

Simulación de fuegos en bosques procedurales utilizando autómatas celulares

Alejandro Sayáns Silva, Luis Gallego Ledesma

1. Introducción

Los fuegos forestales tienen un gran impacto en el ecosistema de los bosques así como en la salud pública y de la propiedad de las personas. Por este motivo se han realizado gran cantidad de estudios con la intención de predecir su comportamiento, muchos de los cuales utilizan autómatas celulares para la predicción de la propagación del fuego. Esto es debido a que los autómatas celulares son simples modelos de computación para sistemas discretos capaces de simular comportamientos complejos. Específicamente, estos modelos son útiles para simular sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúen localmente unos con otros.

En este trabajo, mediante el uso de autómatas celulares, se pretende simular el comportamiento de un incendio forestal. Se utilizarán estudios previos sobre la propagación de incendios en diferentes condiciones de viento, topografía del terreno y densidad y tipo de vegetación.

2. Desarrollo teórico

Este desarrollo se centra en el cálculo de la probabilidad de que una celda incendiada propague el fuego a sus celdas vecinas dependiendo de determinadas condiciones. A continuación, se profundiza en cada una de ellas y en el cálculo de las probabilidades asociadas.

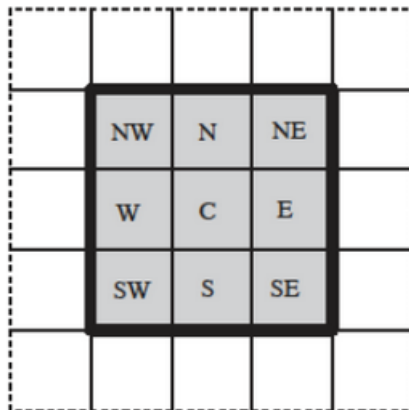


Figura 1: Vecindad de Moore

El bosque está representado por una cuadrícula de tamaño 100x80 celdas. Para cada celda se definen las adyacentes como las que componen la vecindad de Moore [1](#). Cada celda está caracterizada por 4 posibles estados: vegetación (baja, normal o densa), ardiendo, quemada o agua. El modelo tiene 4 posibles reglas de evolución, las cuales tienen en consideración la velocidad y dirección del viento, la topografía, la densidad de la vegetación y el tipo de esta.

Estas reglas son aplicadas en cada paso para cada una de las celdas:

- Regla 1. Una celda que no puede arder, no cambia nunca de estado.
- Regla 2. Una celda que está ardiendo, pasará a estado “quemada” en el siguiente paso.
- Regla 3. Una celda ardiendo o quemada no puede volver a arder.

- Regla 4. Si una celda está ardiendo y tiene celdas vecinas en estado “vegetación”, el fuego de esta puede propagarse a las adyacentes con probabilidad p_{burn} .

La formulación básica de p_{burn} depende de:

- 1) La probabilidad de que una celda adyacente a una ardiendo arda sin tener en cuenta ninguna otra condición, p_0 .
- 2) El tipo de vegetación, p_{veg} y su densidad p_{den} .
- 3) La topografía, p_s
- 4) Las condiciones del viento, p_w

El cálculo de esta probabilidad es el siguiente:

$$p_{burn} = p_0(1 + p_{veg})(1 + p_{den})p_w p_s$$

Sin embargo, en nuestro caso, tras experimentar, decidimos suprimir la probabilidad asociada al tipo de vegetación p_{veg} ya que siempre se trata de un bosque, y los resultados son visualmente más intuitivos e ilustrativos al no tenerla en cuenta. Por tanto, p_{burn} quedaría como sigue:

$$p_{burn} = p_0(1 + p_{den})p_w p_s$$

Las probabilidades asociadas a la densidad son las siguientes:

categoría	p_{den}
sin vegetación	-1
baja	-0.3
normal	0
densa	0.3

El efecto del viento está modelado de la siguiente manera:

$$p_w = \exp[V(c_1 + c_2(\cos(\theta) - 1))],$$

donde c_1 y c_2 son coeficientes ajustables, V es la velocidad del viento medida en m/s y θ es el ángulo entre la dirección del viento y la dirección de propagación del fuego. Cuando ambas direcciones están alineadas, por tanto, es cuando mayor será la probabilidad de propagación.

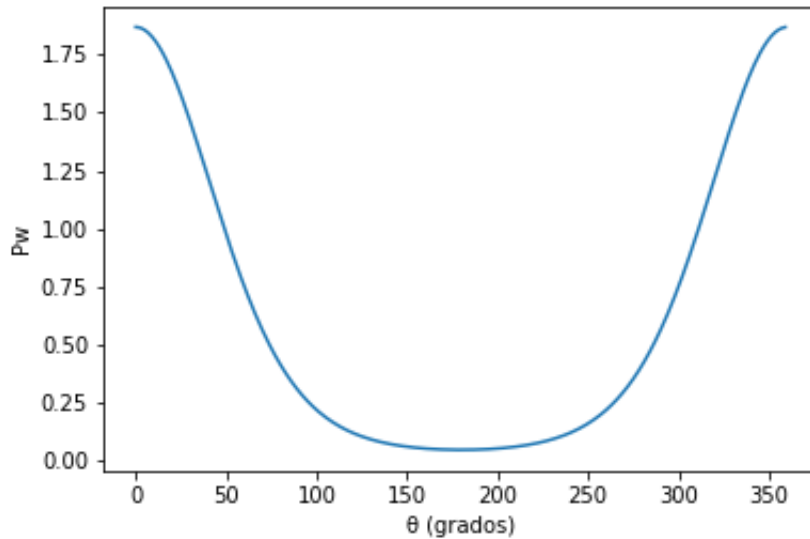


Figura 2: Efecto del ángulo θ en la probabilidad del viento p_w

La probabilidad asociada a la topografía del terreno es la siguiente:

$$p_s = \exp(a_s \theta_s),$$

donde θ_s es el ángulo de inclinación del terreno y a_s es un coeficiente ajustable. θ_s es calculado basándonos en los datos de la elevación del terreno, E :

$$\theta_s = \text{atan}[(E_1 - E_2)/D],$$

donde D es igual al tamaño del lado L de la celda cuando dos celdas son adyacentes o $\sqrt{2}L$ cuando están en diagonal. De este modo, la propagación del fuego será mayor cuando suceda en sentido ascendente (de menor a mayor altitud).

	valor
p_0	0.58
a_s	10
c_1	0.045
c_2	0.131

Cuadro 1: Valores obtenidos mediante experimentación

3. Descripción de la aplicación

En cuanto a la implementación de la aplicación, se ha utilizado Javascript y, específicamente, la librería de código abierto [p5.js](#), muy útil para dibujar en una página web HTML.

3.1. Generación procedural de las alturas

En un principio se consideró la opción de generar un mapa realista, utilizando la API de Google Maps, y obteniendo, con esta, las alturas y densidades de vegetación reales del terreno. Sin embargo, esta idea, aunque muy interesante, requería demasiado tiempo para su implementación y ciertos recursos eran únicamente de pago, por lo que finalmente se optó por generar proceduralmente un mapa de alturas utilizando el Ruido Perlin [6].

Este procedimiento es muy conocido y utilizado en el ámbito de la computación gráfica, ya que permite generar mapas (de cualquier número de dimensiones) de una manera pseudo-aleatoria en la que se mantiene un aspecto más realista que con el resto de funciones similares, ya que la diferencia de valores entre dos celdas adyacentes está limitado.

Similar al concepto de armónicas en física, el ruido es calculado a lo largo de varias octavas. Las octavas más graves contribuyen de forma más significativa a la señal de salida y como define la intensidad general del ruido, mientras que las octavas más altas crean detalles más finos en la secuencia de ruido. En nuestro caso, este cálculo se realiza a lo largo de 4 octavas con cada octava contribuyendo exactamente la mitad que su predecesora, partiendo con una intensidad de 50 % para la primera octava.

3.2. Generación del bosque

El mapa de alturas generado es utilizado, además de en los cálculos de probabilidades comentados en la sección 2, para la generación del bosque. Para ello, se toma la altura de cada celda y se comprueba en que rango se encuentra para, de esta manera, asignarle el tipo correspondiente:

ruido perlin	tipo celda
≤ 0.2	agua
$0.2 < x \leq 0.3$	densa
$0.3 < x \leq 0.6$	normal
> 0.6	baja

De esta manera se consigue una mayor similitud con un terreno real, en el que, según aumenta la altitud, descende la densidad de la vegetación. Además, en este caso, se permite que en las

altitudes más bajas se generen celdas de agua, formando pequeños lagos. Las diferentes densidades de la vegetación son representadas en el bosque por tres tonos de verdes, de más claro a más oscuro, dependiendo de si la densidad es más o menos baja, respectivamente.

3.3. Manual de usuario

Al tratarse de una aplicación web, simplemente debemos abrir el archivo **index.html** con cualquier navegador. Una vez abierta la aplicación nos encontramos con 3 partes diferenciales:

1. **Representación gráfica del bosque:** Podremos visualizar la simulación en tiempo real en forma de una cuadrícula de 100x80 celdas.

Inicialmente, cada una de estas celdas tiene un color según el tipo de vegetación que representa: a más oscuro es el tono de verde mayor es la densidad de vegetación. La excepción serán las celdas que contienen agua, se verán en azul.

Cuando el usuario hace click en cualquier celda con vegetación, esta comienza a arder y, si la simulación no está pausada, el fuego podrá propagarse (o extinguirse).

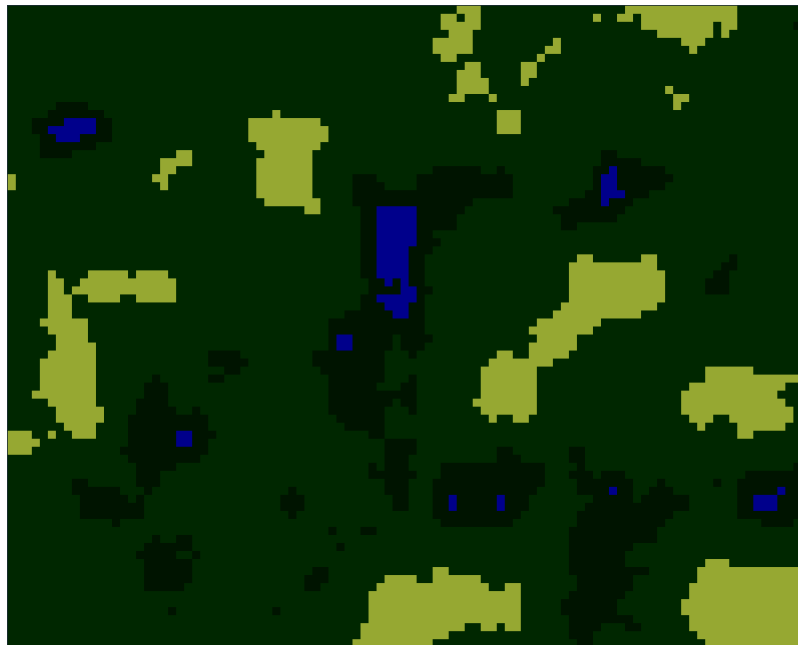


Figura 3: Representación gráfica del bosque

El fuego se representa en rojo y la zona ya quemada en gris.

2. **Mapa de alturas:** Proporciona información al usuario sobre la topografía del terreno. Esta información es importante debido a la gran influencia de la pendiente en la propagación del fuego. La leyenda indica el umbral de cada color según la elevación del terreno, en metros.
3. **Panel de opciones:** En este panel el usuario puede alterar la configuración de la simulación en tiempo real:
 - Selección de una de las ocho direcciones del viento: direcciones cardinales e intercardinales.
 - Selección de la velocidad del viento en un rango comprendido entre 0 y 50 km/h.
 - Selección de la velocidad de la simulación en un rango de entre 1 y 20 fotogramas, o pasos, por segundo.
 - Activación/desactivación de la influencia de la topografía del terreno en la simulación.
 - Activación/desactivación de la influencia de la densidad del terreno en la simulación.

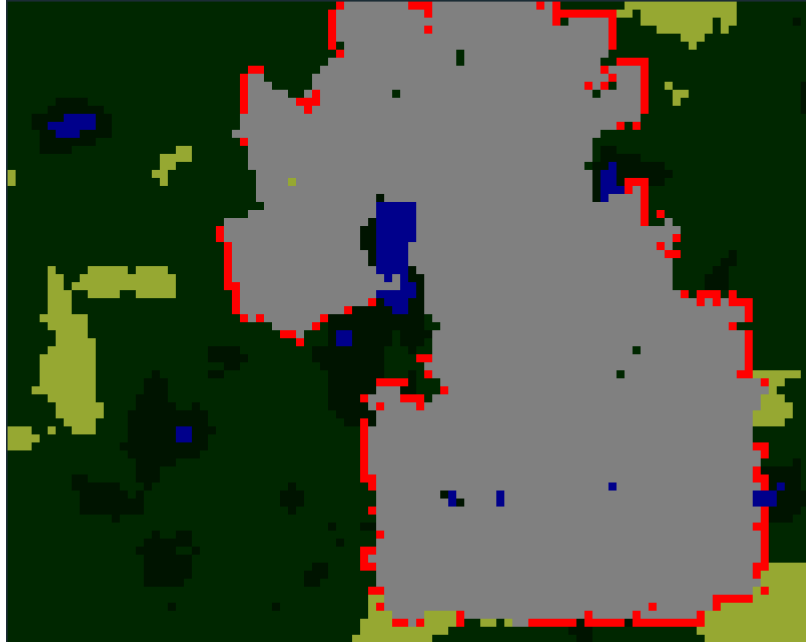


Figura 4: Representación gráfica del bosque (ardiendo)

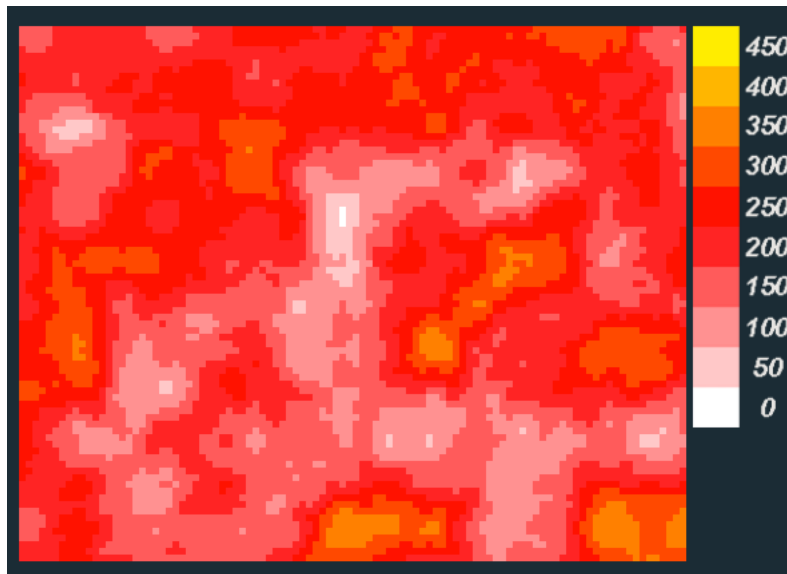


Figura 5: Mapa de alturas

- El botón “Generate new map” genera de forma procedural un nuevo bosque con su correspondiente mapa de alturas, y reinicia la simulación, manteniendo el valor de todos los ajustes.
- Finalmente, existen 3 botones que controlan la temporalidad de la simulación. De izquierda a derecha:
 - El primero de ellos reinicia la simulación, manteniendo el mismo bosque y mapa de alturas.
 - El segundo pausa o retoma la simulación. Cabe destacar que es posible prender fuego a las celdas con vegetación mientras que la simulación está pausada.
 - El último de los botones, en caso de que la simulación esté pausada, permite avanzar un fotograma.

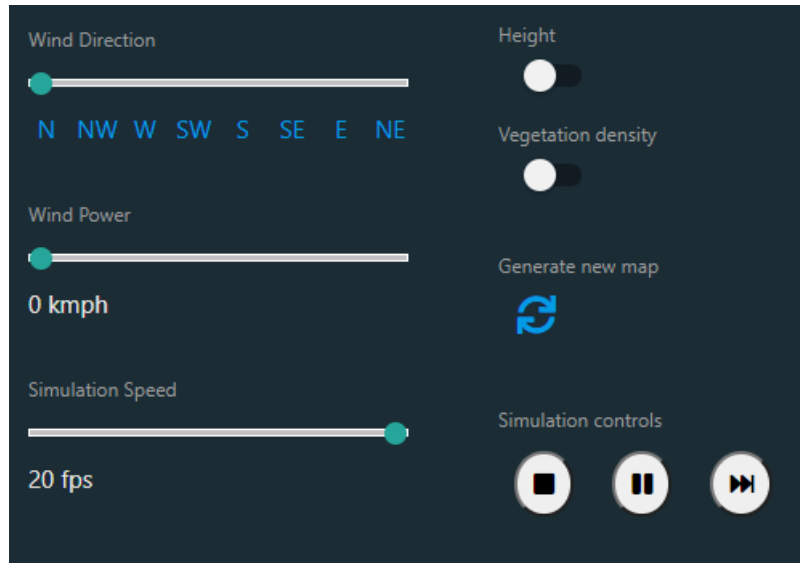


Figura 6: Panel de opciones

Referencias

- [1] Joana G. Freire, Carlos C. DaCamara, *Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire prevention and fighting*, Universidade de Lisboa, 2018.
- [2] Joseph Quartieri, Nikos E. Mastorakis, Gerardo Iannone, Claudio Guarnaccia, *A Cellular Automata Model for Fire Spreading Prediction*, University of Salerno, 2010.
- [3] A. Alexandridis, L. Russo, D. Vakalis, G. V. Bafas, C. I. Siettos, *Wildland fire spread modelling using cellular automata: evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics*, International Journal of Wildland Fire, 2011.
- [4] L. Hernández Encinas, S. Hoya White, A. Martín del Rey, G. Rodríguez Sánchez, *Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata*, Applied Mathematical Modelling, Volume 31, Issue 6, 2007, Pages 1213-1227, ISSN 0307-904X
- [5] A. Hernández Encinas, L. Hernández Encinas, S. Hoya White, A. Martín del Rey, G. Rodríguez Sánchez, *Simulation of forest fire fronts using cellular automata*, Advances in Engineering Software, Volume 38, Issue 6, 2007, Pages 372-378, ISSN 0965-9978
- [6] Perlin, Ken. *An image synthesizer*. ACM Siggraph Computer Graphics 19.3 (1985): 287-296.