



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

“MODELACION Y SIMULACION NUMERICA DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE UN AUTOMATA CELULAR NO ESTRUCTURADO”

Gerardo M. Ortigoza Capetillo

gortigoza@uv.mx

Facultad de Ingeniería Univesidad Veracruzana
Czda. Adolfo Ruiz Cortines s/n, Fracc. Costa Verde
Boca del Río, Veracruz, México.

Oscar Viveros Cancino

osviveros@uv.mx

Instituto de Ingeniería Univesidad Veracruzana
Av. S.S. Juan Pablo II s/n Zona Universitaria, Fracc. Costa Verde
Boca del Río, Veracruz, México.

Alberto Lorandi Medina

alorandi@uv.mx

Instituto de Ingeniería Univesidad Veracruzana
Av. S.S. Juan Pablo II s/n Zona Universitaria, Fracc. Costa Verde
Boca del Río, Veracruz, México.

Resumen

Este trabajo presenta los avances en la implementación del programa de cómputo **acfuegos**, un sistema de información en tiempo real que permitirá realizar simulaciones de futuros escenarios en incendios forestales, será de gran utilidad en la toma de decisiones permitiendo reducir los riesgos en situaciones de emergencia. Es deseable contar con una herramienta de simulación numérica para conocer los diferentes escenarios que se podrían presentar en incendios forestales en diversas regiones forestales del Estado de Veracruz; en la que se incorpore información geográfica forestal, temperatura, humedad relativa, así como elevación topográfica y dirección del viento. El método de autómatas celulares ya se ha empleado en otros países para simular incendios, sin embargo la originalidad de esta propuesta es que utiliza mallas triangulares no estructuradas (como las usadas en elemento finito) donde, además de obtener una aproximación más detallada de los dominios computacionales se reduce el sesgo producido por el uso de rejillas estructuradas.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

MODELING AND NUMERICAL SIMULATION OF FOREST FIRE USING A UNSTRUCTURED CELLULAR AUTOMATA

Gerardo M. Ortigoza Capetillo

gortigoza@uv.mx

Facultad de Ingeniería Univesidad Veracruzana
Czda. Adolfo Ruiz Cortines s/n, Fracc. Costa Verde
Boca del Río, Veracruz, México.

Oscar Viveros Cancino

osviveros@uv.mx

Instituto de Ingeniería Univesidad Veracruzana
Av. S.S. Juan Pablo II s/n Zona Universitaria, Fracc. Costa Verde
Boca del Río, Veracruz, México.

Alberto Lorandi Medina

alorandi@uv.mx

Instituto de Ingeniería Univesidad Veracruzana
Av. S.S. Juan Pablo II s/n Zona Universitaria, Fracc. Costa Verde
Boca del Río, Veracruz, México.

Abstract

In this work we present a advances of the development of the computer code **acfuegos**, a realtime information system capable of executing simulations to know future wildfire scenarios, useful in the decision making and allowing to reduce the risks in hazardous situations. It is desirable to count on a numerical simulation tool to know the different scenes that could be presented in wildfires in diverse forest areas of the State of Veracruz. It is mandatory to include geographical forest information, elevation maps, gradient/vector wind as well as temperature and humidity maps. The method of cellular automata has already been used in other countries to simulate wildland fires, nevertheless the originality of this proposal is the implementation of a cellular automata on an unstructured triangular mesh (like the ones used in the finite element method) where, besides obtaining a more accurate approximation of the computational domains, the bias induced by regular tessellated grids is reduced.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

INTRODUCCIÓN

La aplicación de la modelación matemática consiste básicamente en substituir el objeto de estudio por su representación matemática (modelo matemático) la cual, una vez resuelta mediante algoritmos numéricos, permite estudiar las cualidades del proceso original. Al trabajar con el modelo matemático y no con el objeto real, en forma relativamente rápida y a bajos costos, se pueden estudiar, analizar y pronosticar sus propiedades de estado.

En muchas ocasiones la modelación matemática va acompañada de la simulación numérica. Una *simulación numérica* es una recreación matemática de un proceso natural [3]. El campo de las simulaciones numéricas constituye un campo amplio de investigación interdisciplinar; algunas de sus ventajas son : posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente, capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o mas allá de sus condiciones limites, nivel detalle prácticamente ilimitado.

El estado de Veracruz esta dividido en 5 regiones forestales: Valle y Cofre de Perote, Parque Nacional Pico de Orizaba, Huayacocotla, Los Tuxtlas y Las Choapas- Uxpanapa, las cuales cuentan con una superficie total de 1,995,000 hectáreas. Dentro de estas regiones existen tres áreas naturales protegidas que son: La Región de Perote (11,700 has), Pico de Orizaba (19,750 has) y la Reserva de la Biosfera de los Tuxtlas (155,070 has), que hacen un total de 186,520 hectáreas protegidas. La entidad veracruzana por sus características fisiográficas y climatológicas, es susceptible a los incendios forestales, especialmente durante los meses de enero a junio de cada año, las medidas para prevenir, detectar, controlar y combatir estos siniestros, contribuyen a contener el deterioro del medio ambiente y de los recursos naturales, toda vez que se estima que un 48% de la deforestación en los bosques templados y un 13% de aquella que afecta a las selvas se deben principalmente a los Incendios Forestales.

En la Temporada de Incendios Forestales de 1998, Veracruz vivió una situación critica, debido a que las condiciones climáticas fueron adversas, durante la época invernal (1998 - 1999) se presentaron heladas severas sobre las partes altas de las regiones forestales arriba mencionadas, situación que originó que los pastos, cultivos y vegetación arbustiva se deshidrataran (se quemaron), debido a las bajas temperaturas, lo anterior se agravo durante los meses de marzo a junio de ese mismo año al registrarse temperaturas muy elevadas, situación que dio origen a 539 incendios con 9,690 hectáreas



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

afectadas. Durante 2010 se combatieron 200 incendios que afectaron mil 233 hectáreas. En 2011 se combatieron 400 incendios, en 2012 se tuvieron 128 incendios mientras que al cierre de la temporada de incendios 2013 se registraron 255.

Figura 1. Incendio forestal en la región del Valle de Perote



Causas de los incendios Forestales

En Veracruz un alto porcentaje de los incendios forestales obedecen a causas humanas, ya sea por accidente, negligencia o intencionalidad. Cerca del 49% de los Incendios forestales tienen su origen en el uso inadecuado del fuego con fines agrícolas o silvícolas, como sucede en muchos otros estados del país, donde la cultura campesina tradicional incluye prácticas ancestrales (roza-tumba-quema) de manejo del fuego, para limpiar las parcelas de malezas o de residuos agrícolas, y/o promover el rebrote de forrajes en áreas de pastoreo extensivo. En condiciones desfavorables estas prácticas pueden dar inicio a incendios forestales descontrolados. Las causas que provocan los incendios pueden ser muy variadas pero podemos mencionar la existencia de grandes masas de vegetación en concurrencia con periodos más o menos prolongados de sequía. El calor solar provoca deshidratación en las plantas, que recuperan el agua perdida del sustrato. Sin embargo, cuando la humedad del terreno desciende a un nivel inferior al 30% las plantas son incapaces de obtener agua del suelo, con lo que se van secando poco a poco. Este proceso provoca la emisión a la atmósfera de etileno, compuesto



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

químico presente en la vegetación y altamente combustible. Así se produce un doble fenómeno: las plantas y el aire que las rodea se vuelven fácilmente inflamables, con lo que el riesgo de incendio se incrementa. Y si a estas condiciones se suma la existencia de períodos de altas temperaturas y vientos fuertes o moderados, la posibilidad de que una simple chispa provoque un incendio se vuelve significativa [13].

Un incendio posee tres fases distintivas: iniciación, propagación y extinción.

- **Iniciación:** es el comienzo del incendio producido por causas naturales o mayoritariamente por la acción del hombre.
- **Propagación:** es la extensión del incendio por la vegetación cercana.
- **Extinción:** es la finalización del incendio por causas naturales (lluvia o falta de vegetación) o por acción humana (labores de extinción)

La propagación del fuego dependerá de las condiciones atmosféricas, de la topografía del lugar en el que se produzca y de la vegetación presente en el mismo. Normalmente se ocasionan en climas secos o subsecos, donde la vegetación sufre estrés hídrico y además algunas especies vegetales como los pinos contienen resinas que ayudan a que el incendio se propague mejor [9].



Figura 2. Zona de Estudio Parque Nacional Cofre de Perote



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
 Multidisciplinario
 10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
 ISBN: 978-607-95635

Existen diversos modelos de propagación de incendios los cuales pueden ser agrupados de acuerdo a sus metodologías [5],[6]; así tenemos:

- Empíricos (o estadísticos)
- Semi-empíricos (semi físicos o modelos de laboratorio)
- Físicos (teóricos o analíticos)

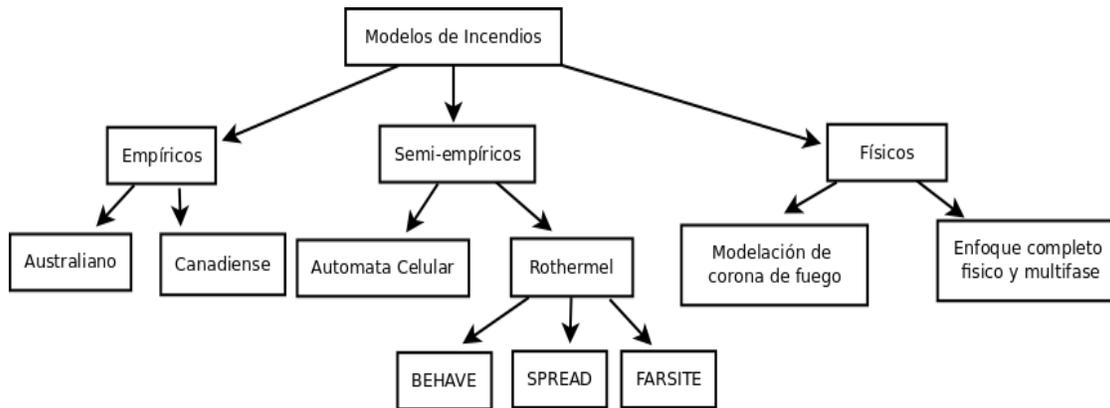


Figura 3. Modelos y programas de computo para simulación de incendios

Modelos empíricos (también llamados estadísticos o estocásticos) se usan para predecir el comportamiento más probable de los incendios a partir de condiciones promedio y conocimiento acumulado obtenido de experimentos de incendios en laboratorio o en campo [1]. Los dos modelos empíricos más usados son el australiano y el canadiense.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Los métodos semi-empíricos están basados en un balance global de energía así como en la suposición de que la energía transferida al combustible aun no quemado es proporcional a la energía liberada por la combustión del combustible. Varios términos del modelo deben ajustarse mediante resultados de incendios experimentales en laboratorio. BEHAVE es un sistema de pronóstico del comportamiento de fuegos y administración de combustibles. Crea tablas de comportamiento de fuegos en condiciones dadas por el usuario, consiste de subrutinas de pronóstico de comportamiento de fuegos para planeación en incendios y modelación de combustibles [2].

SPREAD es un código de computadora diseñado para simular el comportamiento de incendios forestales superficiales en terrenos heterogéneos. Calcula la forma y la evolución del área quemada, resultados locales tales como velocidad de propagación, longitud de la flama, intensidad de la línea de fuego, intensidad de reacción y tiempos locales de inicio y final de propagación. SPREAD esta basado en FIRE1 que proviene de BEHAVE, usa autómatas celulares para extenderse a terrenos y condiciones meteorológicas heterogéneas.

FARSITE es un modelo para simulación de crecimiento de incendios que usa información topográfica, combustibles, clima y archivos de datos de vientos. Incorpora modelos existentes tales como: incendios superficiales, corona de fuego, combustión pos frontal, y aceleración de fuego entre otros. Farsite usa la ecuación de Rothermel para el cálculo de la razón local de propagación de fuego y el principio de Huygens para modelar la forma del frente de fuego [11].

Los modelos basados en principios físicos tienen el potencial de predecir exactamente los parámetros de interés sobre un amplio rango de entradas [8]. En general, las ecuaciones obtenidas con estos modelos requieren un alto grado de precisión, y la mayoría de las veces agotan los recursos de espacio y tiempo de cómputo .

En [20] podemos encontrar una revisión de algunos de los modelos para predecir el comportamiento de incendios, así como en [21] se resumen algunas de las herramientas de cómputo más usadas para simular incendios.

Desde de los días de Von Neumann y Ulam quienes por primera vez propusieron el concepto de autómatas celulares (AC) hasta la reciente aparición de libro de Wolfram “A New Kind of Science” [15], la estructura sencilla de los autómatas celulares ha atraído a investigadores de muy diversas disciplinas. En los últimos 50 años, los autómatas celulares han sido sujetos a rigurosos análisis físicos y matemáticos y se han propuesto aplicaciones en diferentes ramas de la ciencia tanto física como social. Un autómatas celular es un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en pasos



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

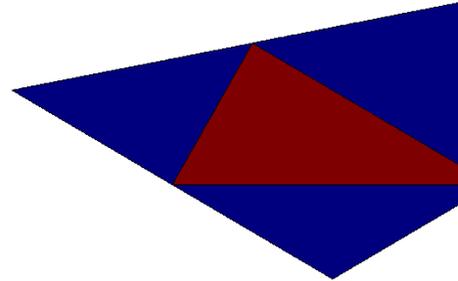
ISBN: 978-607-95635

discretos. Es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúen *localmente* unos con otros.

La popularidad de los autómatas celulares se debe a su simplicidad así como al enorme potencial que poseen para modelar sistemas complejos muy a pesar de ser modelos matemáticos simples. Los AC tienen aplicaciones que abarcan aspectos de la ciencia tan diversos como: mecánica de fluidos, medio ambiente: polución, incendios forestales; sistemas biológicos: evolución de las especies, crecimiento de poblaciones, comportamiento de colonias de microorganismos, sistemas inmunes, vida artificial; modelos socio-económicos, urbanismo, tráfico, procesos económicos, modelos de reacciones químicas, patrones de pigmentación de piel, construcción de fractales, criptología, entre otros, [17],[18],[19].

Figura 4. Vecindades de Neumann, normal y extendida.

El método de autómatas celulares ya ha sido usado para simular y predecir la evolución del frente de fuego en incendios forestales. En [7],[14],[16],[23],[24],[25],[26] el método de autómatas celulares fue implementado en mallas rectangulares, mientras que en [27] en mallas hexagonales. Una desventaja del uso de mallas regulares es la anisotropía que induce la malla y la elección de las vecindades, [22].



En este modelo se asume que el polígono de estudio (área Parque Cofre de Perote) es dividido en triángulos [12], cada uno representando una celda. Se asumen 4 estados: no combustible, combustible, quemándose y calcinado.

Se identifican dos probabilidades p_i, p_q de ignición y calcinación.

La primera nos indica que tan probable es que se comience a incendiar el combustible y la segunda esta relacionada con la duración de la combustión.

Las reglas del autómatas celulares son:

- Una celda que no es combustible no se quema.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

- Una celda quemándose se propaga a una celda vecina (combustible) con probabilidad p_i ,
- Una celda quemándose se calcina con probabilidad p_q .
- Una celda calcinada permanece calcinada.
- La probabilidad de ignición es modificada por el factor $e^{0.693 \alpha_s}$ donde α_s es el ángulo de inclinación en grados entre la celda quemándose y su celda vecina [10].
- La probabilidad de ignición es modificada por el factor $p_w = \frac{\vec{w} \cdot \vec{r}}{(\vec{w})(\vec{r})}$ componente del viento en la dirección del vector desplazamiento de la celda

quemándose a la celda vecina [10].

- La probabilidad de ignición es modificada por los valores de humedad relativa y temperatura ambiente [4].
- Para simular spotting se usan vecindades extendidas cuantificando la intensidad del viento, así como la intensidad del fuego en la vecindad.
- Las probabilidades de ignición y calcinación dependen del tipo de vegetación de cada celda.

El código está alimentado por una estructura de datos que es la malla, nodos y la geometría de la malla (elementos triangulares y sus vecinos), además se leen archivos de datos de alturas, tipo de vegetación y campo vectorial de velocidades del viento.

Una diferencia importante de esta implementación con otros autómatas celulares es el uso de mallas triangulares no estructuras como las utilizadas en elemento finito la cual brinda una ventaja debido a la baja complejidad computacional de sus cálculos, aprovechando el alto nivel de detalle de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) generados en base a imágenes satelitales. Además de su fácil implementación una de las grandes ventajas del uso de mallas triangulares no estructuradas en autómatas celulares es la reducción de la anisotropía inducida por las mallas regulares tales como triangulares equiláteras, rectangulares y hexagonales.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

La unidad de tiempo para cada iteración es adaptada a la velocidad máxima de propagación, así como al tamaño de las celdas. Se asume un campo de direcciones constante en tiempo, a futuro puede modificarse en intervalos de tiempo durante la simulación. El tamaño de las celdas es considerado en el orden de decenas de metros cuadrados.

Simulación Numérica de Diferentes Escenarios de incendios Forestales

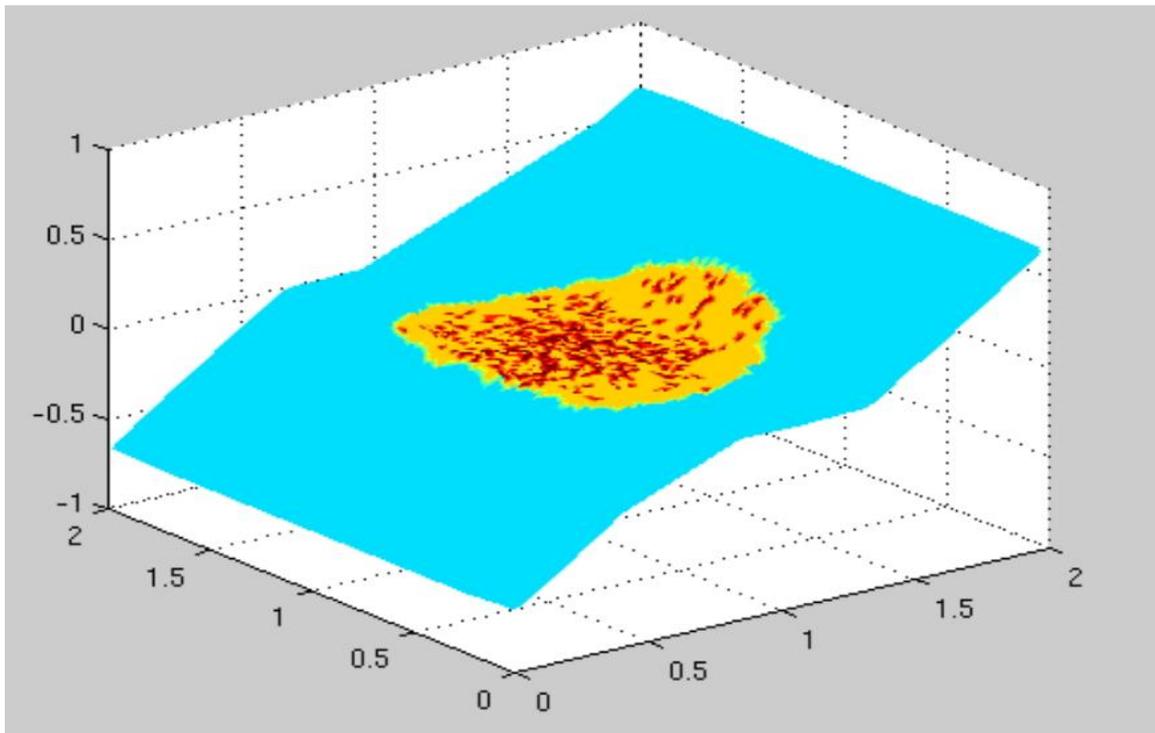


Fig. 5 Propagación de un incendio cuesta arriba.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

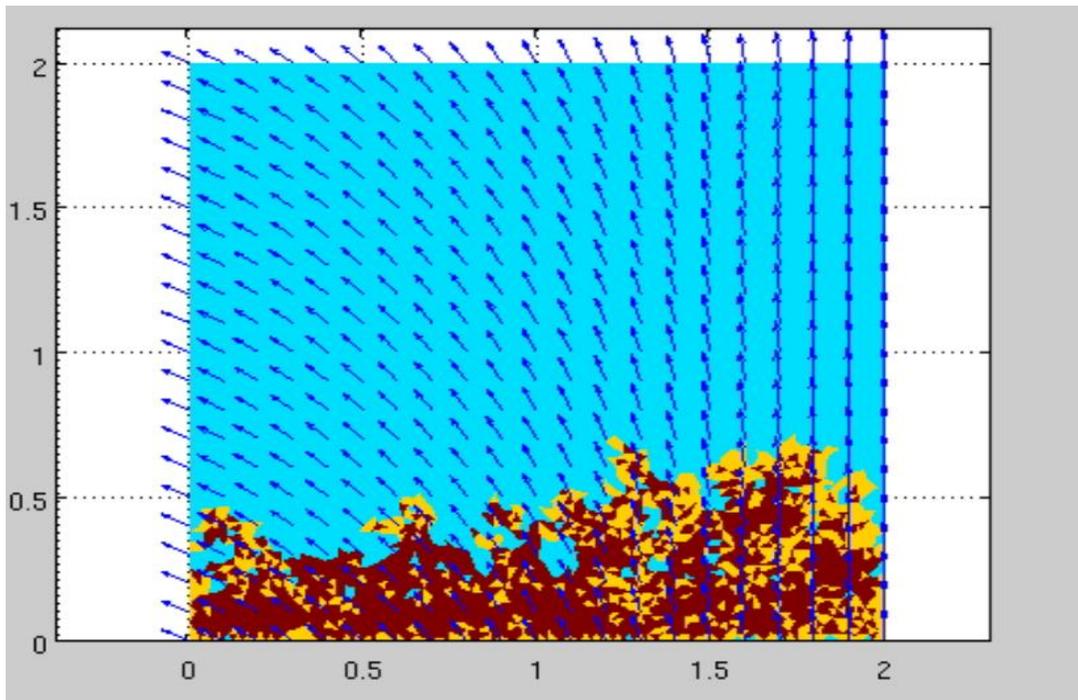


Fig. 6 Propagación de un incendio siguiendo el campo de direcciones del viento.

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

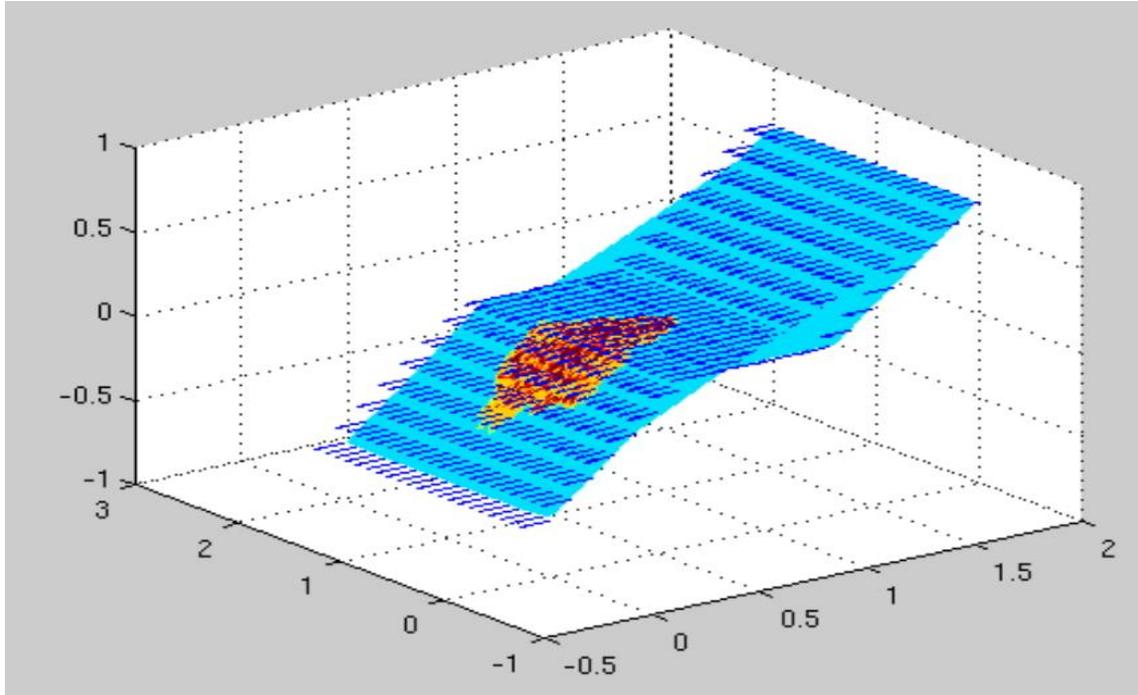


Fig. 7 Propagación de un incendio cuesta abajo por el efecto del campo de direcciones del viento.

Análisis y discusión de resultados.

La figura 5 muestra un dominio computacional de 2km x 2km. En el centro del dominio punto (1,1) inicia un incendio. Notamos que para x de 0 a $2/3$ Km la pendiente es negativa 45 grados, para x entre $2/3$ a $4/3$ esta sobre una superficie plana (0 grados) mientras que para x entre $4/3$ y 2 la pendiente es positiva a 45 grados. En un dominio plano el fuego se propaga en forma circular, sin embargo notamos que velocidad de propagación es mayor cuesta arriba. Este experimento sirve para mostrar el efecto de la pendiente en la propagación de un incendio forestal.

La figura 6, nos muestra un incendio que comienza en la línea $y=0$, con un campo de velocidades del viento. Podemos observar que el incendio sigue este campo de direcciones. Este experimento sirve para mostrar el efecto del viento al dirigir el incendio.

La figura 7 nos muestra el mismo dominio computacional de 2km x 2km, en este caso se tiene un campo de direcciones constante cuesta abajo, lo que fuerza al incendio a ir cuesta abajo.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

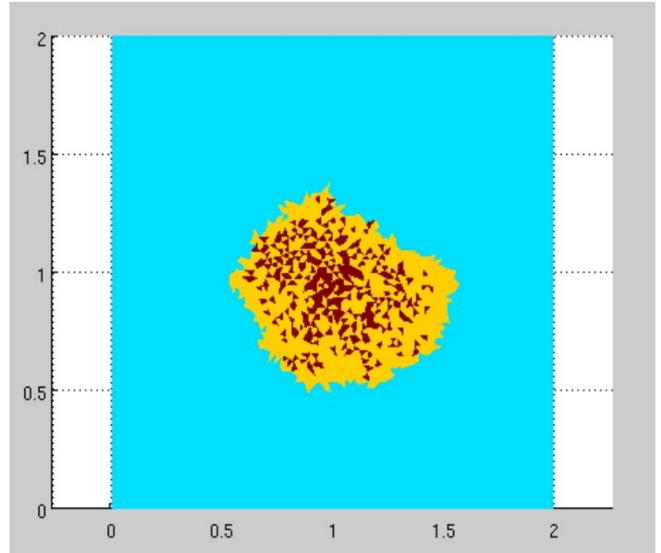
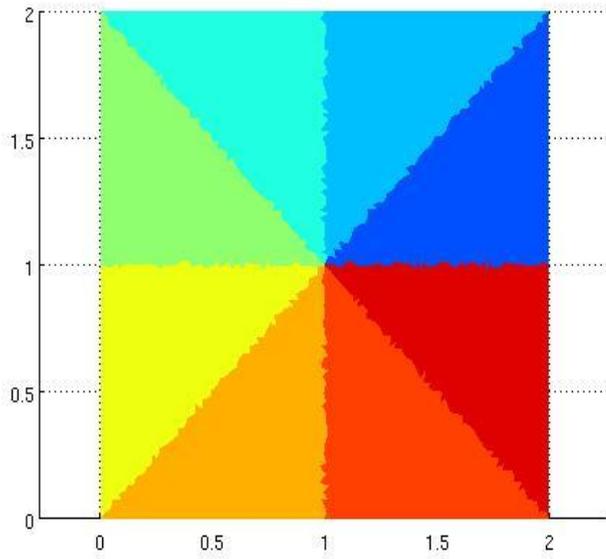
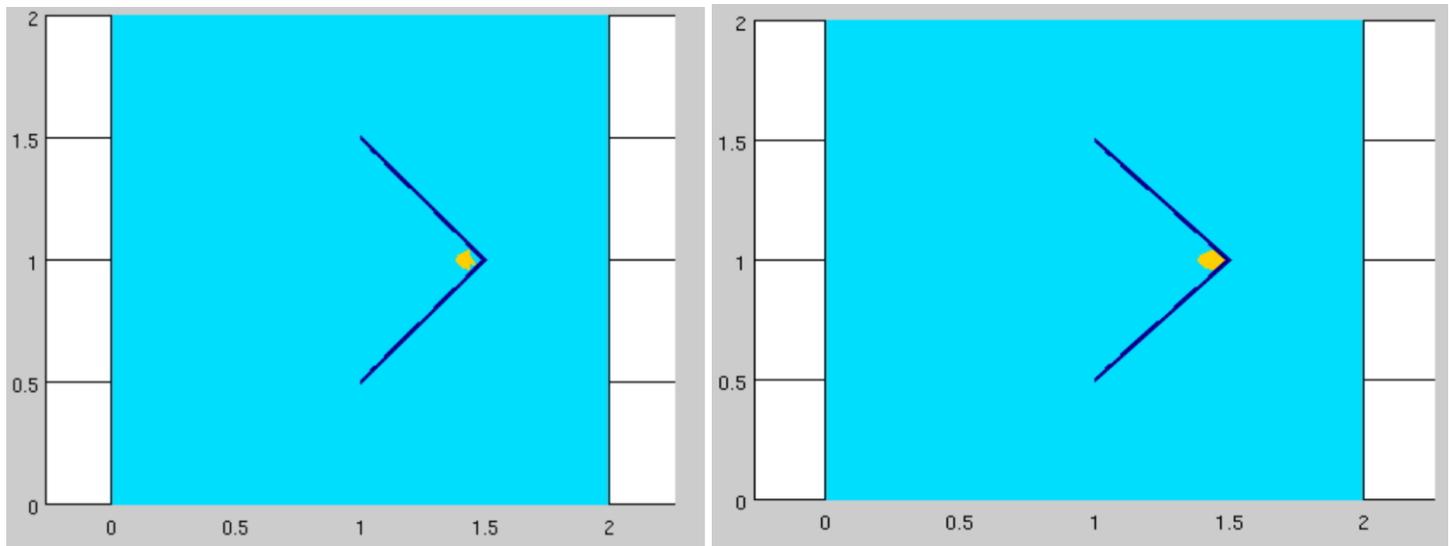


Fig. 8 Dominio computacional dividido en 8 áreas con un tipo de combustible en cada área, probabilidades de ignición 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

En la figura 8 el dominio computacional es dividido en 8 áreas con diferentes probabilidades de ignición; la simulación muestra diferentes velocidades de propagación del incendio para las diferentes áreas que representan distintos tipos de combustible. En sentido contrario a las manecillas del reloj iniciando en el primer cuadrante y terminando en el cuarto las probabilidades de ignición van de 0.2, a 0.9.





“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

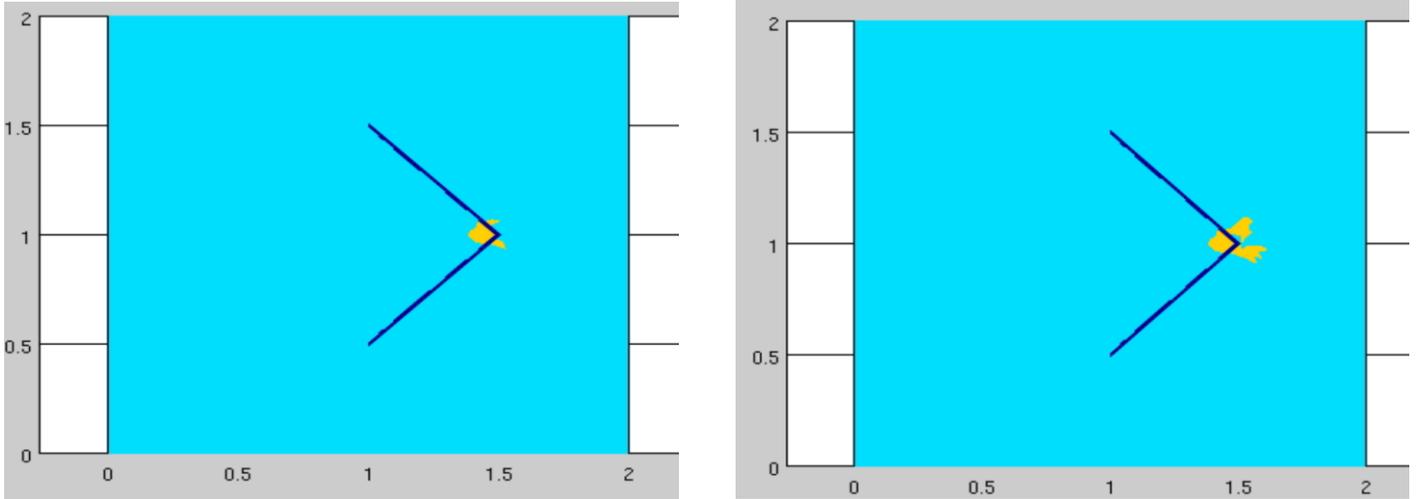
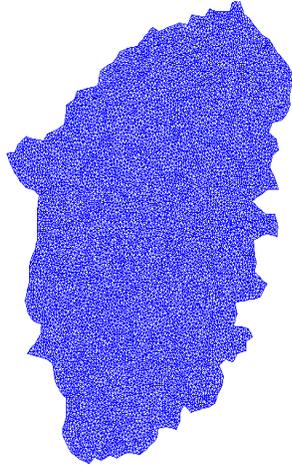


Fig. 9 la simulación muestra un incendio que es empujado por el viento y atraviesa una carretera por el efecto spotting. Se asume un viento constante de 10km/h dirigido hacia la derecha



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635





“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

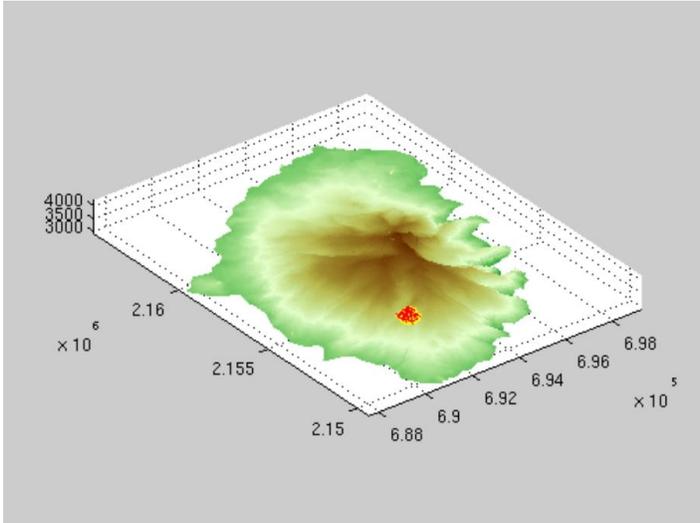


Fig. 10 Malla computacional y evolución de un incendio en la zona del cofre de perote

La figura 10 muestra la malla computacional del área de estudio Cofre de Perote, 90006 nodos, 178909 elementos triangulares. diametro maximo 13.8 mts. Asi como se incluyen gráficas de la evolución de un incendio con 40 iteraciones en tiempo, probabilidad de ignición 0.9 y probabilidad de calcinación 0.1.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Conclusiones

Los primeros experimentos y simulaciones son alentadores ya que muestran lo apropiado del modelo para simular la propagación de un incendio cuesta arriba, incendio dirigido por el campo de direcciones del viento, así como propagación en regiones de diferentes probabilidades de ignición obteniéndose diferentes velocidades de propagación para diferentes tipos de combustibles. Actualmente se está trabajando para lograr una mejor estimación de las probabilidades de ignición y calcinación de las áreas con diferentes tipos de vegetación. a partir de las bases de datos del INEGI para la clasificación de tipo de suelo, complementando esta información con el procesamiento de imágenes actualizadas del área de estudio.

Además a partir de los resultados experimentales de [4], interpolando y extrapolando se ha generado una base de datos, misma que se usará para determinar los factores de modificación de probabilidades de ignición y calcinación por efectos de la temperatura ambiental y humedad relativa. Para el caso del fenómeno spotting se usan vecindades extendidas, identificando 3 niveles de expansión dependiendo de la intensidad de fuego y del viento. Una partícula encendida se asume que asciende y puede ser transportada por el viento, el hecho de que permanezca encendida al momento de aterrizar depende de pq y el que inicie un nuevo incendio en el punto donde aterrizaje depende de la probabilidad.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

REFERENCIAS

[1] Marc L. Janssens, Introduction to Mathematical Fire Modeling, Second Edition CRC Press 2000.

[2] BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-BURN Subsystem, part 1, Andrews, Patricia L., General Technical Report INT-194. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 130 p.

[3] N. Bellomo, L. Preziosi, *Modelling Mathematical Methods and Scientific Computation*, CRC-Press; 1 edition, 1995.

[4] Lin, Chau-Chin, 2005: Influences of temperature, relative humidity, and heat sources on ignition: A laboratory test. Taiwan Journal of Forest Science 20(1): 89-93

[5] Qasim Siddique, *Survey of Forest Fire Simulation*, Global Journal of Computer Science and Technology, pp 137-140.

[6] A.L. Sullivan, *A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 3: Mathematical analogues and simulation models*, disponible en <http://arxiv.org/abs/0706.4130>

[7] S. Yassemia, S. Dragičevića, and M. Schmidt, ***Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour*** Ecological Modelling Volume 210, Issues 1-2, **10 January 2008, Pages 71-84**

[8] V. Perminov, ***Mathematical Modeling of Forest Fire Initiation in Three Dimensional Setting***, the fire environment--innovations, management, and policy; conference proceedings. **26-30 March 2007; Destin, FL. Proceedings RMRS-P-46CD.**



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. CD-ROM. p. 241-248

[9] Edward A. Johnson, Kiyoko Miyanishi, *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*

Academic Press; 1 edition 2001.

[10] Weise, D.R.; Biging, G.S. 1996. Effects of wind velocity and slope on flame properties. *Canadian Journal of Forest Research*. 26(10): 1849-1858.

[11] Mark A. Finney, *FARSITE: Fire Area Simulator—Model Development and Evaluation*, United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station Research Paper, RMRS-RP-4 Revised March 1998, revised February 2004

[12] Jonathan Richard Shewchuk, *Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*, in “Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering” (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors), volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pages 203-222, Springer-Verlag, Berlin, May 1996. (From the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry.)

[13] Stephen J. Pyne, Patricia L. Andrews, Richard D. Laven, *Introduction to Wildland Fire, Wiley; 2 edition, 1996.*

[14] S. G. Berjak, J. W. Hearne, *An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system*, *Ecological Modelling* 148 (2002) 133–151

[15] Stephen Wolfram, *'A New Kind of Science'*, Wolfram Media; 1 edition, 2002.

[16] A. Hernández Encinas, L. Hernández Encinas, S. Hoya White, A. Martín del Rey, and G. Rodríguez Sánchez, *Simulation of forest fire fronts using cellular automata*,



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Advances in Engineering Software Volume 38, Issue 6, June 2007, Pages 372-378

[17] Joel L. Schiff, *Cellular Automata: A Discrete View of the World*, Wiley 2007.

[18] M. Delorme and J. Mazoyer, *Cellular Automata: A Parallel Model (Mathematics and Its Applications)*, Springer 1998.

[19] P. M. A. Sloot and A. G. Hoekstra, *Cellular Automata as a Mesoscopic Approach to Model and Simulate Complex Systems*, Lecture Notes in Computer Science, 2001, Volume 2073/2001, 518-527.

[20] Miguel G. Cruz and Jim Gould, *Field-based fire behaviour research: past and future roles*, 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009.

[21] G. D. Papadopoulos, F.-N. Pavlidou, "Software Tools for Wildfire Monitoring", in *proceedings of the 5th International Conference on Interdisciplinarity in Education (ICIE) 2010*, Tallinn, Estonia, June 2010.

[22] Birgitt Schönfisch, *Anisotropy in cellular automata*, BioSystems 41 (1997) 29 – 41

[23] J. Quartieri, N. E. Mastorakis, G. Iannone and C. Guarnaccia, *A Cellular Automata Model for Fire Spreading Prediction*, Latest Trends on Urban Planning and Transportation Conference 2010.

[24] Xiaodong Li and William Magill, *Modeling fire spread under environmental*



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

influence using a cellular automaton approach

, Complexity International vol 8, 2001

[25] A. Alexandridis, D. Vakalis, C.I. Siettos, , and G.V. Bafas, *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 Volume 204, Issue 1, 1 October 2008, Pages 191-201

[26] I. Karafyllidis, and A. Thanailakis, *A model for predicting forest fire spreading using cellular automata*, Ecological Modelling Volume 99, Issue 1, 16 June 1997, Pages 87-97

[27] L. Hernández Encinas, , S. Hoya White, , A. Martín del Rey, , and G. Rodríguez Sánchez, *Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata*, Applied Mathematical Modelling Volume 31, Issue 6, June 2007, Pages 1213-1227.