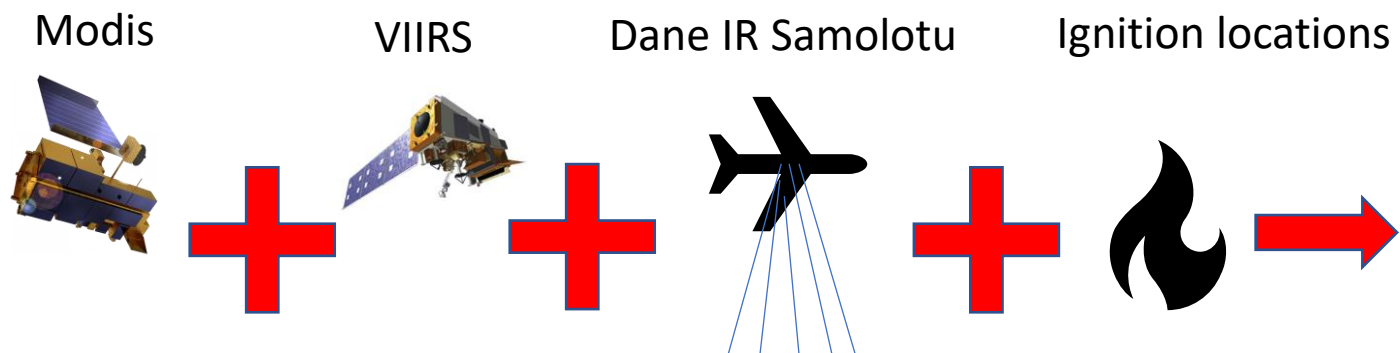


Aplikacja

Dane wejściowe historii pożaru do modelu pożaru

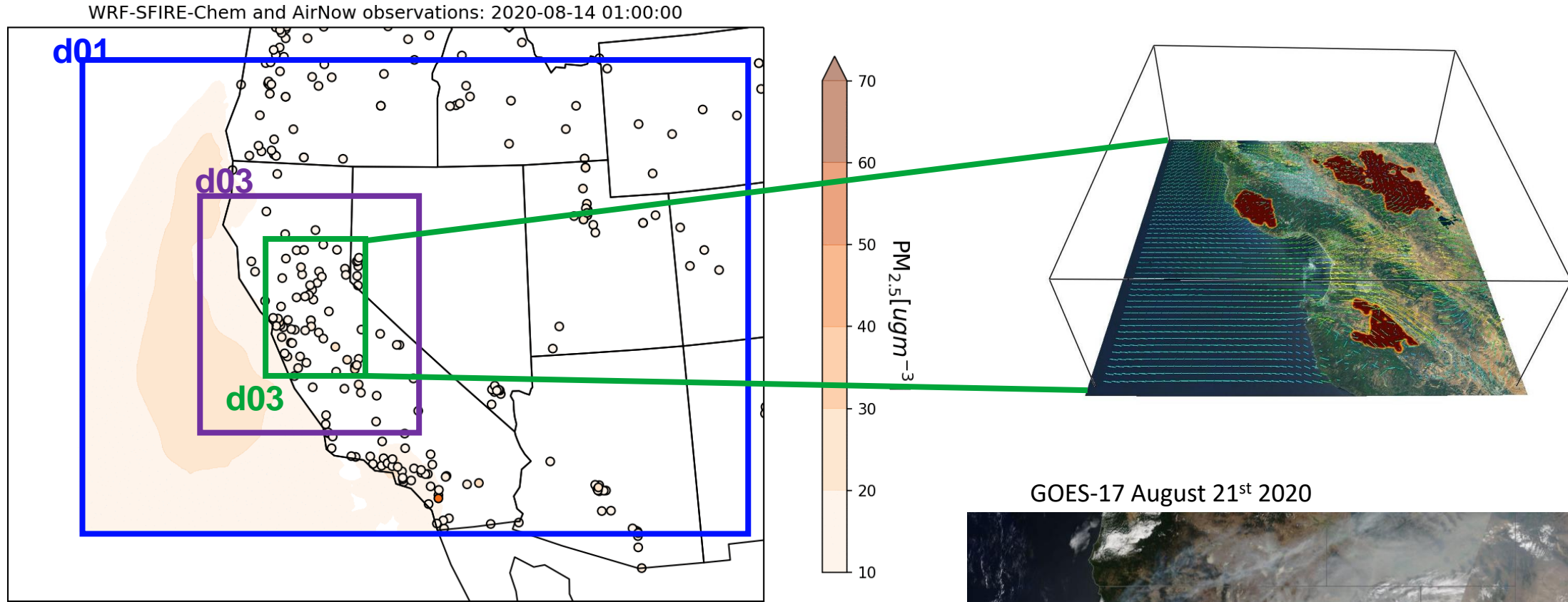
Aby poprawić rekonstrukcję historii pożaru SVM, integrujemy detekcje satelitarne (niska rozdzielczość przestrzenna, ale wyższa rozdzielczość czasowa) z obrazami podczerwieni (wysoka rozdzielczość przestrzenna, ale niska rozdzielczość czasowa)

- Metoda SVM wykorzystuje dane satelitarne oraz obwody IR pozwalając na rekonstrukcję historii pożaru
- Zrekonstruowany postęp pożaru może być zakodowany jako czas nadejścia pożaru i zasilać model, aby ominąć predykcyjny model Rothermela



Przykład rekonstrukcji SVM Creek Fire w odstępach 15-minutowych

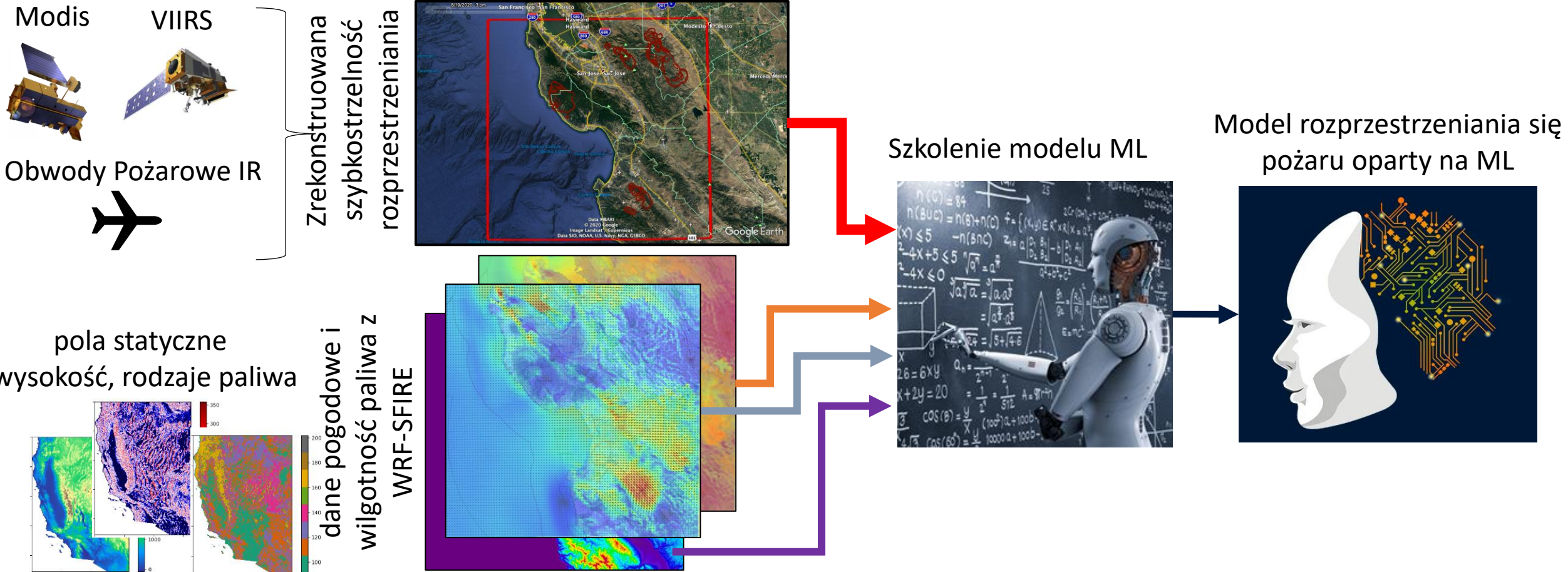
Zastosowanie SVM do 2020 California Fires



- Meteorologia symulowana przez WRF
- Progresja pożaru definiowana przez dane satelitarne integrowane przez SVM
- Emisje pożarowe liczone przez model zużycia paliwa WRF-SFIRE
- Dynamika dymu napędzana strumieniami ciepła i wilgoci
- Konfiguracja multi-skalowa do rozwiązywania transportu dalekiego zasięgu

Wykorzystanie danych satelitarnych i SVM w szkoleniu modeli ML

- Szybkość rozprzestrzeniania się pożarów w wydarzeniach historycznych można oszacować za pomocą metody SVM integrującej dane satelitarne
- Dane dotyczące progresji pożaru wraz z danymi pogodowymi i paliwowymi mogą dostarczyć danych treningowych dla modelu ML

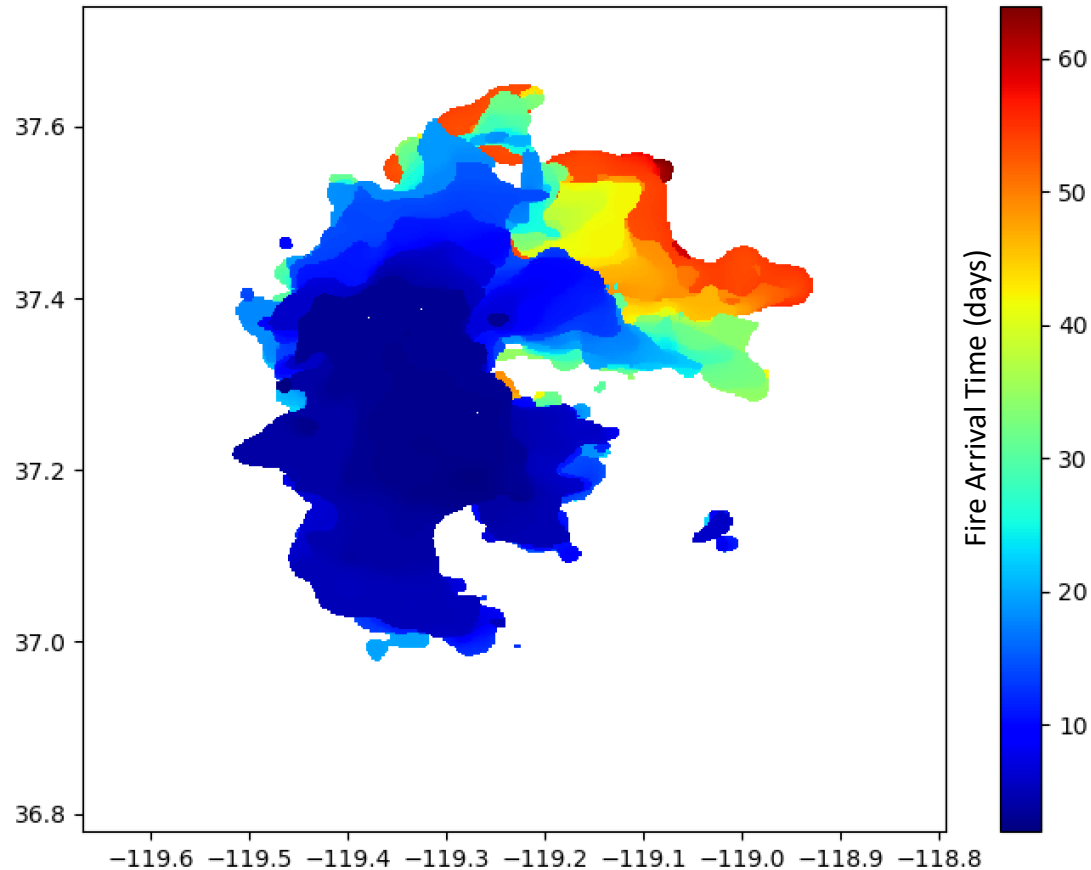


Oszacowanie lokalnego ROS z SVM dla pożaru Creek Fire (2020)

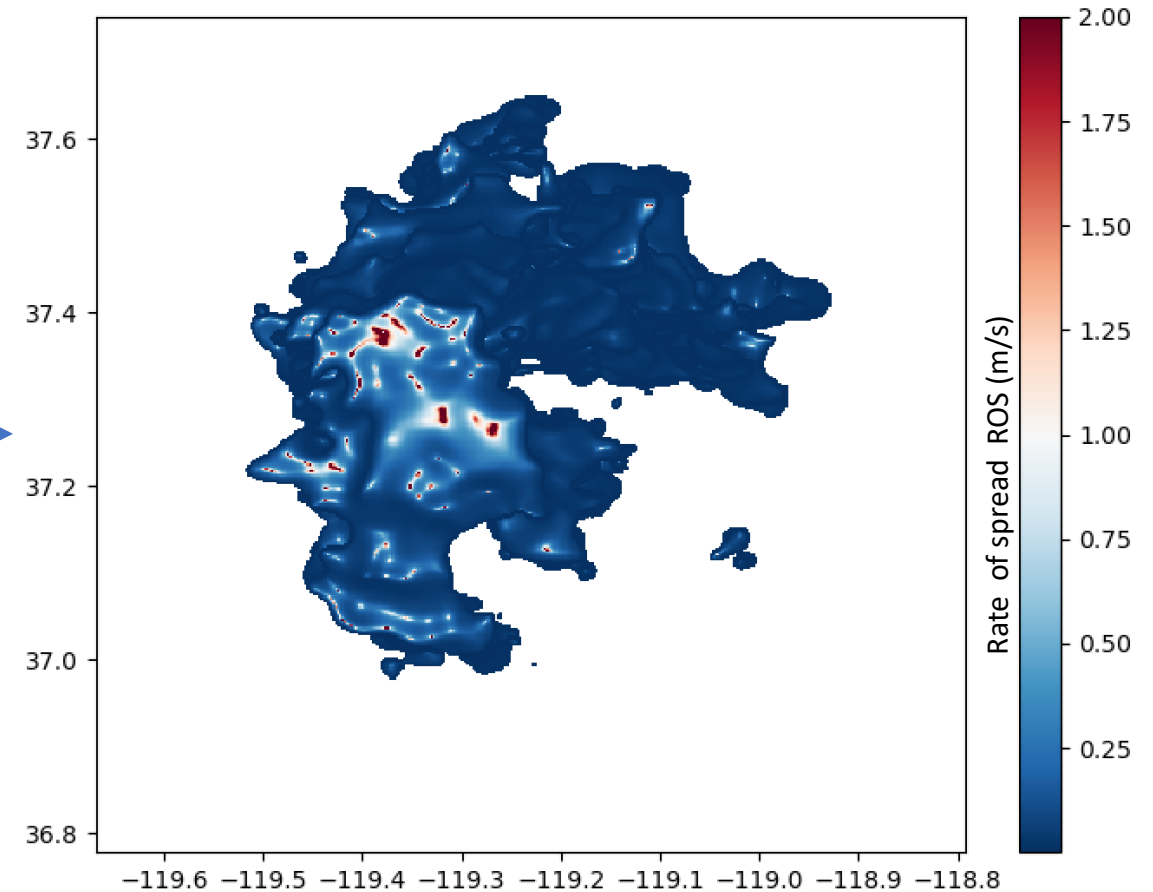
- Mając czas nadejścia ognia (FAT) z metody SVM, lokalny współczynnik rozprzestrzeniania może być obliczony jako

$$\text{ROS} = \frac{1}{\|\nabla \text{FAT}\|}$$

Zrekonstruowany postęp pożaru



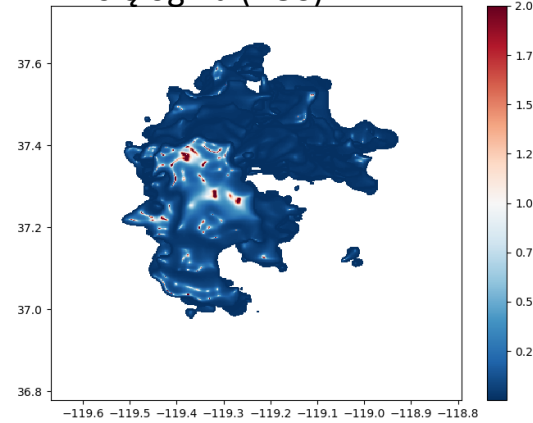
2D Szybkość rozprzestrzeniania pożaru (ROS)



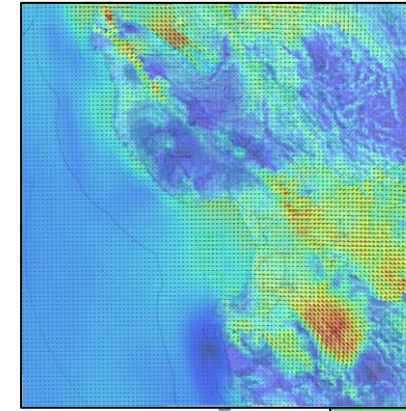
Wykorzystanie danych satelitarnych i SVM w szkoleniu modeli ML

- Metoda SVM dostarcza 2D szybkości rozprzestrzeniania się danych
- WRF-SFIRE, aby zapewnić wysokiej rozdzielczości dane pogodowe na potrzeby treningu ML
- Model ML jest trenowany na podstawie danych statycznych, danych pogodowych z WRF-SFIRE (05.09.2020-30.09.2020, 5000m/1666m/555m, siatka pożarowa 28 m, SVM 243m)
- Model ML generuje ROS dla Creek Fire (36 621 punktów)
- Wyniki ML porównano z obserwacjami i symulacjami opartymi na modelu Rothermel

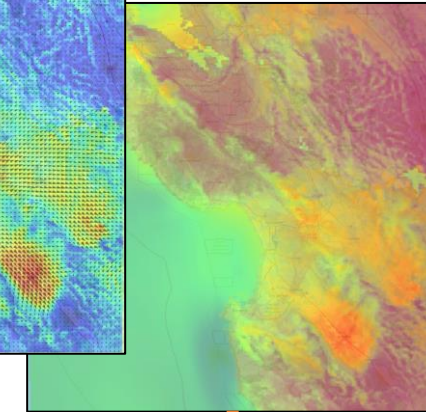
Obserwowana szybkość rozprzestrzeniania się ognia (ROS)



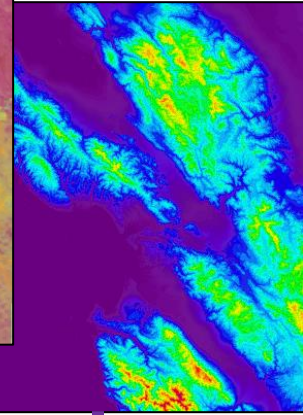
Dane pogodowe



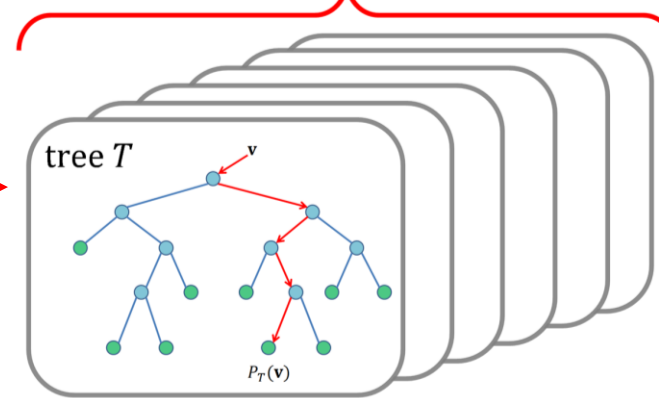
Wilgotność paliwa



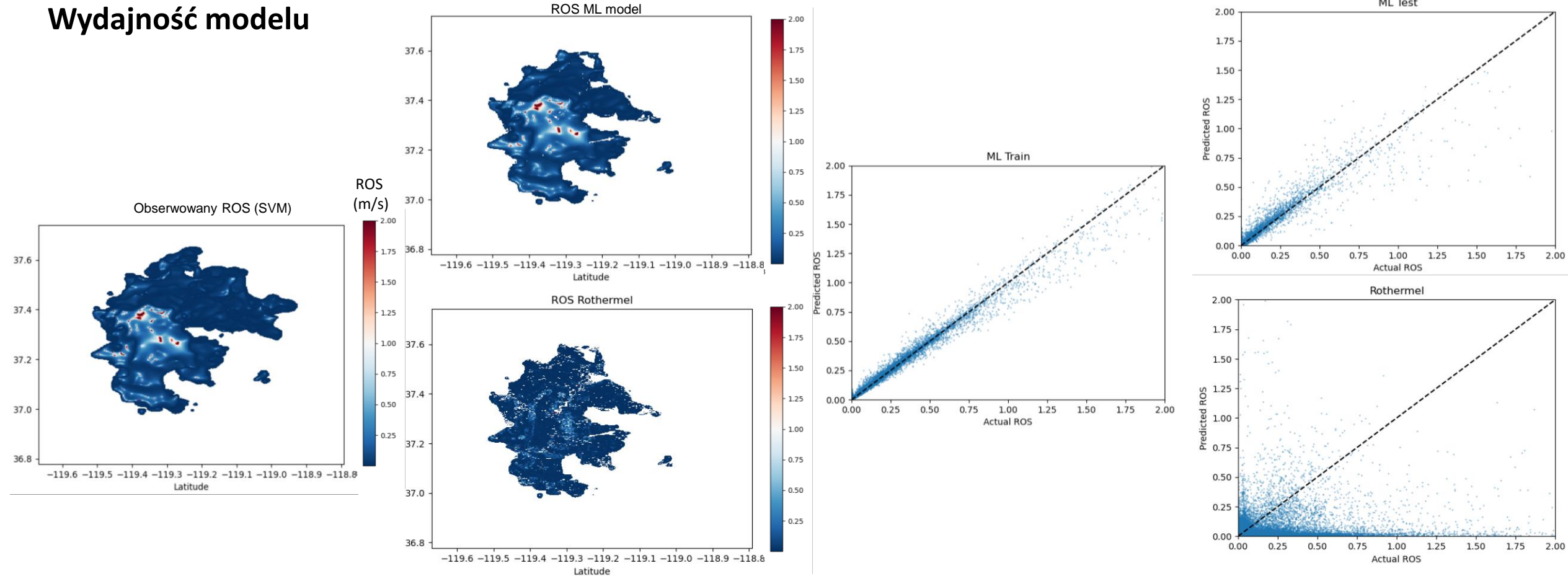
Dane statyczne



Model losowego lasu decyzyjnego ML



Wydajność modelu



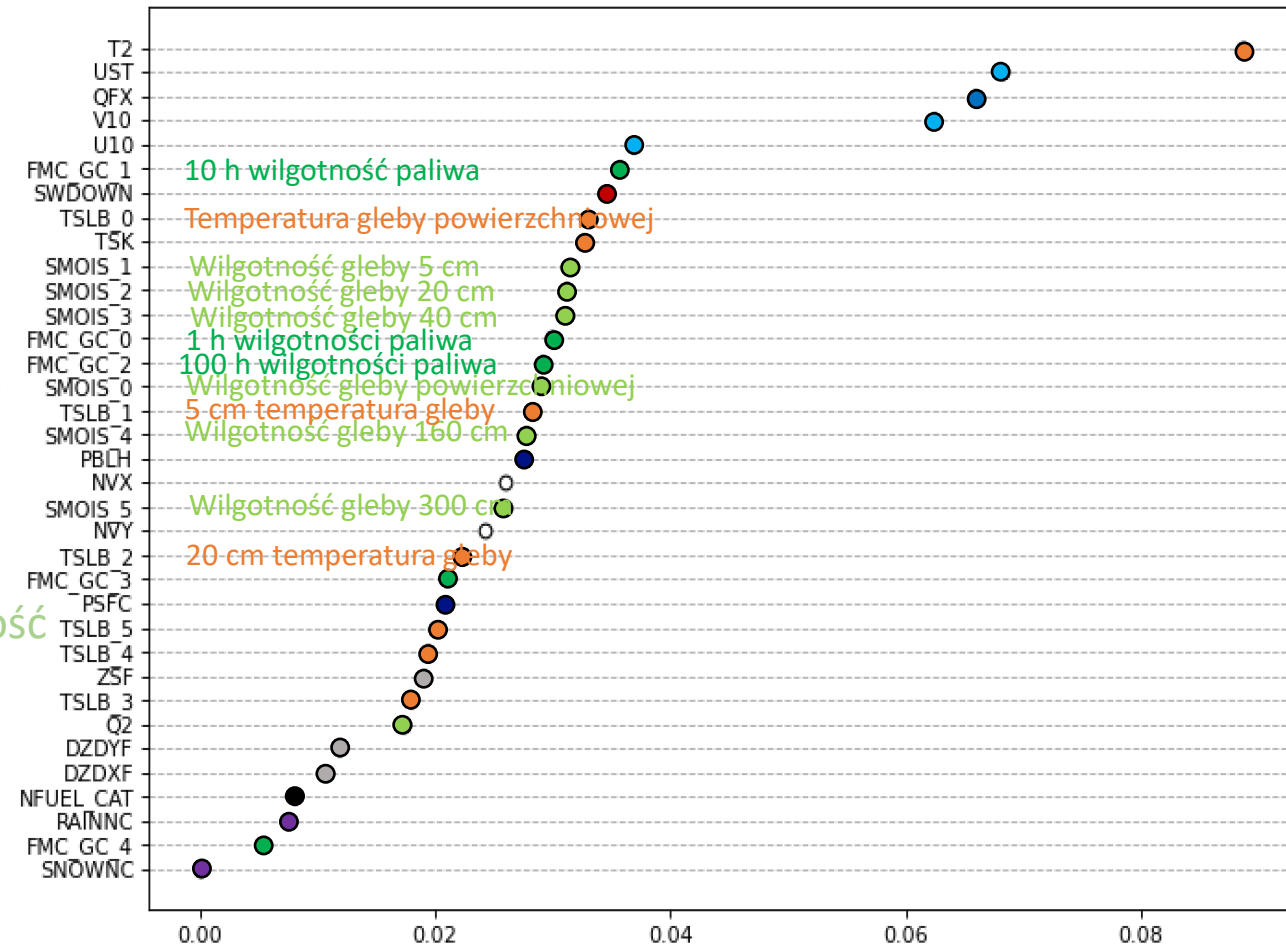
- Model ML pokazuje obiecujące wyniki z dobrze uchwyconym zakresem wartości ROS, a także jego zmiennością przestrzenną
- Wstępne wyniki wskazują, że model ML przewyższył model Rothermel o wyższym współczynniku korelacji i niższym błędzie

| Scores | ML Complete | ML Training | ML Test | Rothermel |
|-------------|-------------|-------------|---------|-----------|
| R^2 | 0.971 | 0.968 | 0.785 | -0.348 |
| Correlation | 0.989 | 0.988 | 0.892 | 0.110 |
| RMSE | 0.0142 | 0.0155 | 0.0403 | 0.144 |

Zmienne modelu pogodowego w modelu ML

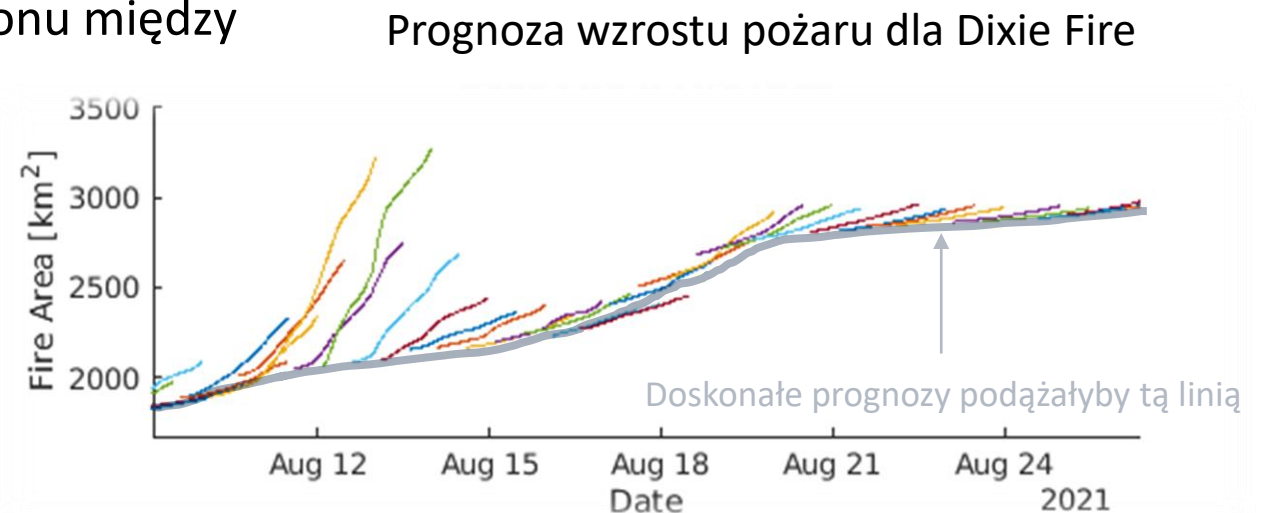
- ZSF: wysokość powierzchni n.p.m (m) } statyczne
- FZ0: długość chropowatości (m) }
- **NFUEL_CAT**: kategoria modelu paliwa (-) }
- **U10, V10**: komponenty wiatru na 10 metrach (m/s) } wiatr
- **UST**: U* prędkość tarcia (m/s) }
- **T2**: temperatura na 2 metrach (K) } temperatura
- **TSK**: temperatura powierzchni (K) }
- **TSLB**: temperatura gleby w różnych warstwach (K) }
- **SWDOWN**: solar radiation on the ground (W/m²) }
- **Q2**: wilgotność powietrza na 2m(kg/kg) } wilgotność
- **QFX**: strumień wilgoci na powierzchni (kg/m²/s) }
- **SMOIS**: wilgotność gleby w różnych warstwach (m³/m³) }
- **FMC_GC**: fuel moisture contents by class (g/g) }
- **RAINNC**: Skumulowane całkowite opady (mm) } opady.
- **SNOWNC**: skumulowane opady śniegu i lodu (mm) }
- **PSFC**: ciśnienie na powierzchni (Pa) } inne
- **PBLH**: Wysokość planetarnej warstwy granicznej (PBLH) } atmos.

Znaczenie zmiennych dla Creek Fire

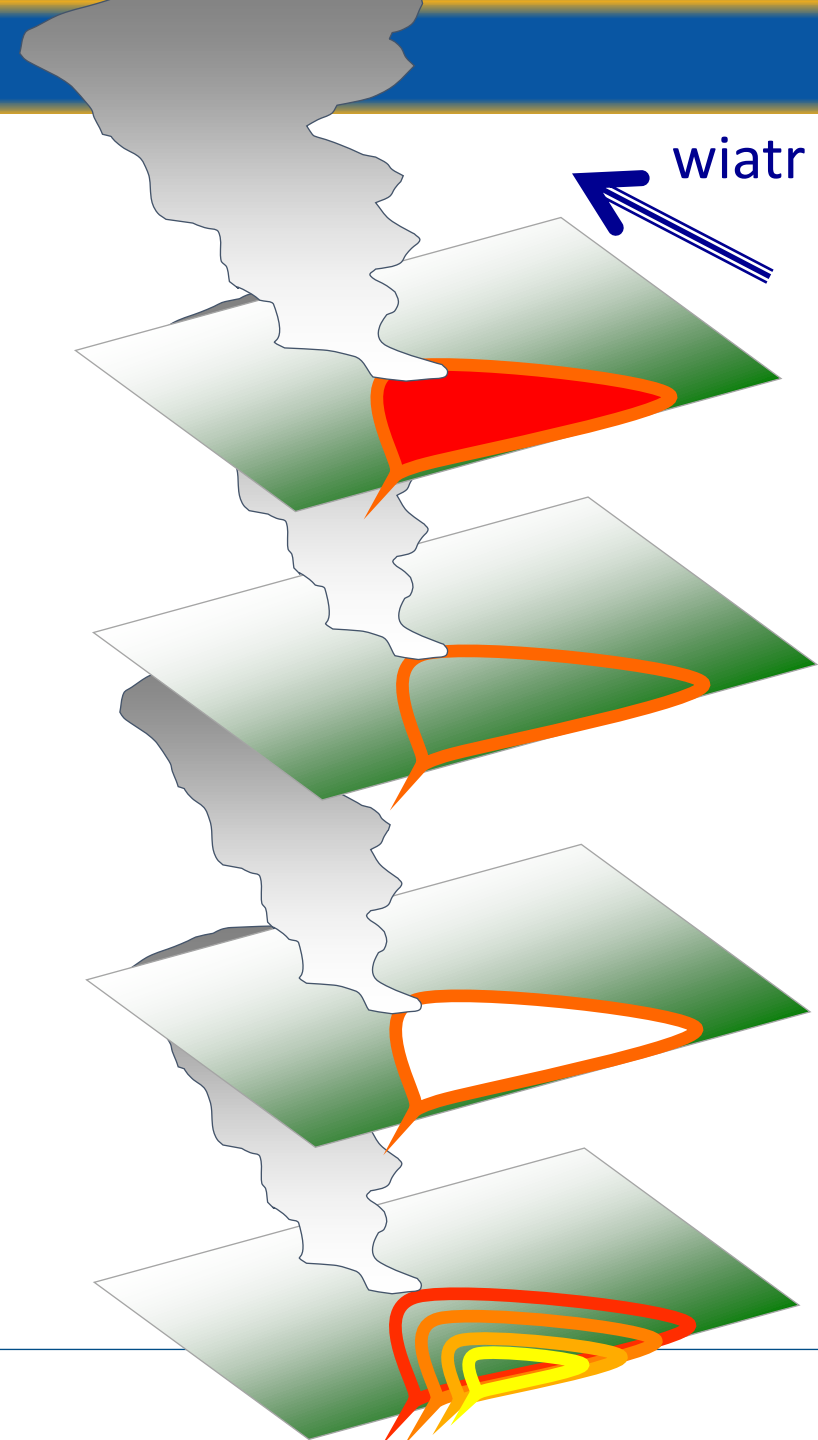


$$u_* = [(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2]^{1/4}$$

- Prognozy nie są doskonałe i podczas gdy modele pogodowe mogą odzyskać siły po przeszacowaniu kluczowych zmiennych atmosferycznych, model pożarów na ogół nie może, ponieważ ogień może tylko rosnąć.
- Podczas operacyjnego prognozowania rozprzestrzeniania się pożaru za pomocą sprzężonego modelu pożar-atmosfera konieczna jest cykliczna inicjalizacja modelu wykorzystująca obserwacje pożaru, aby zmniejszyć akumulację błędów propagacji pożaru
- Główne cele asymilacji danych satelitarnych to:
 - Zapewnienie równowagi między modelami pożaru i atmosfery na początku prognozy
 - Poinformowanie o ostatnim zasięgu pożaru
 - Umożliwienie selektywne różnicowanie zapłonu między
 - Aktywnie płonącymi regionami
 - Nieaktywnymi regionami (spalonymi)



1. Zapłon całego obszaru pożaru
2. Zapłon tylko wzdłuż obwodu
3. Zapłon tylko wzdłuż obwodu, bez paliwa w obwodzie
4. Stopniowe odtwarzanie z syntetycznej historii rozprzestrzeniania (rozpędzanie)

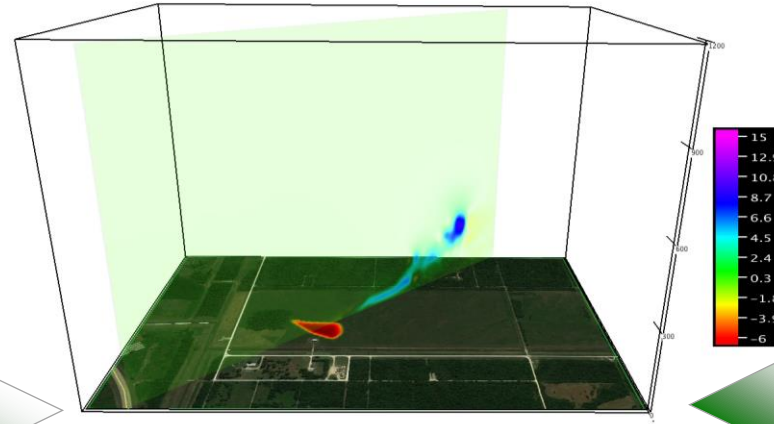
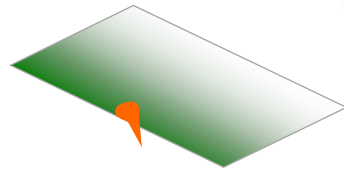


- FireFlux2 - pożar trawy
- Dwa przewody zapłonowe
- Wiele wież meteorologicznych z anemometrami dźwiękowymi i termoparami
- Zdjęcia w podczerwieni z helikoptera
- Lidar i Sodar

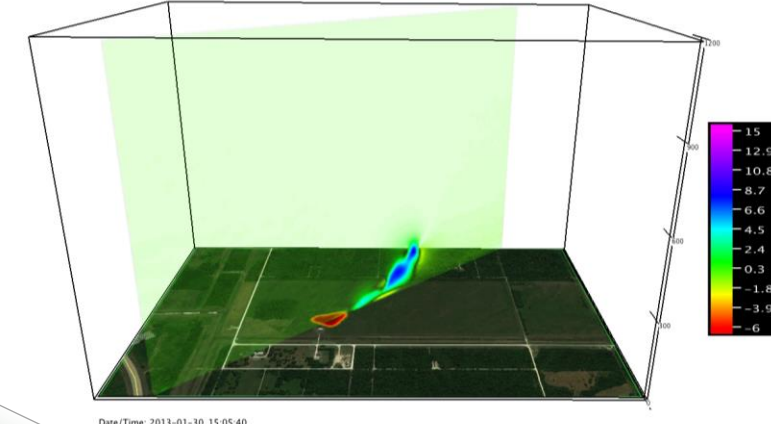


Numeryczne symulacje FireFlux2 z wykorzystaniem różnych metod zapłonu

- Wykorzystujemy obserwacje FireFlux2, aby ocenić, w jaki sposób model zainicjowany przy użyciu różnych metod rozwiązuje pirokonwekcję



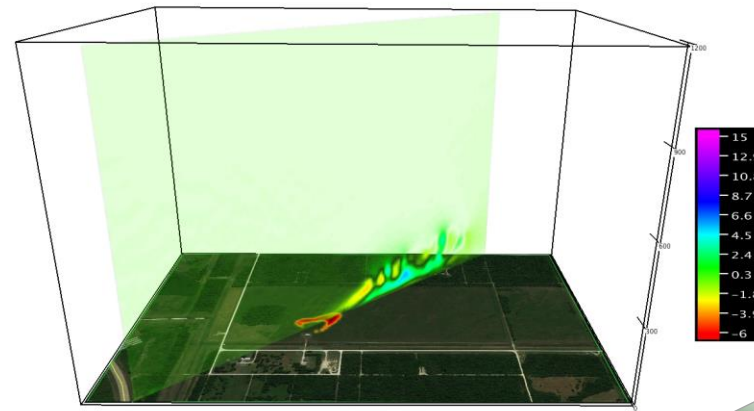
Przebieg wzorcowy (ciągły od momentu zapłonu)



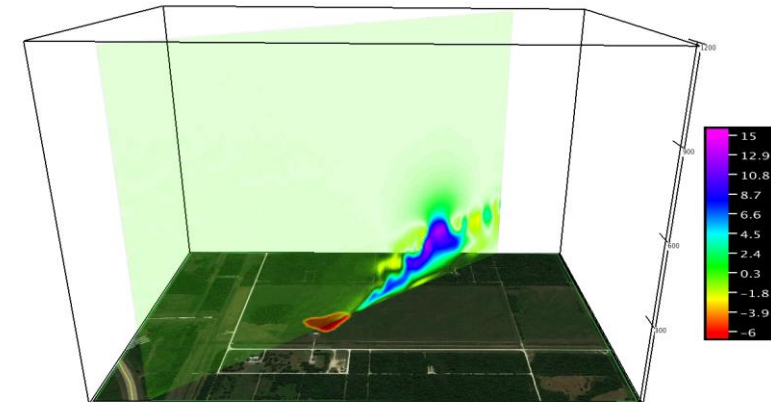
Zapłon obwodowy z usunięciem paliwa

- Porównujemy symulowane prędkości pionowe z obserwacjami na głównej wieży

- Najlepsza zgodność między symulowanymi i obserwowanymi prędkościami pionowymi wskazuje optymalną metodę

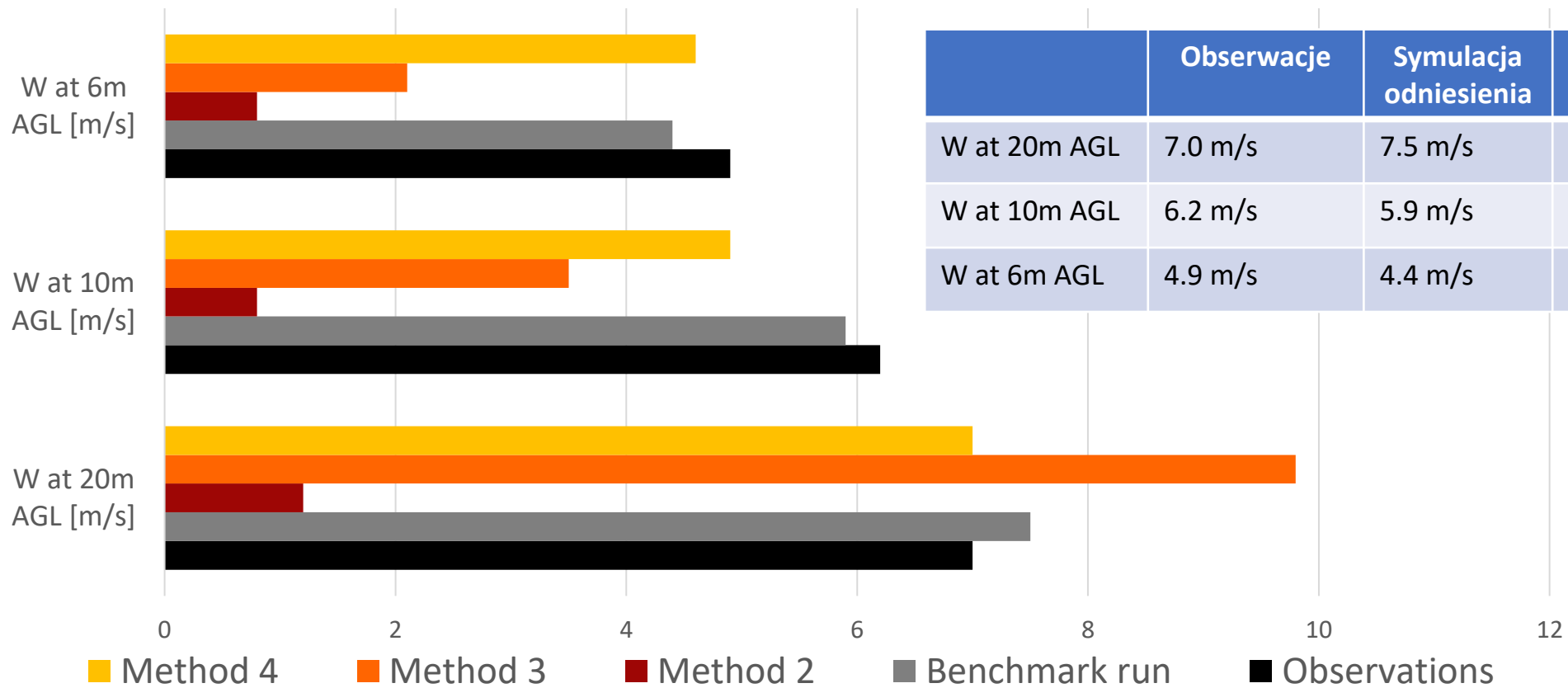


Zapłon obwodowy

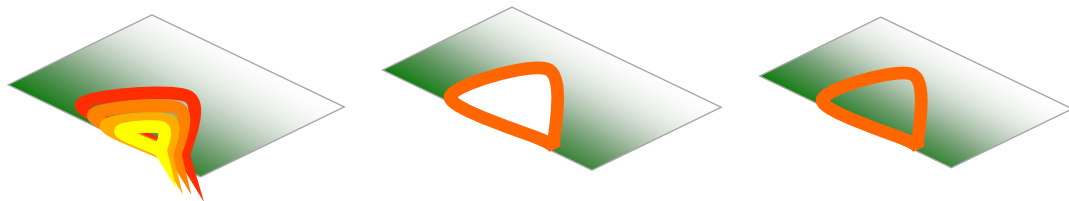


Stopniowy zapłon – rozpędzanie

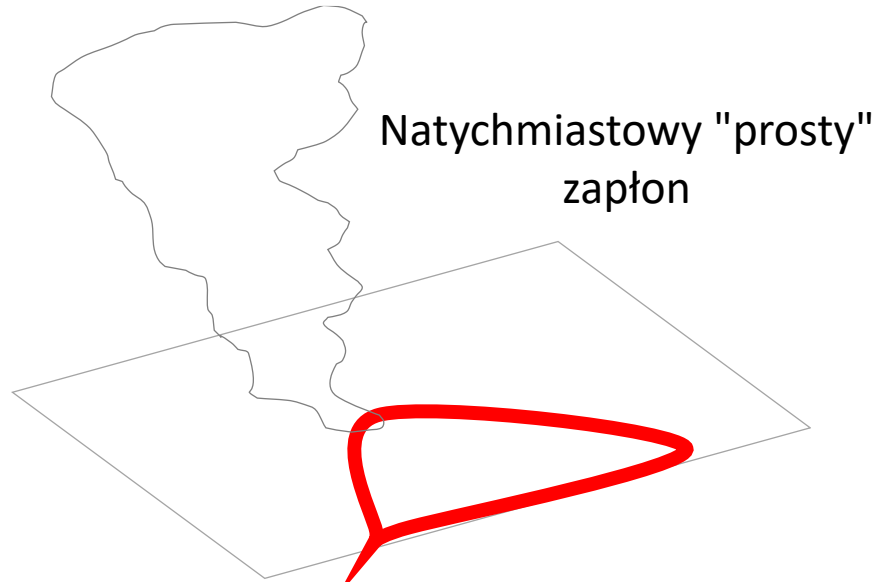
Podsumowanie wyników (prędkość wznoszenia)



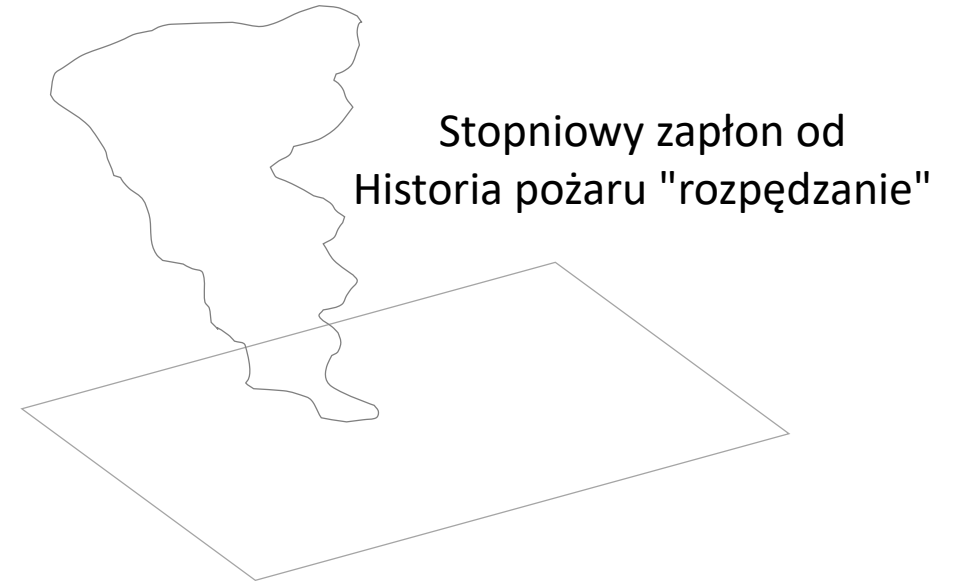
| | Observacje | Symulacja odniesienia | Metoda 2 | Metoda 3 | Metoda 4 |
|--------------|------------|-----------------------|----------|----------|----------|
| W at 20m AGL | 7.0 m/s | 7.5 m/s | 1.2 m/s | 9.8 m/s | 7.0 m/s |
| W at 10m AGL | 6.2 m/s | 5.9 m/s | 0.8 m/s | 3.5 m/s | 4.9 m/s |
| W at 6m AGL | 4.9 m/s | 4.4 m/s | 0.8 m/s | 2.1 m/s | 4.6 m/s |



Przeprowadzamy symulacje prostą metodą chwilową i metodą stopniowego zapłonu w przypadku pożaru



- Natychmiastowy zapłon przeprowadzono w oparciu o najświeższe dane National Infrared Operations (NIROPS), które były dostępne przed rozpoczęciem prognozy.

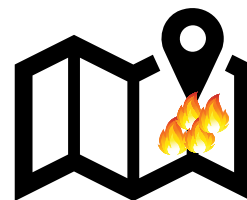


- Stopniowy zapłon wykorzystywał dwa obwody, a historia pożaru dla rozruchu została wygenerowana przez interpolację czasu nadejścia ognia między kolejnymi obwodami, jednym powietrznym i jednym syntetycznym opartym na VIIRS

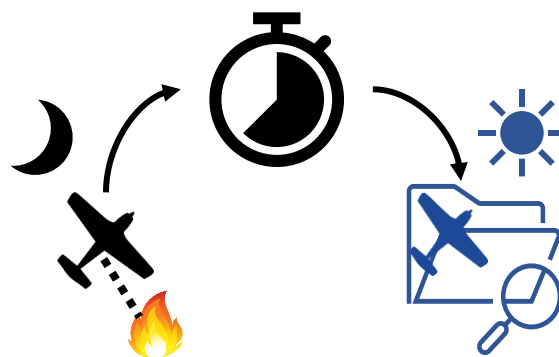


Dane satelitarne VIIRS/MODIS zapewniają globalny zasięg, podczas gdy obwody podczerwieni nie są dostępne globalnie

Dane satelitarne są dostępne zgodnie z wcześniej ustalonym harmonogramem, podczas gdy obwody IR nie są. Trudno ocenić, czy i kiedy nastąpi przelot samolotu zwiadowczego z IR



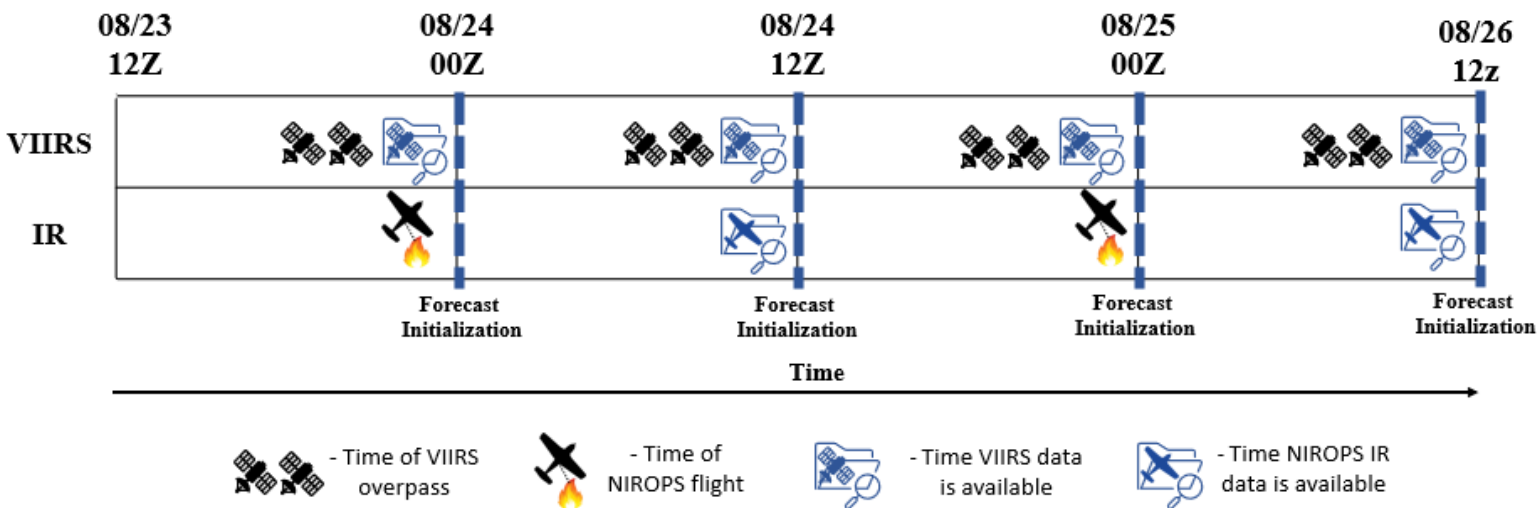
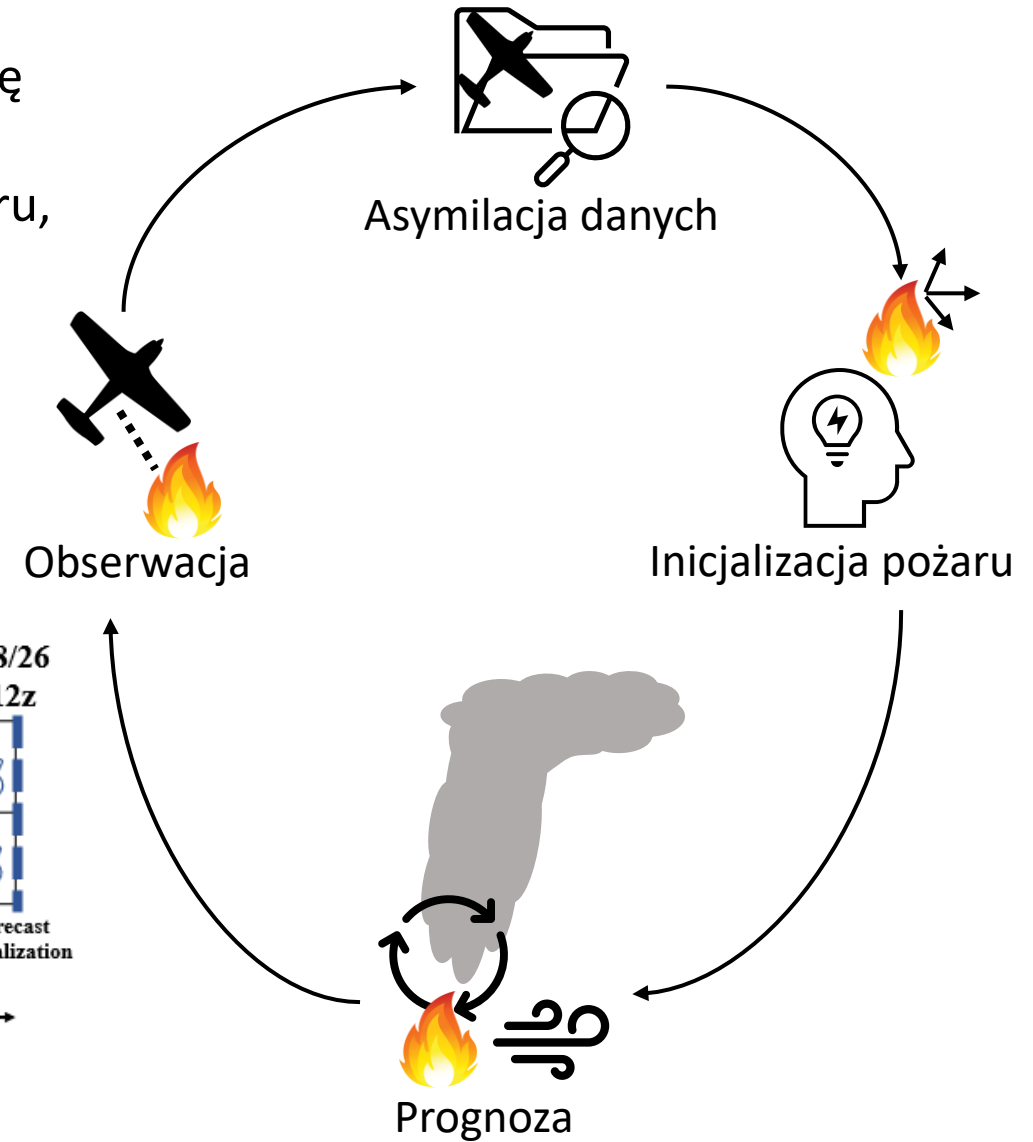
Dane satelitarne zapewniają ogólnie lepszy zasięg przestrzenny i czasowy niż obwody podczerwieni, które są dostępne tylko dla wybranych incydentów pożarowych, które stają się wystarczająco duże.



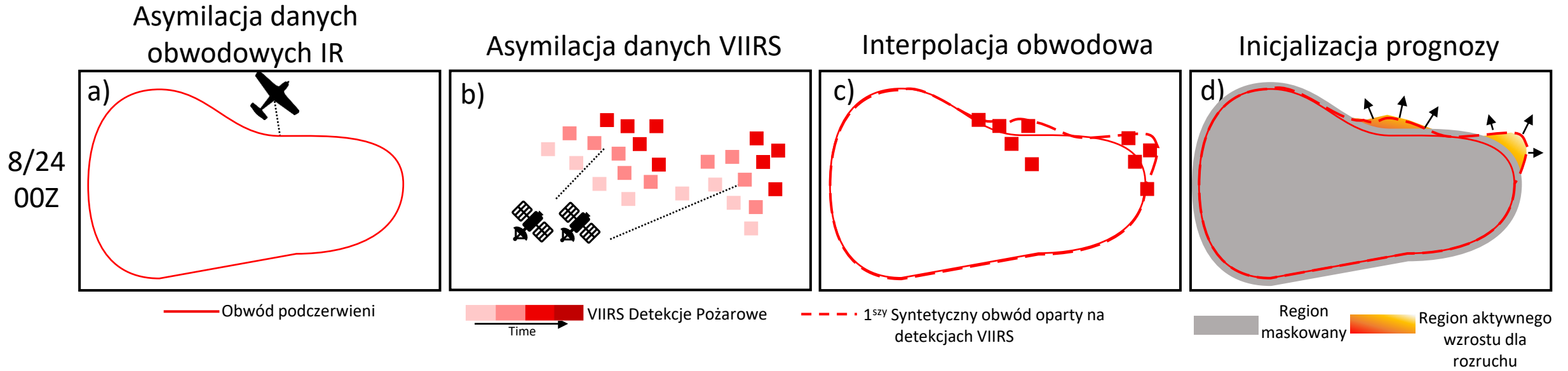
Dane satelitarne mogą potencjalnie zmniejszyć opóźnienie w porównaniu z obwodami podczerwieni, które publikowane rano zazwyczaj odzwierciedlają zasięg pożaru zmapowany poprzedniej nocy

Cykl asymilacji danych pożarowych

- Typowy cykl prognozy obejmuje zbieranie obserwacji, asymilację danych, inicjalizację stanu pożaru w modelu i prognozę
- Aby zapewnić jak najlepsze oszacowanie początkowej fazy pożaru, łączymy zarówno obwody podczerwieni z detekcji satelitarnych NIROPS (National Infrared Operations), jak i VIIRS



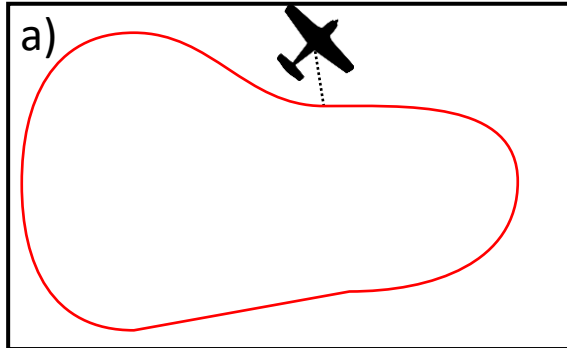
Integracja obwodów pożarowych i danych satelitarnych



Integracja obwodów pożarowych i danych satelitarnych

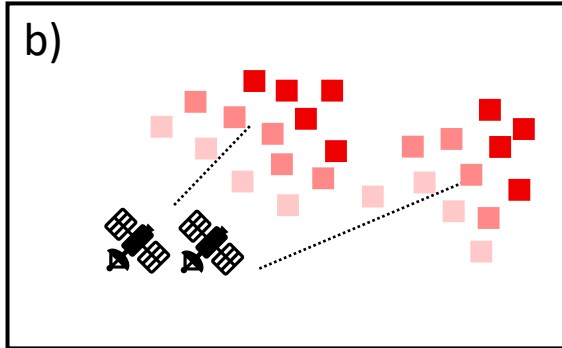
Asymilacja danych obwodowych IR

8/24
00Z



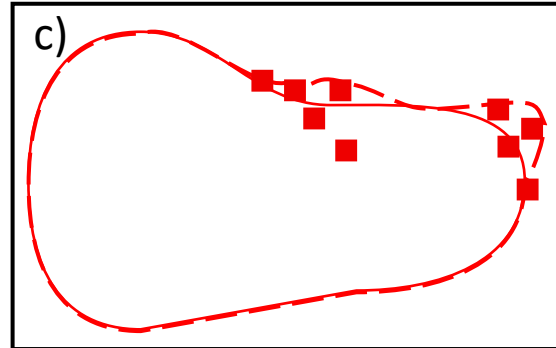
— Obwód podczerwieni

Asymilacja danych VIIRS



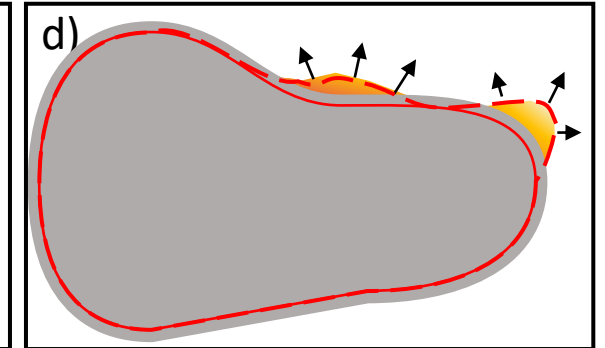
VIIRS Detekcje Pożarowe
Time →

Interpolacja obwodowa



- - - 1^{sz} Syntetyczny obwód oparty na detekcjach VIIRS

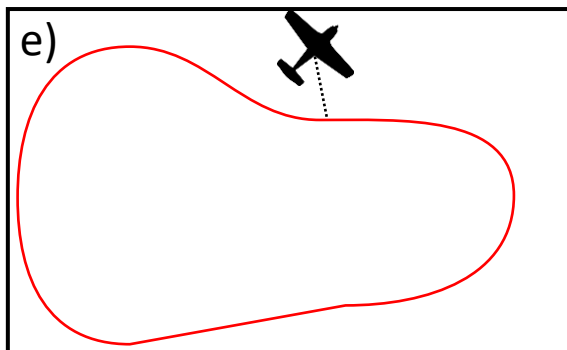
Inicjalizacja prognozy



Region maskowany Region aktywnego wzrostu dla rozruchu

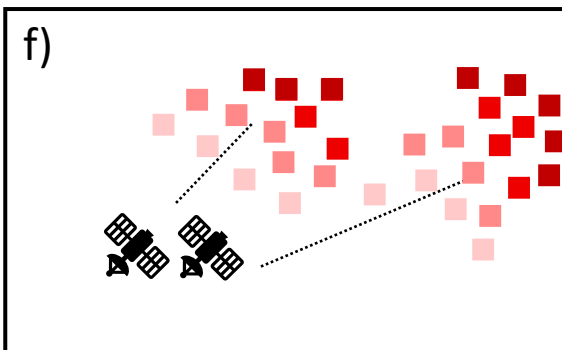
Asymilacja danych obwodowych IR

8/24
12Z



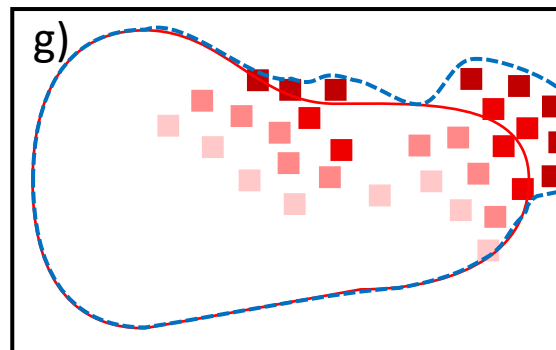
— IR Perimeter

Asymilacja danych VIIRS



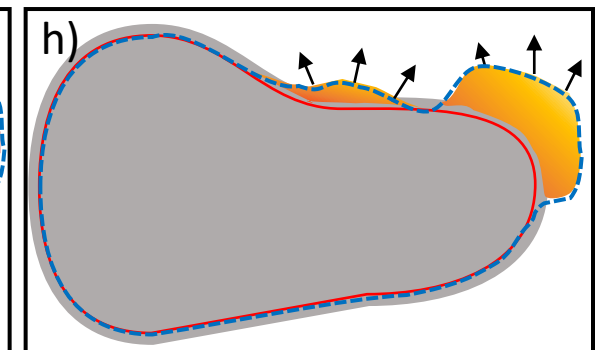
VIIRS Detekcje Pożarowe
Time →

Interpolacja obwodowa



- - - 1^{sz} Syntetyczny obwód oparty na detekcjach VIIRS
- - - 2^{gi} Syntetyczny obwód oparty na detekcjach VIIRS

Inicjalizacja prognozy



Region maskowany Region aktywnego wzrostu dla rozruchu

Metody zapłonu testowane w scenariuszu pożaru

Metoda prosta (natychmiastowy zapłon)



Natychmiastowa inicjalizacja



Sprzężona symulacja pożaru i atmosfery

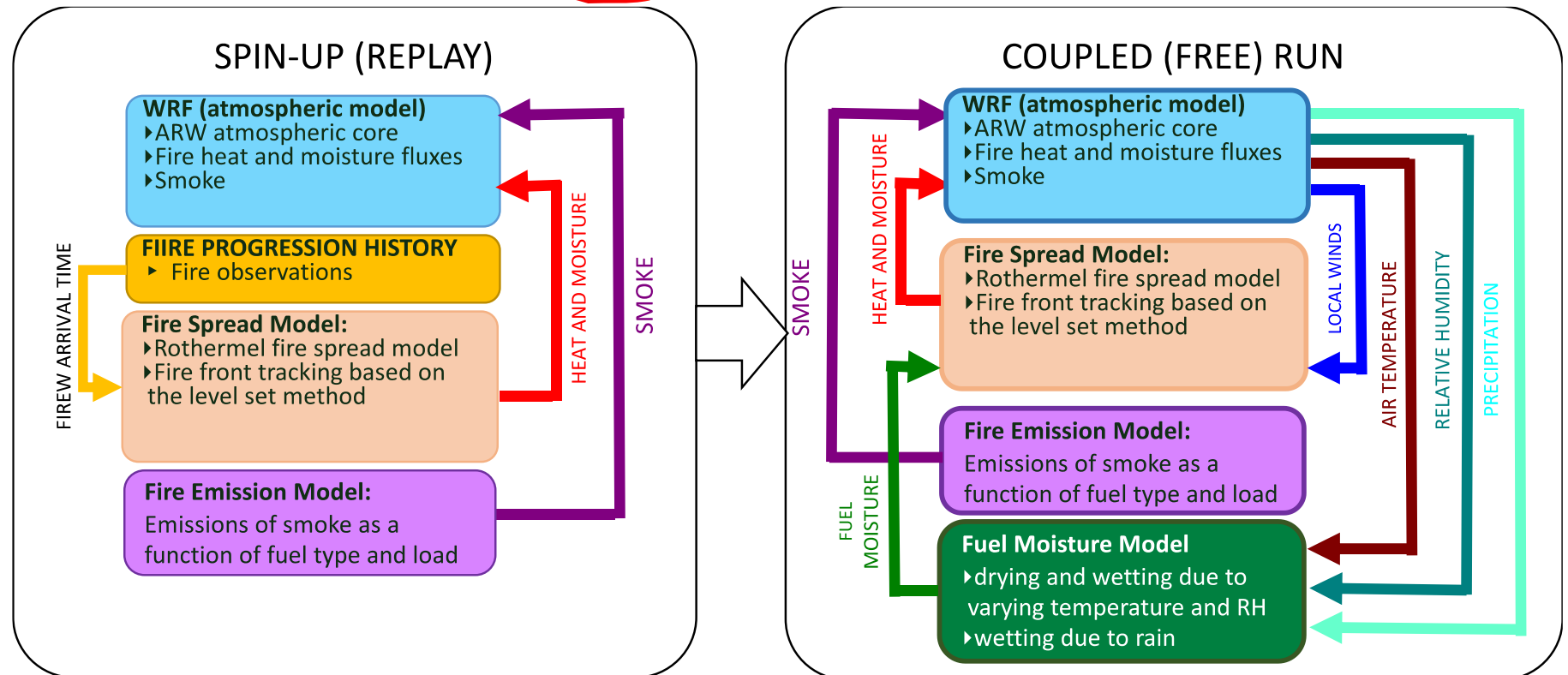
Metoda stopniowego zapłonu (rozruchu)



Inicjalizacja rozruchu



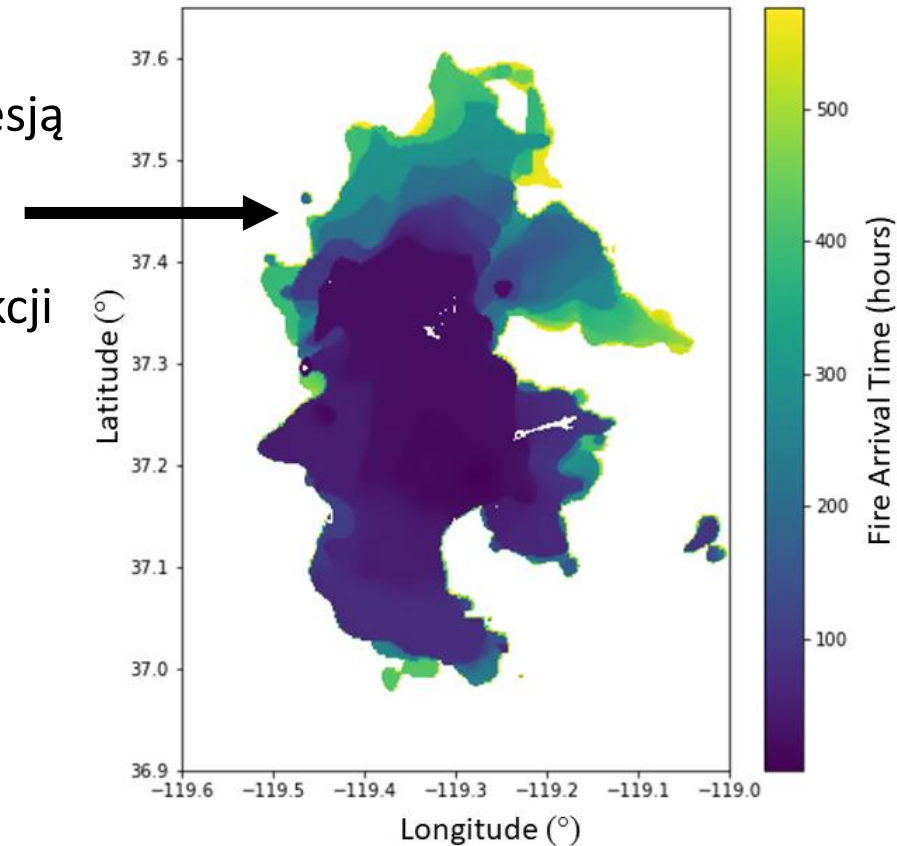
Sprzężona symulacja pożaru i atmosfery



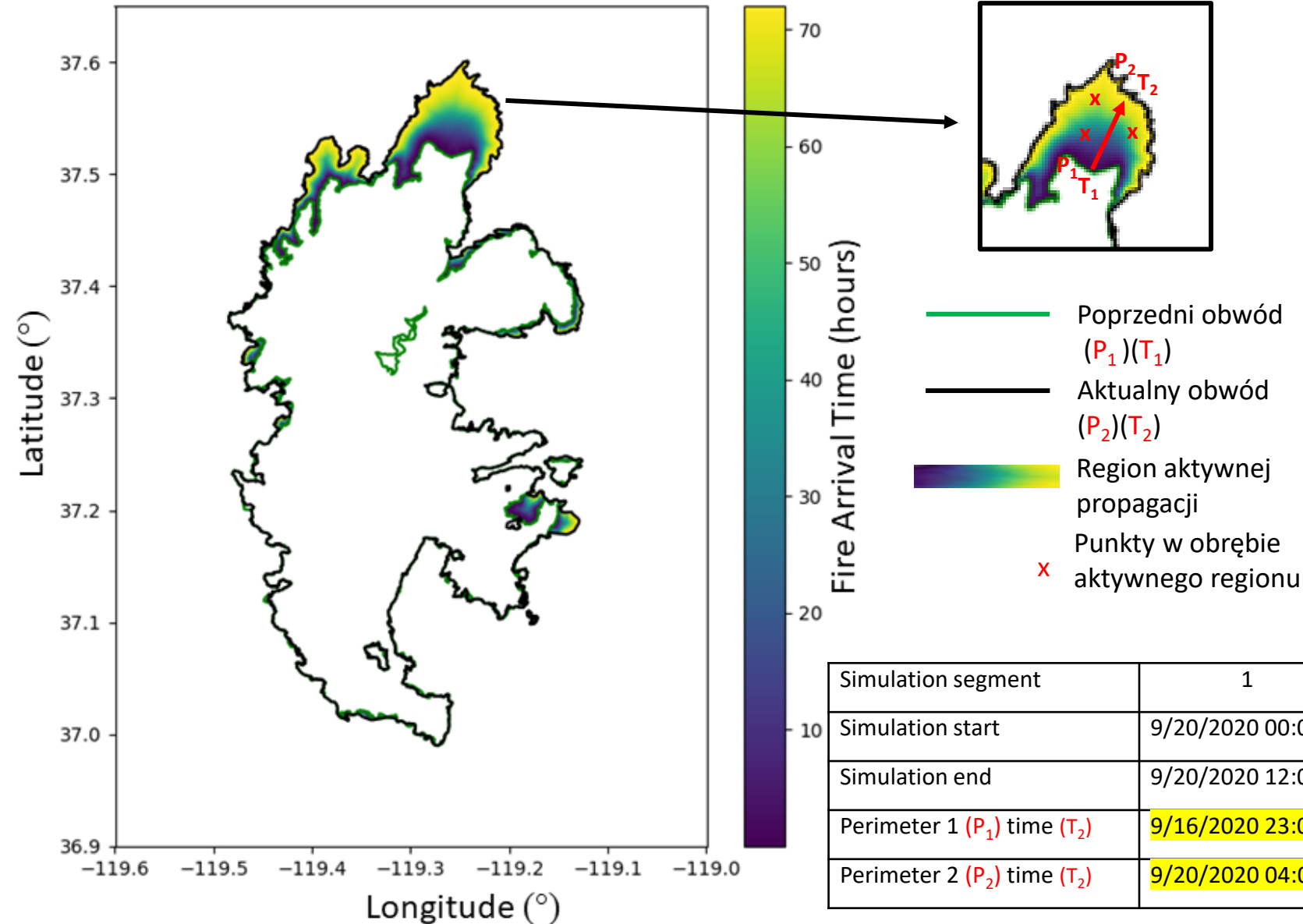
9/5/2020-9/29/2020
Benchmark Simulation SVM
Generated Fire Arrival Time

Przeprowadzono symulację referencyjną dla całego czasu trwania pożaru, która miała być wykorzystana jako punkt odniesienia (ciągła seria z progresją ognia ograniczoną za pomocą obserwacji satelitarnych)

- Satelitarne dane z wykrywania pożaru wykorzystano do rekonstrukcji historii progresji pożaru poprzez asymilację danych wykrywania pożaru za pomocą metody maszyny wektora wsparcia (SVM) wdrożonej przez Farguell et al. 2021
- Ciągła symulacja od 5 września 2020 r. do 29 września 2020 r, Reprezentuje najlepszą możliwą realizację dynamiki ognia i dymu



Tworzenie FAT z podczerwieni i danych satelitarnych do stopniowego zapłonu



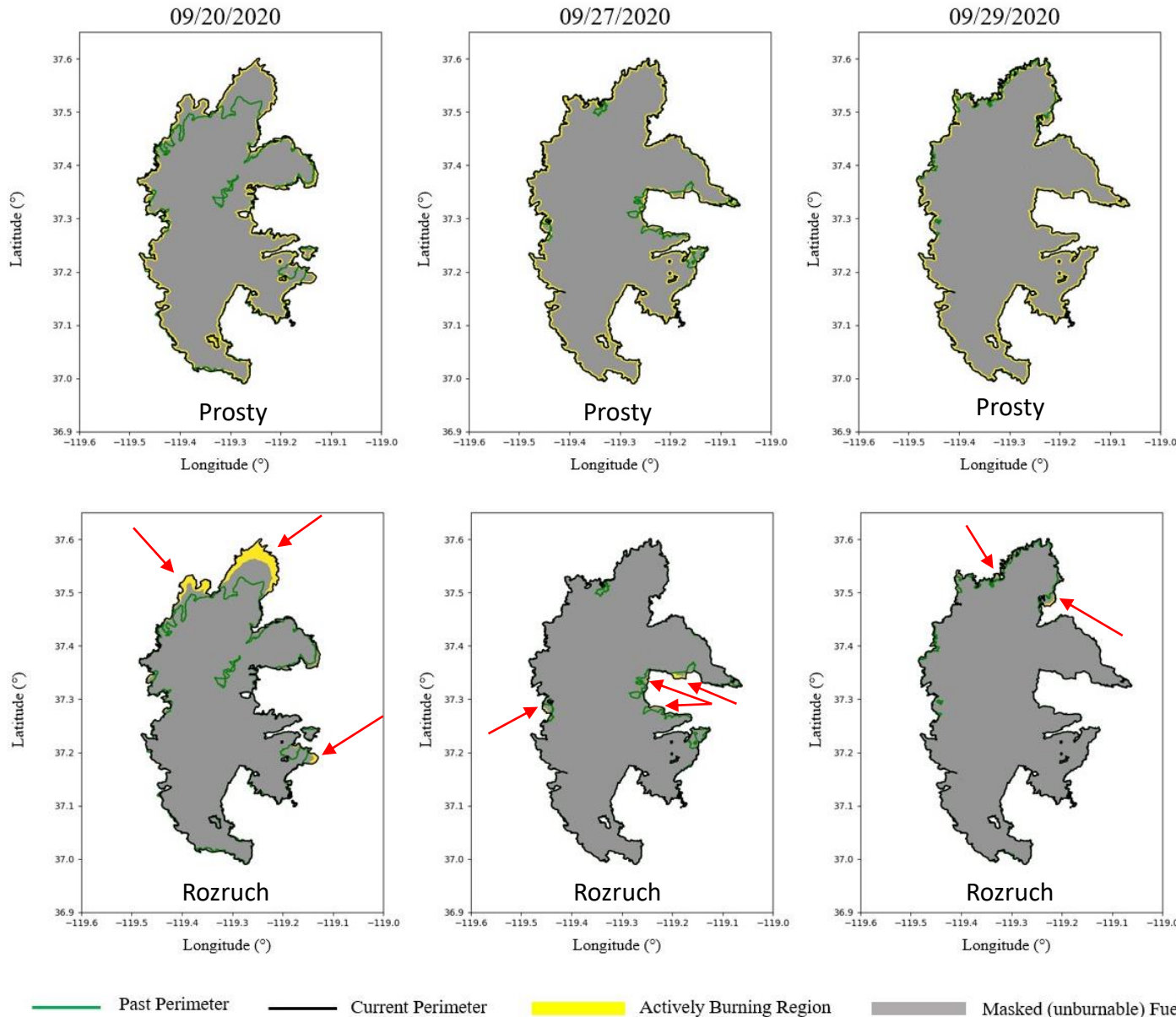
Przy szacowaniu progresji pożaru między dwoma kolejnymi obwodami pożaru (P_1 i P_2) czasami (T_1 i T_2), należy określić aktywne obszary, które wymagają czasu nadejścia pożaru.

- Aktywny region jest definiowany jako punkty x , które znajdują się wewnątrz P_2 i poza P_1 .
- Następnie minimalna odległość między każdym aktywnym punktem x a obwodem P_j jest znajdowana i definiowana jako $d_{x,j}$.

Czas nadejścia pożaru (T) można następnie zdefiniować jako interpolację liniową między T_1 i T_2 skalowaną o minimalną odległość do każdego obwodu $d_{x,1}$ i $d_{x,2}$ zgodnie z równaniem (1).

$$T(x) = \frac{d_{x,2}}{d_{x,1}+d_{x,2}} T_1 + \frac{d_{x,1}}{d_{x,1}+d_{x,2}} T_2 \quad (1)$$

Porównanie metod zapłonu



Prosty zapłon

- Cały obwód jest zaznaczony kolorem żółtym, co oznacza, że ogień jest zapalany wszędzie wzdłuż obwodu

Symulacja stopniowego zapłonu

- tylko obszary, w których ogień aktywnie rozprzestrzenia się obszary, są żółte (patrz czerwone strzałki)

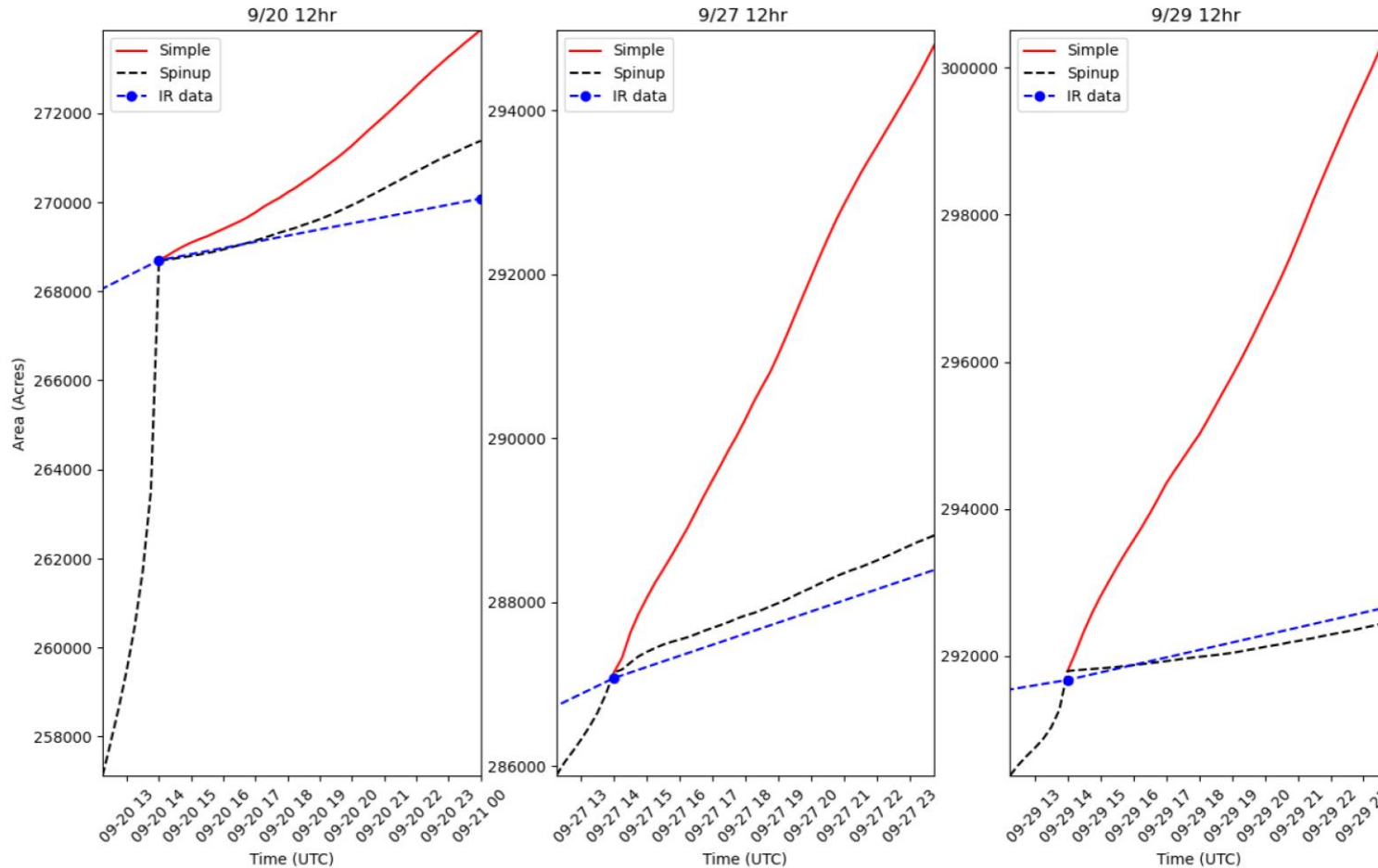
Dla każdego przejazdu wewnątrz obwodu było "maskowane", aby reprezentować już spalone paliwo (szare wypełnienie). To usuwanie paliwa zostało wykonane z dodatkowym marginesem rozciągającym się poza pierwszy obwód (50 m).

Usuwanie paliwa służy dwóm celom.

- Aby zapobiec rozprzestrzenianiu się ognia w kierunku wnętrza obwodu pożaru (w czerń)
- w celu dezaktywacji ognia w regionach o marginalnej aktywności pożarowej lub jej braku.

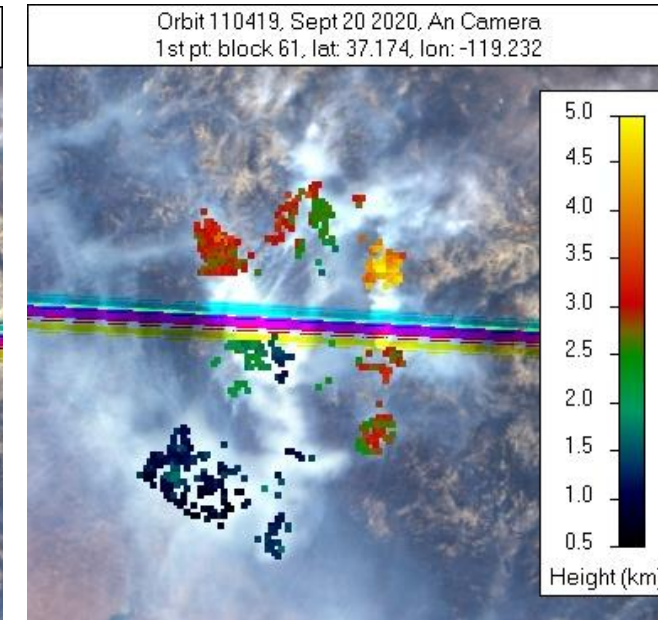
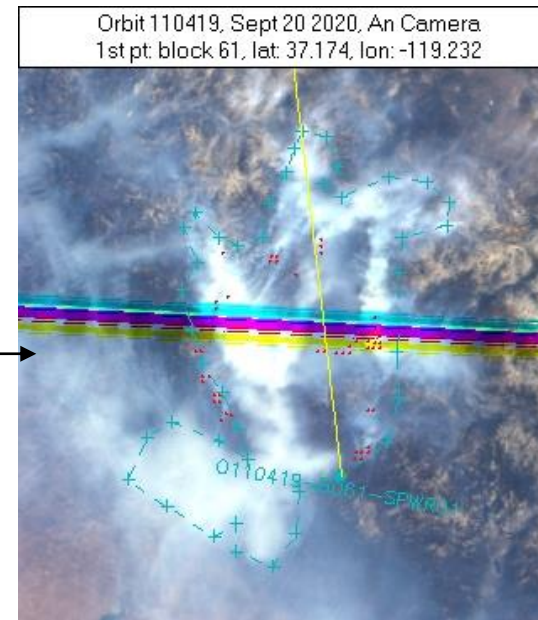
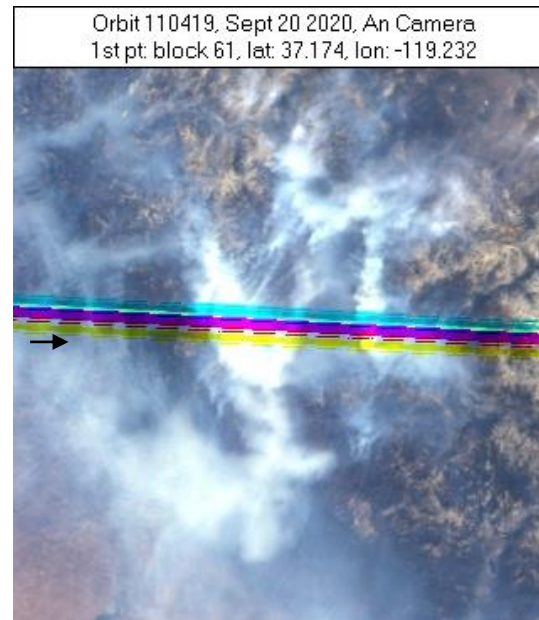
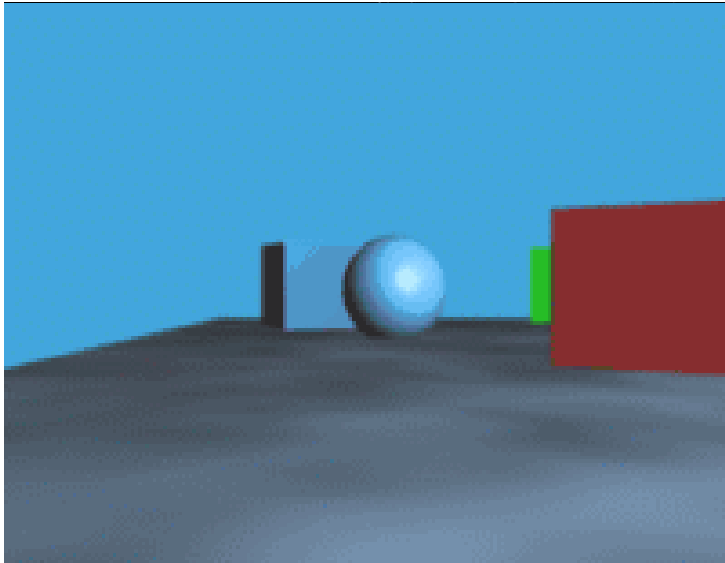
duża różnica w ilości wypalonego obszaru w momencie inicjalizacji

Metoda zapłonu Porównanie rozprzestrzeniania się ognia



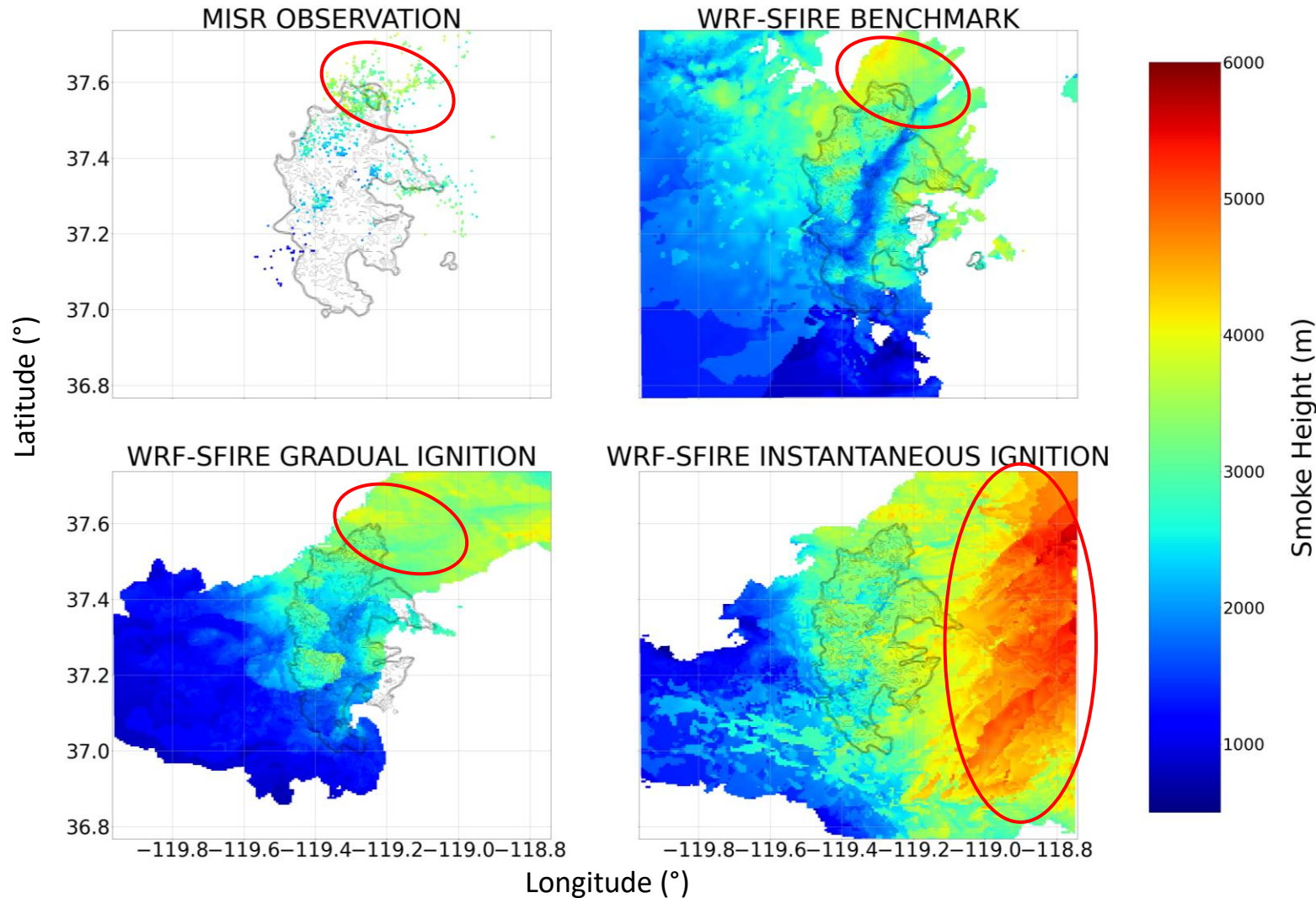
- Wykresy pokazują pierwsze 10 godzin prognozowanego rozprzestrzeniania się ognia
- **Chwilowy zapłon (metoda prosta)** widziana na czerwono ma znacznie większy spread w porównaniu z **metodą stopniowego zapłonu (rozpędzania)** obserwowaną na czarno
- Metoda spin-up (czarny) jest znacznie bliższa obserwacjom (niebieski)
- Spodziewać się można, że to przeszacowanie wzrostu zwiększy wysokość słupa dymu

MISR - Wielo-kątowy Spektroradiometr NASA



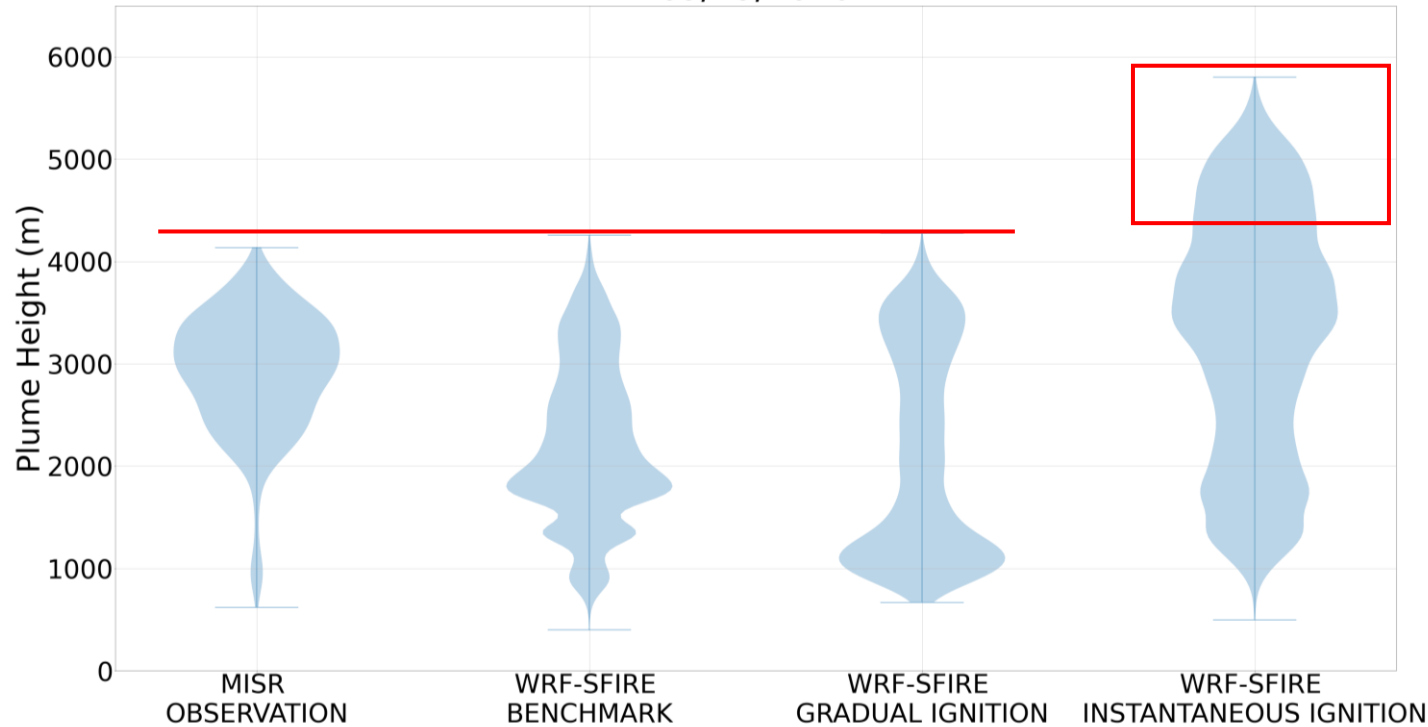
- Instrument MISR używa dziewięciu oddzielnych kamer cyfrowych, które zbierają dane w czterech różnych pasmach widmowych widma słonecznego. Jedna kamera skierowana jest w stronę nadiru, podczas gdy pozostałe zapewniają kąty widzenia do przodu i do tyłu ($26,1^\circ$, $45,6^\circ$, $60,0^\circ$ i $70,5^\circ$).
- Gdy instrument orbituje, każdy obszar powierzchni Ziemi jest kolejno fotografowany przez wszystkie dziewięć kamer w każdej z czterech długości fal (niebieska, zielona, czerwona i bliska podczerwień)
- Efekt paralaksy pozwala na obliczenie wysokości obserwowanych obiektów takich na przykład chmur lub dymu

Map of MISR Derived Smoke Height and WRF-SFIRE Smoke Height
09/29/2020



- Natychmiastowy zapłon z 29 września przeszacował zasięg dymu, a także wysokość kolumny dymu
- Symulacja stopniowego zapłonu ma większą zgodność z obserwacjami MISR i symulacją porównawczą, pokazującą najwyższy pionowy zasięg dymu wzdłuż północnej flanki pożaru

Comparison between MISR Derived Smoke Height and WRF-SFIRE Smoke Height
09/29/2020



- Symulacja zapłonu chwilowego znacznie zawyżyła maksymalne wysokości kolumny dymu
- Symulacje porównawcze i stopniowego zapłonu miały podobną maksymalną wysokość w porównaniu z obserwacjami MISR
- Stopniowy zapłon w granicach ~10 m od najwyższej obserwowanej wysokości dymu
- Symulacja chwilowego zapłonu miała wysokość dymu ~ 1 700 m wyższą niż obserwacje
- Lepsze działanie metody stopniowego zapłonu niż metoda chwilowa.

| | MISR Obserwacje | WRF-SFIRE Punkt odniesienia | WRF-SFIRE Stopniowy zapłon | WRF-SFIRE Natychmiastowy zapłon |
|---------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Max Wysokość kolumny dymu (m) | 4138 | 4258 | 4278 | 5803 |
| Błąd wysokości kolumny dymu (m) | | 120 | 140 | 1665 |

- Dane satelitarne z MODIS i VIIRS można zintegrować z obserwacjami w podczerwieni i lokalizacjami zapłonu w celu generowania historii progresji pożaru za pomocą maszyn wektorów nośnych (SVM)
- Historie progresji pożaru mogą być wykorzystywane do prowadzenia symulacji historycznych i uzupełniania inwentaryzacji emisji pożaru
- Satelitarna detekcja pożaru przetwarzana przez SVM może być wykorzystana do tworzenia zestawów danych szkoleniowych dla modeli rozprzestrzeniania się ognia w ramach uczenia maszynowego,
- Inicjalizacja pożaru ma kluczowe znaczenie dla zdolności modelu do realistycznego uchwycenia szybkości rozprzestrzeniania się ognia i dynamiki kolumny dymu
- Stopniowe rozpędzanie jest preferowaną metodą, ale wymaga rekonstrukcji niedawnej progresji pożaru
- Wykorzystanie danych satelitarnych do uzupełnienia obwodów podczerwieni pozwala poprawić rozprzestrzenianie się pożaru i prognozowanie dymu poprzez maskowanie spalonego regionu i selektywnego zapłonu ze stopniowym procesem rozruchu, zapewniając, że modele pożaru i atmosfery są zsynchronizowane na początku prognozy

- Dane satelitarne z MODIS i VIIRS można zintegrować z obserwacjami w podczerwieni i lokalizacjami zapłonu w celu generowania historii progresji pożaru za pomocą maszyn wektorów nośnych (SVM)
- Historie progresji pożaru mogą być wykorzystywane do prowadzenia symulacji historycznych i uzupełniania inwentaryzacji emisji pożaru
- Satelitarna detekcja pożaru przetwarzana przez SVM może być wykorzystana do tworzenia zestawów danych szkoleniowych dla modeli rozprzestrzeniania się ognia w ramach uczenia maszynowego,
- Inicjalizacja pożaru ma kluczowe znaczenie dla zdolności modelu do realistycznego uchwycenia szybkości rozprzestrzeniania się ognia i dynamiki pióropusza
- Stopniowe rozpędzanie jest preferowaną metodą, ale wymaga rekonstrukcji niedawnej progresji pożaru
- Wykorzystanie danych satelitarnych do uzupełnienia obwodów podczerwieni pozwala poprawić rozprzestrzenianie się pożaru i prognozowanie dymu poprzez maskowanie spalonego regionu i selektywnego zapłonu ze stopniowym procesem rozruchu, zapewniając, że modele pożaru i atmosfery są zsynchronizowane na początku prognozy

Farguell, A.; Mandel, J.; Haley, J.; Mallia, D.V.; Kochanski, A.; Hilburn, K. Machine Learning Estimation of Fire Arrival Time from Level-2 Active Fires Satellite Data. *Remote Sens.* 2021, 13, 2203. <https://doi.org/10.3390/rs13112203>

