

# Analysis of Forest Fires

## Introduction Computational Science

Tomas Bosschieter\* and Sven de Ronde†

*University of Amsterdam*

February 27th, 2020

## 1 Inleiding

Steeds vaker zien we bosbranden op het nieuws, en sommigen hebben er persoonlijk mee te maken. In dit verslag staat vermeld hoe wij bosbranden hebben gesimuleerd, samen met de experimenten en resultaten. Dit omvat ook de aannames die wij hebben gedaan, de data-analyse en de andere aspecten.

Omdat wij iets extra's en anders wilden doen dan standaard wordt gedaan, hebben wij een andere aanpak bedacht en hier literatuur bij gezocht, die ons kon helpen met formules, goede waarden voor parameters, et cetera.

Voor de volledigheid en het gemak voor de lezer, zetten we de commando's voor het runnen van de scripts in de inleiding hier. Zie hier de lijst van mogelijkheden:

**GUI** `python3 ca.py`.

**Fitter** `python3 fitter.py <lower bound> <upper bound> <data points> <n>`

Hier zijn alle parameters verplicht. De eerste twee zijn floats groter dan 0. Het lower bound is de laagste waarde voor de parameter  $p_0$  die we fitten, en de upper bound is de hoogste waarde. De laatste twee zijn integers, waar data points het aantal verschillende equidistante punten is dat in de range van waarden die we proberen, en  $n$  het aantal keer dat we elk data punt willen herhalen.

**Experiment** `python3 ca.py [n]`

Hier is het argument  $n$  optioneel. Het programma voert dan beide experimenten uit (zie sectie *Experimenten en analyseren*). Als  $n = 0$  wordt ingevuld, voert het de eerste uit, en bij  $n = 1$  de tweede en bij  $n = 2$  de derde.

**Plots** `python3 ca.py [n]`

Ook hier is  $n$  optioneel. In het geval dat we  $n$  weglaten, plot het beide resultaten, anders plot het de resultaten van de eerste als  $n = 0$  ingevoerd wordt, en de tweede als  $n = 1$  bij  $n = 2$  de derde.

---

\*E-mail: [tomasbosschieter@gmail.com](mailto:tomasbosschieter@gmail.com)

†E-mail: [svenderonde@xs4all.nl](mailto:svenderonde@xs4all.nl)



## 2 Model definitie en implementatie

Wij simuleren bosbranden op *niet* op torussen, aangezien deze de realiteit helemaal niet weergeven. Wij gebruiken dus de grid echt als een rechthoek, i.p.v. een torus. We gaan ervanuit, om de statussen van de bomen op de rand van het bos te bepalen, dat alles buiten het bos leeg is.

Wij simuleren de bosbranden met behulp van cellular automata. Ook nemen aan dat een bosbrand een markovketen is in deze simulatie, dat wil zeggen dat de staat van de torus op tijdstip  $t$  alleen afhangt van zijn staat op tijdstip  $t - 1$ . Dit is een redelijke aanname om te maken, aangezien het gebruikelijk is om bosbranden zo te representeren en dit de realiteit goed weerspiegelt [Boyчук et al., 2007].

Hierbij gebruiken wij een bepaalde hoogte en breedte van cellen. Deze waarden kunnen ingesteld worden zoals de gebruiker wil. Voor elke cel hebben wij 5 mogelijke staten:

- Leeg (kleur: wit)
- Gezond (kleur: groen),
- Droog (kleur: geel),
- Brandend (kleur: rood),
- Verbrand (kleur: zwart).

Het bijhouden van staten doen wij met behulp van een matrix, die in een klasse zit. Deze klasse is deels gebaseerd op die van de vorige opgaven, aangezien dit een mooi framework is voor ook deze simulaties. De gebruiker heeft de mogelijkheid om het percentage gezonde bomen waarmee we beginnen in te stellen, evenals het percentage van branden in de grid. De gebruiker kan er echter ook voor kiezen om het middelste punt in de grid brandend te laten zijn.

Om ervoor te zorgen dat we een percentage  $Q$  van de bomen krijgen, bekijken we eerst  $q = Q/100$ , het getal dat in de GUI ingevoerd wordt. Daarna gebruiken we de math-module om een willekeurig getal  $x$  tussen 0 en 1 te krijgen. Vervolgens kijken we of dit getal groter of kleiner is dan  $q$ . Als  $x < q$ , dan maken we de cel gezond (groen), en anders niet. Hiermee zorgen we dat bij goede benadering  $Q$  procent groen is.

Hoewel elke cel in ons grid een boom voorstelt in een bos, zijn er veel verschillende soorten bomen, de een dichter dan de ander. De dichtheid van een boom in z'n ruimte noemen we  $\rho_{\text{den}} \in [-1, \infty)$ , hoewel het vaak in  $[-1, 1]$  zit. Als het helemaal niet dicht is, noemen we het -1 en als het enorm dicht is, dan 1, zoals ook gedaan is in [Alexandridis et al., 2008] en [Freire and DaCamara, 2019]. Standaard is  $\rho_{\text{den}} = 0$ . De gebruiker kan dit echter zelf aanpassen.

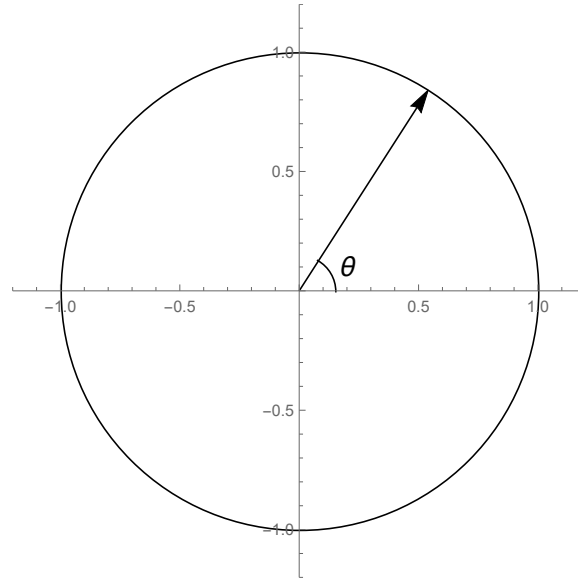
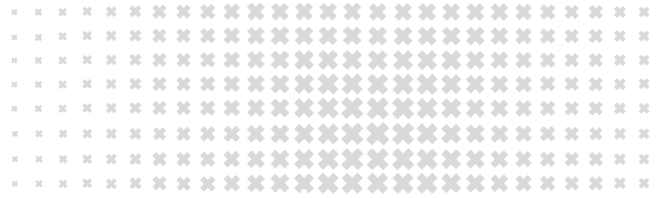
Een factor die in de natuur vaak een belangrijke rol speelt, is wind. In ons model kan de windsnelheid  $V$  aangepast worden, evenals de richting  $\theta$ , waarop we dus de brand op die manier beïnvloeden. Ook dit kan door de gebruiker zelf aangepast worden. Deze factoren noemen we  $p_w$  (w van wind), en zitten tussen de 0 en  $\infty$ . We bepalen nu  $p_w$  als volgt [Freire and DaCamara, 2019]:

$$p_w = e^{V(c_1 + c_2(\cos(\text{wind\_dir}) - 1))},$$

waar  $\text{wind\_dir}$  staat voor de richting van wind. De coëfficiënten  $c_1, c_2$  kunnen vrij gekozen worden, maar zijn standaard  $c_1 = 0.045$  en  $c_2 = 0.131$  [Freire and DaCamara, 2019].

Hiervoor geldt dat de wind bij  $\theta = 0$  naar *rechts* gaat. Dit komt overeen met de structuur van de eenheidscirkel. Zie hiervoor figuur 4.

Daarnaast zijn sommige bomen meer vatbaar voor vlammen dan andere, en ook dit kan de gebruiker instellen voor een grid. Het type boom in een bos kan de gebruiker dus ook bepalen.



Figuur 1: Hier zien we wat de hoek  $\theta$  voorstelt.

De factor die bij elk het type boom hoort, noemen we  $\rho_{\text{veg}} \in [-1, \infty)$ , hoewel het vaak in  $[-1, 1]$  zit; de veg staat voor vegetatie hier. Gemiddeld gezien heeft een bos een vegetatie van 0.4.

In de analoog van Game of Life, zou gekeken kunnen worden naar het aantal brandende bomen om een gezonde of droge boom heen, en aan de hand daarvan bepalen of deze boom in de brand staat daarna of niet. Dit kan echter realistischer. Om iets anders te doen dan de standaardopdracht, en er iets meer bijzonders van te maken, hebben wij besloten het andersom te bekijken: elke brandende boom heeft een kans een aangrenzende boom in brand te zetten, en als dit niet plaatsvindt, het droog te maken, als het dat al niet was. De kans dat een brandende boom een gezonde boom in brand zet, noemen we  $p_{\text{burn}}$ . Als we geen rekening houden met wind en gemiddelde vegetatie en dichtheid aannemen, definiëren we de kans op het verkrijgen van een brandende boom in onze simulatie als  $p_0$ . Deze waarde, evenals de eerdergenoemde waarden, kunnen op eenvoudige wijze veranderd worden in de code en/of de GUI. In het algemene geval moeten we wel rekening houden met de vegetatie en dichtheid, en krijgen we

$$p_{\text{burn}} = p_0(1 + \rho_{\text{den}})(1 + \rho_{\text{veg}})p_w. \quad (1)$$

We weten kunnen met behulp van deze theorie nu theoretisch afleiden wat de kans is dat een boom in de fik vliegt als we geen rekening houden met de wind. Er geldt dan

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\text{brand}) &= 1 - \mathbb{P}(\text{geen brand}) \\ &= 1 - \prod_{\text{cyc}} \mathbb{P}(\text{geen brand door buur } k) \\ &= 1 - \prod_{\text{cyc}} (1 - \mathbb{P}(\text{brand door buur } k)) \\ &= 1 - (1 - \mathbb{P}(\text{brand door buur } k))^8 \\ &= 1 - (1 - p_{\text{burn}})^8. \end{aligned}$$



Houden we echter wel rekening met de wind, moeten we het product nemen, waar we elke buur apart beschouwen, omdat de wind niet per se dezelfde invloed heeft voor alle burens.

Om te zien wanneer een bosbrand ‘afgelopen’ is, kijken we wanneer geen een cel de staat ‘Brandend’ heeft. Om dit efficiënt te doen, houden we elke ronde een boolean bij die in het begin *onwaar* is. Bij het updaten van alle cellen, veranderen we deze boolean in *waar* als een cel brandend is. Hierdoor weten we wanneer, en of, er iets brandends is.

### 3 Fitten van de modelparameters

Aangezien de gebruiker zelf de parameters kan instellen, simuleren we niet altijd de realiteit. In deze sectie proberen wij de waarden van de parameters te vinden die de realiteit juist wel goed weergeven. Wij gebruiken hiervoor een grid van 50 bij 50 cellen.

Wij hebben in de vorige sectie ons model uitgelegd, samen met de mogelijke waarden ervoor en waarden die redelijk standaard zijn, waarvan we een paar hebben gehaald uit [Freire and DaCamara, 2019]. Deze zijn gebaseerd op een bepaalde, niet-uitzonderlijke bosbrand in de geschiedenis.

Een andere factor is de dichtheid van bomen in een bos. Als er geen bomen zijn, is het overigens überhaupt geen bos, maar een dichtheid van 100% bomen in een bos gebeurt niet vaak in het echt, maar is zeker mogelijk. Immers, als we met luchtbeelden naar bossen kijken, lijkt soms 100% van het oppervlak groen. Dat niet 100% van het volume ook echt boom is, houden we rekening mee via  $\rho_{\text{den}}$ , want dat is natuurlijk niet realistisch.

Omdat we een realistische schatting moeten maken voor een parameters, kiezen wij ervoor om nu  $p_0$  erg goed te schatten met goedgefundeerde aannames en de andere, redelijk standaard parameters uit de bron [Freire and DaCamara, 2019] te halen. We doen dit aan de hand van bosbranden in Peru, om iets niet-typisch te onderzoeken. Hiervoor gebruiken wij verschillende bronnen. In [Earth Observatory, ] vinden we dat in zo’n 11 gebieden 2668 hectare is afgebrand. Per gebied is dit 2668/11 hectare, oftewel  $(2668/100)/11 \approx 2.425 \text{ km}^2$ , als we een homogene verdeling aannemen. Omdat we aannames moeten doen, bekijken we een gebied van 2 bij 2 km. Uiteraard kan dit ook anders gekozen worden (de  $p_0$  is immers afhankelijk van het gebied dat we kiezen). Omdat dit ons een gebied van 4  $\text{km}^2$  geeft, is er ongeveer 60.63% afgebrand.

Wij nemen aan dat de wind in alle richtingen elkaar opheft. Hoewel dit in eerste instantie niet realistisch lijkt, bekijken we in dit experiment een periode van 2 maanden, en gemiddeld gezien is het dan wel een legitieme afschatting. In [Earth Observatory, ] staat dat dit bovenstaande gebied is afgebrand in het jaar 2016, maar volgens [Commission, ] is het vuur voornamelijk in 2 maanden te vinden (1 jan - 1 maart), namelijk het ‘fire season’, dus nemen we de aanname dat (bijna) alle significante vuren in die periode waren. Wij hebben geen data gevonden die meer specifieke data geven. Deze periode omvat zo’n 60 dagen, en dit gedeeld door 2 wordt ook het aantal stappen in onze simulatie: 30 (omdat elk tijdstapje in de simulatie voor 2 dagen staat, hoewel dit ook anders gekozen kan worden). Omdat Peru erg dichtbebost is, nemen we aan dat de dichtheid van bomen in het bos 100% is; dat wil zeggen dat we op luchtfoto’s geen open, boomloze stukken zien, en dat  $p_{\text{veg}} = 0.4$ , zoals gebruikelijk is voor bossen.

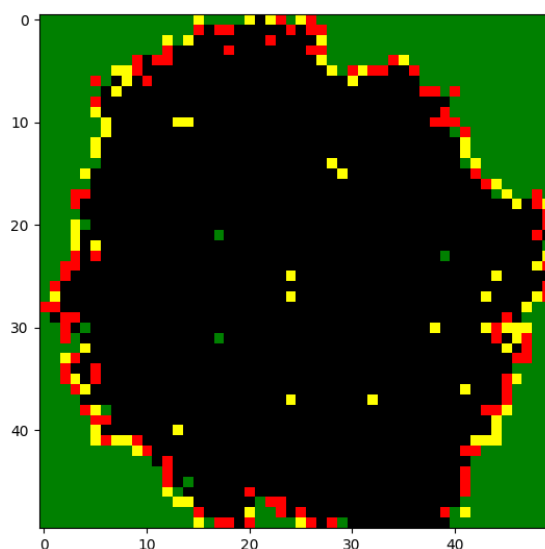
We gebruiken nu een variant van binary search (BS) om de beste  $p_0$  te vinden. Dit definiëren wij als het getal zodanig dat deze factor (oftewel  $100p_0$  is het percentage) een percentage van 60.63% afgebrand bos geeft. We weten in eerste instantie dat  $p_0 \in [0, 1]$ , en we nemen nu 11 equidistante punten in dit interval en berekenen voor elk punt hoeveel procent afgebrand bos het geeft, gemiddeld over 25 simulaties. We hebben dit aantal gekozen om zo accuraat mogelijke data te krijgen, dus middelen we errors zoveel mogelijk weg. Het aantal simulaties per interval noemen wij  $N$ , en het aantal equidistante punten is voor elk interval 11 bij onze binary search. Dit herhalen geeft ons tabel 1. In de laatste diepte, 5, zien we dat  $p_0 \approx 0.225$ , aangezien bij



$p_0 = 0.220$  een percentage van 57.276% is verbrand, terwijl wij  $p_0 = 0.230$  een percentage van 62.068% is verbrand. Bij  $p_0 = 0.225$  precies 60.110% is verbrand. We zien dus dat  $p_0 \approx 0.225$ . De datasets hiervan kunnen bij ons worden opgevraagd, aangezien het te veel is om in dit verslag te zetten, maar ze zijn wel beschikbaar op aanvraag.

Voor de volledigheid, hebben wij een plot gemaakt voor  $p_0 = 0.225$  die laat zien dat ongeveer 60% is afgebrand na 30 dagen. Dit is te zien in figuur 2. Hoewel er nog een paar kleine brandjes zijn, is dit niet erg voor ons onderzoek. Wij keken immers naar de staat van het bos na 2 maanden, en niet per se naar de eindstaat. Het zou dus niet legitiem zijn om deze twee dingen wel te vergelijken. Onze simulatie komt overigens wel in een stabiele staat, waarmee we de realiteit dus redelijk goed hebben kunnen simuleren. Immers, niet *alle* bomen verdwijnen in een bosbrand, maar wel het overgrote deel. Om aan te tonen dat dit overeenkomt met de eindstaten van onze simulaties hebben wij een eindstaat van een willekeurige simulatie met dezelfde aannames e.d. ook toegevoegd. Dit is te zien in figuur 3.

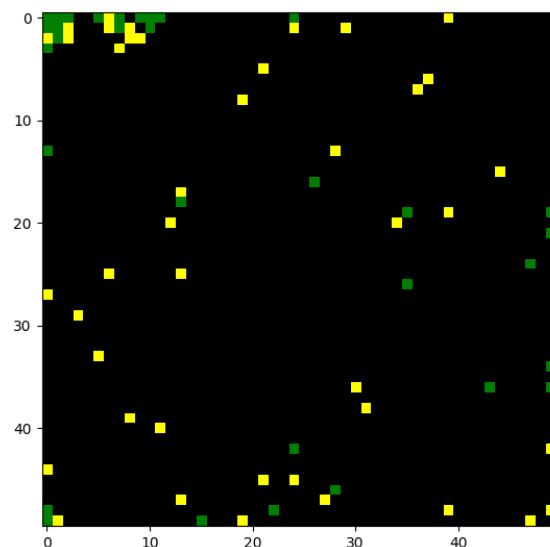
Hiermee is aangetoond dat  $p_0 = 0.225$  een accurate schatting is in dit geval. De andere parameters voor de realiteit nemen wij aan uit de bovengenoemde bronnen, of hebben we in deze sectie al aangegeven.



Figuur 2: In dit figuur is te zien dat ongeveer 60% van het bos is afgebrand na 30 dagen, zoals verwacht werd bij onze  $p_0 = 0.225$ .

BS. diepte	Interval	N
1	[0, 1]	25
2	[0, 0.5]	25
3	[0.2, 0.3]	25
4	[0.2, 0.25]	100
5	[0.215, 0.235]	200

Tabel 1: In deze tabel zien we voor welke iteratiediepte (BS diepte) in welk interval onze  $p_0$  ligt. N is het aantal simulaties hier.



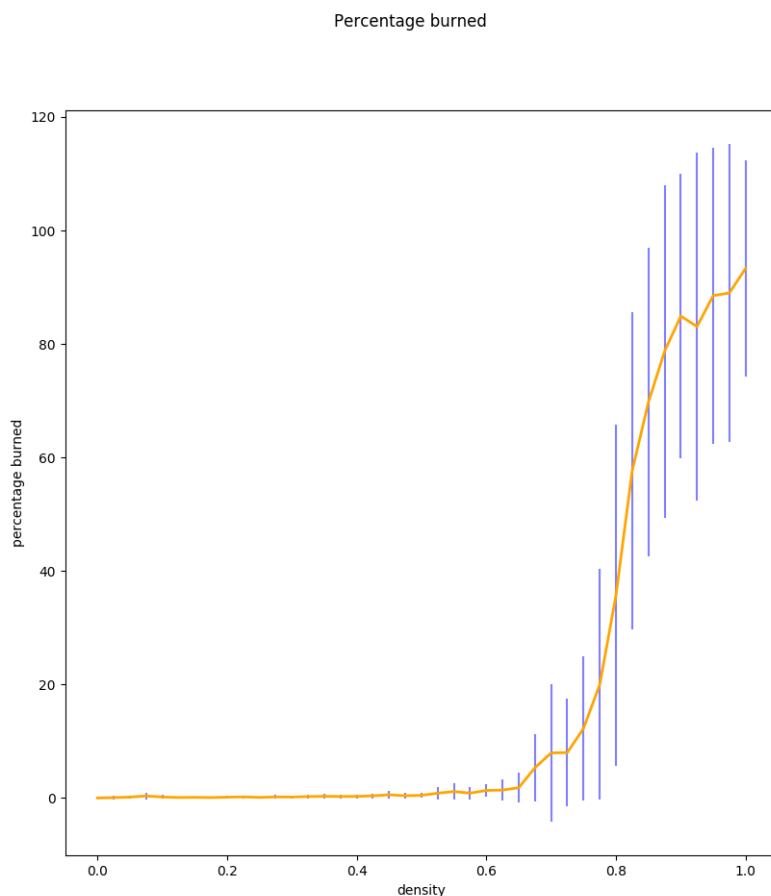
Figuur 3: Hierin is de eindstaat te zien van een van onze simulaties. We zien dat niet het hele bos is verbrand, maar wel een groot deel, hetgeen overeenkomt met de realiteit.

## 4 Experimenten en analyses

In de vorige sectie hebben wij  $p_0$  bepaald, evenals de waarden van andere parameters die van toepassing zijn (via betrouwbare bronnen). Met dit model gaan we nu enkele experimenten uitvoeren. Ten eerste kunnen we de dichtheid van bomen uitzetten tegen het percentage bos dat verbrand is. Hierbij nemen we de parameters aan die we in de vorige sectie gevonden hebben. We hebben hiervoor een script gemaakt die de resultaten genereert. In figuur 4 zien we het resultaat. We zien dat de kritieke waarde hier rond 0.8 ligt voor de dichtheid. Dit is ook logisch, aangezien het vuur zich minder kan verspreiden bij bijvoorbeeld 30% bebossing, en bij bijvoorbeeld 90% bebossing, verspreidt het vuur zich heel makkelijk en is bijna 100% verbrand. Merk op dat dit ook het geval is in de plot. Natuurlijk geldt dit resultaat wel alleen voor onze combinatie van  $p_0$  en andere aannames.

Een ander interessante relatie om te onderzoeken is die tussen de  $p_{\text{den}}$  en het percentage van het bos dat verbrand is. Nu kijken we dus niet naar de dichtheid van de bomen in het bos, maar kijken we naar hoe dicht de bomen aan sich zijn. Een grote boom met heel veel bladeren heeft bijvoorbeeld een hogere  $p_{\text{den}}$  dan een kleine, kale boom. Ook hier gebruiken we het script. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 5. We zien hier weer een logistisch verband, en weer een kritieke waarde. Deze waarde ligt bij  $p_{\text{den}} = -0.15$  ongeveer. Ook dit is logisch, aangezien het vuur moeilijk kan verspreiden bij veel lagere waarden, en het daarna juist makkelijker gaat. Immers, bij  $p_{\text{den}} = 0$  ligt de waarde voor een gemiddeld bos, waar het vuur zich relatief makkelijk verspreid. We zien dus dat deze kritieke waarde ook een logische waarde heeft.

Daarnaast is het ook interessant op de vegetatie(dichtheid) t.o.v. het percentage bos dat verbrand wordt. Sommige typen bomen zijn meer vatbaar voor vlammen dan andere. We verwachten dan ook een positief verband: hoe hoger  $p_{\text{veg}}$ , hoe hoger het percentage. In figuur 6 is het verband geplot. We zien inderdaad een positief verband, dus dat komt overeen met onze verwachtingen. Als  $p_{\text{veg}}$  klein is, is het erg stug materiaal waardoor de brand zich moet verspreiden, en dat gaat erg lastig dan. Hierom verwachten we dan dat het percentage verbrand

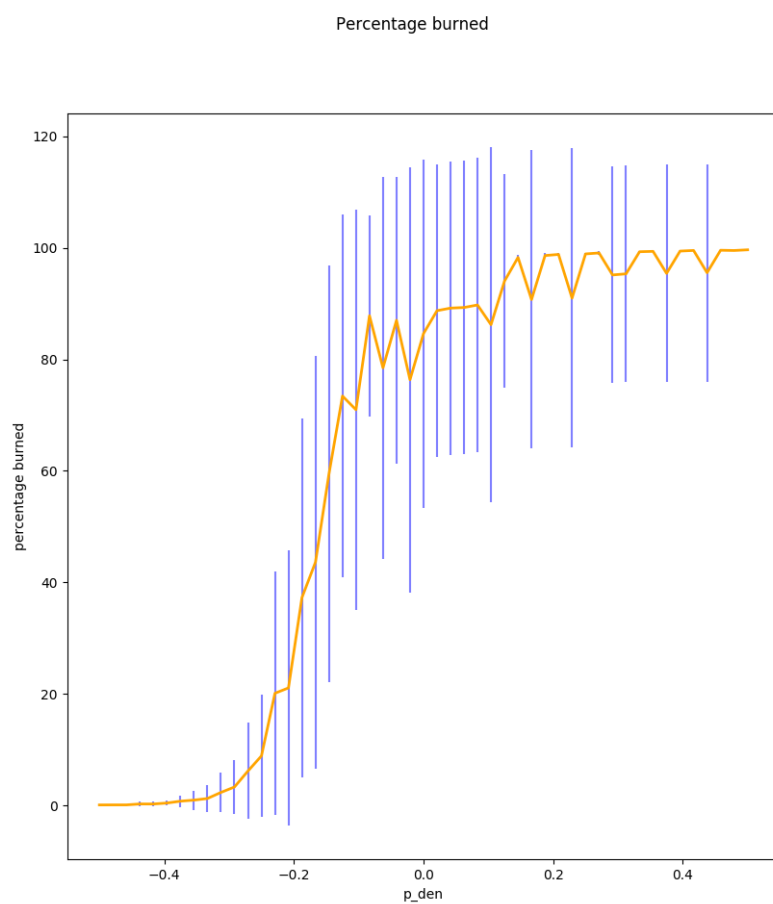


Figuur 4: Hieruit is het percentage bos dat verbrand is uitgezet tegen de dichtheid van bomen in het bos. Bij ongeveer 0.8 (dus 80% is bomen) zien we de kritieke waarde voor de dichtheid.

bos aan het eind ook klein is. Dit is ook het geval, zoals in figuur 6 gezien kan worden. Echter, als  $p_{\text{veg}}$  groot is, dan kan het vuur zich erg makkelijk overgedragen worden, en dit komt overeen met het resultaat dat we zien in figuur 6.

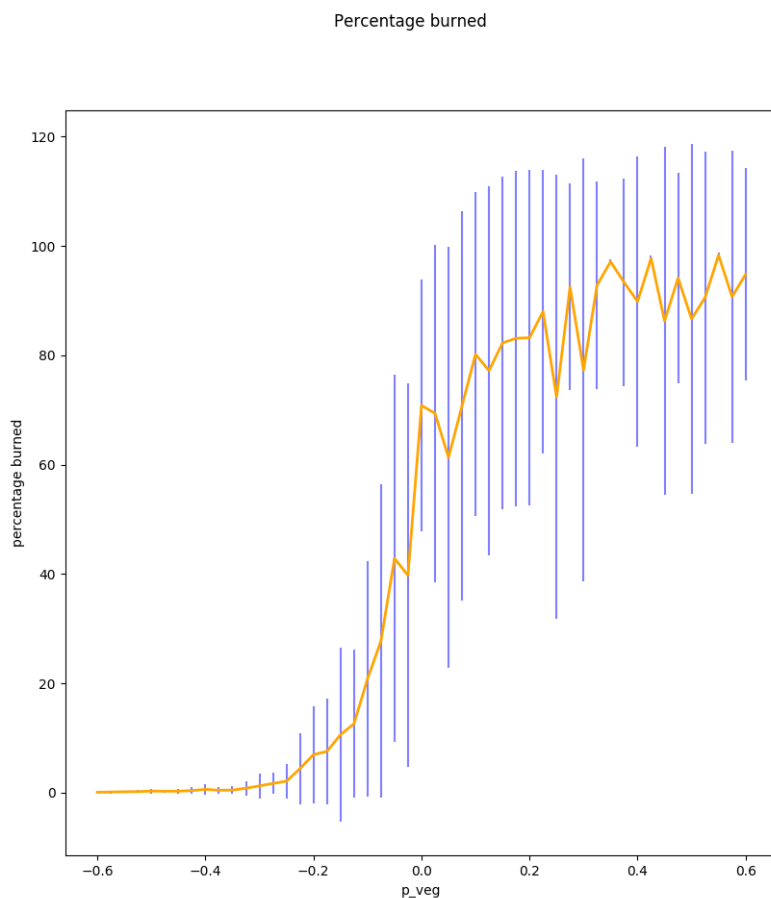
Weer zien we een logistische groei, met nu een kritieke waarde bij  $p_{\text{veg}} = 0$ . Aangezien  $p_{\text{veg}} = 0.4$  voor een gemiddeld bos, waarin vuur zich goed kan verspreiden, ligt dit kritieke punt ook op een logische plek. Even voor deze standaardwaarde ligt immers een punt waar de omslag wordt gemaakt van het amper naar snel verspreiden van brand.

In alle gevallen zien we dat het figuur lijkt op een logistische kromme (Engels: generalised logistic function). Een logistisch verband, hetgeen vaak natuurverschijnselen goed modelleert, is in die zin wel verwacht, maar niettemin is het een mooi, opmerkelijk resultaat. Hierom is dit met relatief grote zekerheid een goed beeld van de realiteit.



Figuur 5: Hier zien we het percentage verbrand bos uitgezet tegen de dichtheid van de bomen an sich. We zien weer een logistisch verband.





Figuur 6: In dit figuur zien we  $p_{veg}$  uitgezet tegen het percentage bos dat is verbrand, waarbij we een kritieke waarde vinden bij  $p_{veg} = 0$ , hetgeen ook een logische waarde is.

## 5 Conclusie en discussie

In dit onderzoek hebben we gezien dat het simuleren van bosbranden zeker mogelijk is, waarbij rekening gehouden kan worden met veel verschillende factoren. Dit houdt onder andere de vegetatie(dichtheid), dichtheid van bomen in hun ‘cel’ (gezien als volume), dichtheid van bomen in het bos (gezien als oppervlakte) en de windsnelheid en -richting in, naast de andere parameters die we hebben gebruikt.

In het fitten van parameters kwamen we erachter dat  $p_0 = 0.225$  voor ons model. Dit kan per gebied erg verschillen, omdat onder andere de windstromen erg kunnen verschillen per gebied. Voor dit gebied denken wij echter dat het wel een acceptabele schatting is.

In onze experimenten hebben we gezien dat we realistische, logische waarden hebben gekregen. Dit is zoals we hadden verwacht en zijn we dus ook blij mee dat dit een accuraat, verwacht resultaat geeft. Als verbeterpunt voor vervolgonderzoek zou het percentage verbrand bos op meer punten van dichtheid berekend kunnen worden.



Er zijn overigens nog veel meer parameters mogelijk. Dit zijn bijvoorbeeld de hoogtes van de bomen, aangezien sommige bossen erg groot zijn, en dus een kant significant hoger kan liggen dan een andere kant. Daarnaast kunnen de parameters accurater onderzocht worden, alleen was daar in dit onderzoek geen tijd voor, aangezien er maar een week de tijd was voor alles. We hebben echter wel iets origineels geprobeerd te doen en meerdere dingen te onderzoeken, na een zoektocht naar goede data.

In onze simulatie kan zowel de windrichting als -snelheid worden meegegeven, alleen is de wind homogeen verdeeld vanaf dat moment. Voor een realistisch model hebben we partiële differentiaalvergelijkingen nodig, waaronder de *Navier-Stokesvergelijking*. Daarnaast kan de verspreiding van brand natuurlijk enorm verschillen per dag, waardoor een homogene verspreiding van brand niet altijd aannemelijk is. De bovenstaande factoren kunnen echter wel afgeschat worden op zo'n manier dat we een basale simulatie krijgen, zoals wij ook hebben gedaan. Dit gaf realistische kritieke waarden bij onze experimenten, alleen wordt de betrouwbaarheid groter bij een realistischer model.

Ondanks het feit dat de realiteit veel ingewikkelder is dan in onze simulatie wordt aangenomen, hebben we de parameters goed kunnen afschatten en afstellen. Met dit model hebben we nu goed verklaarbare figuren en andere resultaten gekregen. Het is dus inderdaad zeker mogelijk om de realiteit goed te benaderen, alleen wordt de onzekerheid kleiner als er nog meer parameters in beschouwing worden genomen. Dit is dus een aanrader voor vervolgonderzoek.

## Referenties

- [Alexandridis et al., 2008] Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C. I., and Bafas, G. V. (2008). A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through spetses island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, 204(1):191–201.
- [Boyчук et al., 2007] Boychuk, D., Braun, W. J., Kulperger, R. J., Krougly, Z. L., and Stanford, D. A. (2007). A stochastic model for forest fire growth. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 45(1):9–16.
- [Commission, ] Commission, E. Global wildfire information system.
- [Cruz and Alexander, 2019] Cruz, M. G. and Alexander, M. E. (2019). The 10% wind speed rule of thumb for estimating a wildfire's forward rate of spread in forests and shrublands. *Annals of Forest Science*, 76(2):44.
- [Earth Observatory, ] Earth Observatory, N. Finding fires in peru.
- [Freire and DaCamara, 2019] Freire, J. G. and DaCamara, C. C. (2019). Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire management. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 19(1).