# Modelado de incendios forestales con WSNs mediante múltiples envolventes

M. Ángeles Serna<sup>1</sup>, Aurelio Bermúdez<sup>1</sup>, Rafael Casado<sup>1</sup>

*Resumen*—La gestión de catástrofes es uno de los campos de aplicación más prometedores de las redes inalámbricas de sensores. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones son los incendios forestales. En este escenario, una red de sensores desplegada desde el aire puede ser empleada para detectar la ubicación y la forma del incendio. En este trabajo proponemos el uso de un modelo de representación basado en un conjunto de envolventes convexas, que representan las diferentes zonas afectadas por el fuego. Como veremos, esta propuesta obtiene una representación precisa y compacta del incendio forestal.

*Palabras clave*—**Redes de sensores, gestión de catástrofes,** modelado de incendios forestales, envolvente convexa.

#### I. INTRODUCCIÓN

AS redes de sensores inalámbricas (WSN, *wireless sensor networks*) son empleadas con frecuencia en aplicaciones de gestión de catástrofes, para monitorizar fenómenos ambientales tales como nubes tóxicas, terremotos o vertidos de combustible [20][11]. En esta línea, el sistema EIDOS (*Equipamiento Informático Destinado a la Orientación y Seguridad*) fue propuesto como apoyo durante las tareas de extinción de un incendio forestal [8]. El objetivo de la red de sensores en este caso es obtener un mapa del incendio, que es proporcionado a los retenes a través de dispositivos móviles [7].

En EIDOS, cada nodo construye y mantiene su propia aproximación al incendio, empleando la información que escucha a medida que el fuego se propaga. Los nodos de la red son capaces de obtener su localización geográfica, transmitiendo dicha información a sus vecinos directos en cuanto sus sensores de temperatura detectan la llegada inminente del fuego. En el escenario más simple, cada nodo que recibe una comunicación de este tipo la reenvía, a su vez, a sus vecinos, y actualiza consecuentemente su aproximación local al incendio. Así, en un instante determinado la representación del incendio obtenida por cualquier nodo de la red hace uso del conjunto completo de localizaciones alcanzadas por el fuego.

Recientemente, hemos propuesto un mecanismo distribuido de aproximación al incendio [24] en el que los nodos de la red ignoran todos aquellos eventos de fuego que se encuentran fuera de su aproximación local, estando dicha forma definida mediante una única envolvente convexa [22]. Esta aproximación supone un ahorro muy notable en la memoria de los nodos, al tiempo que reduce la sobrecarga en el medio inalámbrico.

Sin embargo, esta representación tiene sus limitaciones. El incendio puede tener una forma no

convexa, o bien estar formado por múltiples áreas, como consecuencia de la existencia de múltiples focos de fuego, las condiciones climatológicas, la topografía del terreno o las características la vegetación existente.

Con objeto de obtener una aproximación más precisa en estas situaciones, en este trabajo generalizaremos la idea anterior, proponiendo el uso de una forma más compleja para representar el incendio. Dicha forma estará constituida por un conjunto de envolventes convexas. Como veremos en la sección de evaluación, la nueva aproximación mejora significativamente la fidelidad de la representación, sin causar una sobrecarga demasiado importante en los nodos de la red.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma. En primer lugar, la Sección II presenta la arquitectura y funcionalidad del sistema EIDOS, y algunos trabajos previos sobre monitorización de fenómenos físicos redes inalámbricas de mediante sensores. A continuación, en la Sección III se proporciona un marco formal para la técnica de aproximación de incendios basada en el uso de múltiples envolventes convexas. Posteriormente, la Sección IV presenta diversos resultados de simulación que nos permitirán realizar una evaluación detallada del rendimiento de esta técnica. Finalmente, la Sección V presenta las conclusiones de nuestra investigación y esboza el trabajo futuro.

#### II. ESTADO DEL ARTE

## A. El sistema EIDOS

El sistema EIDOS fue propuesto con el objetivo de incrementar la seguridad y la eficacia de las personas involucradas en la extinción de un incendio forestal. El sistema está basado en el empleo de una WSN de gran tamaño, que es desplegada desde el aire en las inmediaciones de la zona afectada por el incendio.

La información ambiental recogida por los nodos de la red es procesada de forma completamente distribuida y colaborativa, con objeto de obtener la localización y la forma de los frentes de llama activos en cada momento. Finalmente, el resultado de este procesamiento es proporcionado directamente (y sin necesidad de una estación base) a los retenes, que están equipados con dispositivos móviles.

En cuanto a la arquitectura del sistema, EIDOS considera tres tipos de dispositivos. En primer lugar están los nodos de la WSN, que son básicamente pequeñas plataformas de computación con capacidad para establecer comunicaciones inalámbricas. Los nodos están equipados con sensores capaces de monitorizar magnitudes ambientales, tales como presión, humedad o temperatura. Opcionalmente, estos nodos disponen de receptores de GPS (*Global Positioning System*).

Por otro lado, los retenes llevan dispositivos móviles inalámbricos (teléfonos inteligentes, tabletas, etc.), que les permiten acceder a la salida proporcionada por los

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Instituto de Investigación en Informática de Albacete, Departamento de Sistemas Informáticos, Universidad de Castilla–La Mancha. *(angeles.serna, aurelio.bermudez, rafael.casado)@uclm.es* 

algoritmos distribuidos ejecutados por la WSN. Suponemos que estos dispositivos son capaces de interactuar inalámbricamente con los nodos bajo cobertura y de procesar la información recogida para, por ejemplo, proporcionar al retén un mapa del incendio a través de una interfaz gráfica en la que también se muestre un mapa de la zona.

Finalmente, el sistema requiere emplear uno o varios vehículos aéreos, que se encargarán de llevar a cabo el despliegue de la red sobre el área de interés. Nótese que estos vehículos pueden ser los propios medios aéreos ya involucrados en las tareas de extinción.

En cuanto al comportamiento de los nodos de la red, la primera tarea que llevan a cabo una vez que han sido desplegados consiste en obtener su localización geográfica (en caso de no disponer de un receptor de GPS). En EIDOS los nodos ejecutan un proceso de localización distribuido libre de distancias que les proporciona una estimación sobre su posición [6].

A partir de este momento, cada vez que un nodo n detecta la aproximación de un frente de llama a su posición, desencadena un proceso de difusión de dicha posición p a toda la red. Suponemos que los nodos son capaces de monitorizar el ambiente, detectando la llegada del fuego cuando la temperatura captada por el sensor correspondiente supera un umbral predefinido  $t_{detec}$ . Por otra parte, los nodos se queman al alcanzar cierta temperatura  $t_{burn}$ , de manera que  $t_{burn} > t_{detec}$ . Suponemos que, después de que la temperatura captada llegue a  $t_{detec}$ , un nodo es capaz de transmitir su posición antes de quemarse definitivamente.

Con el fin de minimizar el consumo de recursos de la red, prolongando así su vida, los nodos de la WSN no mantienen ninguna estructura jerárquica ni disponen de información preliminar sobre la topología de la red. Con estas restricciones, para la diseminación de eventos de detección de fuego EIDOS implementa una variante del mecanismo de difusión ABBA (*Area-based Beaconless Algorithm*) [19].

En particular, la técnica de difusión considerada [23] se basa en el concepto de perímetro cubierto por las distintas copias del mismo mensaje recibidas, asumiendo áreas circulares de cobertura. En particular, un nodo n cancela la transmisión de un mensaje  $m_p$  cuando las sucesivas copias de  $m_p$  ( $m_p$ ',  $m_p$ ''...) cubren completamente el perímetro de n. Nótese que este algoritmo requiere que cada nodo mantenga una lista donde almacenar los mensajes pendientes de ser retransmitidos, junto con el perímetro no cubierto por otras copias de estos mensajes. Nótese también que para que un nodo que recibe un mensaje pueda actualizar el perímetro cubierto por el emisor del mismo, es necesario que el mensaje incluya explícitamente la posición de su emisor. Evidentemente, esto introduce una sobrecarga adicional en las comunicaciones.

A partir de los eventos de fuego que recibe, cada nodo construye y mantiene una aproximación local a la propagación del incendio forestal en los alrededores. En la Sección III se presenta la técnica considerada en este trabajo para obtener esa aproximación.

### B. Monitorización de Fenómenos mediante WSNs

En la literatura existen multitud de trabajos que abordan el problema de determinar el contorno (también

frontera, límite o borde) de un fenómeno físico mediante el uso de WSNs. La mayoría de las propuestas requieren la intervención de una estación base o nodo central en algún momento del proceso.

En [2], uno de los trabajos pioneros, se proponen tres métodos para la detección de bordes. El primer enfoque es un enfoque estadístico, mientras que los otros dos se basan en un filtro paso alto y un clasificador, respectivamente. En los tres enfoques, cada nodo recibe información de sus vecinos, y de forma independiente determina si está en el borde del fenómeno observado.

El algoritmo propuesto en [3] emplea una estructura de comunicación jerárquica. Los nodos deben ser capaces de detectar no sólo propiedades físicas locales (tales como la temperatura en su localización), sino más bien medir las propiedades dentro de una cierta distancia. El método se basa en el hecho de que los nodos pueden determinar la distancia y la dirección de la frontera del fenómeno observado.

En [10] los autores usan triangulaciones de Delaunay y diagramas de Voronoi para generar una red de comunicación entre los sensores y definir los segmentos de frontera entre los sensores, respectivamente. El algoritmo propuesto identifica los límites del fenómeno basándose en las diferencias entre las lecturas de los sensores vecinos, y no en los valores absolutos de los sensores.

En [17] se propone un enfoque *cross-layer* para la generación del contorno del fenómeno físico. Se añaden técnicas de fusión de datos en WSNs, usando la detección de ruido (a menudo insignificante), el error en los datos de cuantificación y el ruido de la comunicación de datos. Además, en lugar de tomar una decisión binaria, la probabilidad de que un nodo forme parte del contorno se calcula en el centro de fusión local.

En [21] los autores describen un sistema para estimar el límite de un fenómeno de gran escala mediante la agregación de las lecturas a lo largo de una estructura jerárquica predefinida dentro de la red.

El *contour mapping engine* (CME) se propone en [25] para construir un mapa de contorno dinámico usando técnicas de procesamiento de datos por parte de la red. En este enfoque, la red está dividida en *clusters* [1], de forma que los *cluster heads* obtienen los segmentos del contorno y un nodo central computa el mapa definitivo.

En [26] los autores proponen un algoritmo distribuido para mantener el contorno de un objeto binario a medida que éste va cambiando de forma, garantizando que el resultado mantiene las características topológicas globales de los bordes del objeto.

La técnica presentada recientemente en [15] también usa un nodo raíz para obtener el contorno del fenómeno. Sin embargo, es particularmente interesante debido a que incorpora una estrategia para minimizar las necesidades de comunicación en la red. En particular, los sensores intercambian información sólo cuando el fenómeno observado no se comporta como se esperaba. No obstante, la propuesta requiere programar los nodos con un modelo del fenómeno (llamado *tiny model*).

Por otro lado, además de la envolvente convexa, existen otras propuestas para representar de forma compacta la forma de un fenómeno a partir del conjunto de posiciones donde se ha detectado su presencia. Por ejemplo, en [16] los autores analizan el uso de curvas de Bézier para realizar la aproximación. En [5] se utiliza un conjunto de polígonos para representar el contorno del fenómeno, siendo el número de vértices empleado un parámetro especificado por el usuario. Por último, existen otros modelos analíticos más complejos, como los diagramas de Voronoi [10], *kernel linear regression* [9], y *Gaussian kernel estimation* [12], que también se han propuesto para modelar los datos obtenidos por los sensores.

Recientemente, en [13] se ha propuesto un algoritmo distribuido para el seguimiento de los fenómenos. Esta propuesta se basa en un modelo de curva compleja deformable [14] para mantener una representación actualizada del fenómeno. La idea clave es que cada nodo es capaz de detectar cambios incrementales en la frontera del fenómeno en su proximidad, sólo mediante el intercambio de mensajes con sus vecinos. Estos cambios se envían a una estación base, que se encarga de la agregación de toda la información.

#### III. APROXIMACIÓN MEDIANTE Múltiples Envolventes Convexas

En esta sección presentaremos nuestra propuesta para el modelado de incendios forestales, basada en el uso de una forma compuesta por múltiples envolventes convexas.

Al igual que el modelo basado en una única envolvente, este enfoque implica que los nodos almacenen y retransmitan sólo aquellas posiciones de fuego recibidas que supongan alguna variación en la forma, ignorando el resto de eventos de fuego. De esta manera, la cantidad de datos almacenados y difundida a través de la red se reduce. Sin embargo, como veremos en la Sección IV, este modelo mejora la calidad de la representación obtenida.

A continuación, se presentan un conjunto de definiciones que describen formalmente la forma considerada. Estas definiciones proporcionan un marco teórico para la implementación del algoritmo que ejecutarían los nodos de la red para la obtención de la aproximación. El detalle de dicho algoritmo queda fuera del alcance de este trabajo.

**Definición 1** (*Punto*). Un punto  $p \in \mathbb{R}^2$ , es una posición del plano 2D con coordenadas  $(p_x, p_y)$ .

**Definición 2** (*Distancia entre puntos*). Dados dos puntos  $a, b \in \mathbb{R}^2$ , la distancia euclídea entre ellos es proporcionada por la función *Distance*:  $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ , denotada por *Distance*(a, b), y definida mediante:

Distance
$$(a, b) = \sqrt{(a_{x} - b_{x})^{2} + (a_{y} - b_{y})^{2}}$$

**Definición 3** (*Posición relativa entre puntos*). Dados tres puntos  $a, b, c \in \mathbb{R}^2$ , la posición relativa (en sentido horario, antihorario, o en línea) entre ellos es proporcionada por la función *Order*:  $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \{CW, CCW, LINE\}$ , denotada por *Order*(a,b,c), y definida mediante:

$$Order(a, b, c) = \begin{cases} CW, si \det(a, b, c) < 0\\ CCW, si \det(a, b, c) > 0\\ LINE, si \det(a, b, c) = 0 \end{cases}$$
$$donde: \det(a, b, c) = \begin{vmatrix} 1 & a_{x} & a_{y} \\ 1 & b_{x} & b_{y} \\ 1 & c_{x} & c_{y} \end{vmatrix}$$

**Definición 4** (*Función envolvente*). Dado un conjunto de puntos  $P \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$ , la función *GetHull*:  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^2) \rightarrow \mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$ , denotada por *GetHull*(P) o  $H_P$ , verifica:

- 1.  $H_P \subseteq P$
- 2.  $\forall a \in H_P, \exists b \in H_P \mid \forall p \in P, Order(a, b, p) \in \{CW, LINE\}$
- 3.  $\forall a \in H_P, \exists b \in H_P \mid \forall c \in H_P, Order(a, b, c) = CW$

GetHull es una función no inyectiva. En consecuencia, no es posible recuperar el conjunto de partida original Pa partir de GetHull(P). Además, no es sobreyectiva, de modo que una colección aleatoria de puntos no representa necesariamente una envolvente. Por esta motivo, se proporciona la siguiente definición.

**Definición 5** (*Envolvente*). Un conjunto de puntos  $H \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$  es una envolvente si se verifica que *GetHull(H)* = *H*.

**Definición 6** (*Conjunto encerrado*). Dado un conjunto de puntos  $P \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$  y una envolvente  $H \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$ , la función *Enclosed*:  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^2) \times \mathcal{P}(\mathbb{R}^2) \rightarrow \mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$ , denotada por *Enclosed*(*P*, *H*), verifica:

- 1.  $Enclosed(P, H) \subseteq P$
- 2.  $\forall p \in P \mid \forall a \in H, \text{ si } \exists b \in H \mid Order(a, b, p) = CW$ , entonces  $p \in Enclosed(P, H)$

*Enclosed* es una función no inyectiva debido a que, aunque es posible obtener el conjunto H a partir de *Enclosed*(P, H), no es posible obtener el conjunto P. Además, es una función sobreyectiva. Por lo tanto, dado cualquier conjunto aleatorio de puntos, hay una envolvente que lo contiene.

**Definición 7** (Forma basada en múltiples envolventes). Dado un conjunto de puntos  $P \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$  y un valor  $d \in \mathbb{R}$ , la función GetShape:  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^2) \times \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{R}^2))$ , denotada por GetShape(P, d) o  $S_P^d$ , verifica:

1.  $\forall H \in S_P^d, H \subseteq P \land H$  es una envolvente

- 2.  $\forall H \in S_P^d, \forall Q_1, Q_2 | Q_1 \cup Q_2 = Enclosed(P, H)$   $\land Q_1 \cap Q_2 = \emptyset,$  $\exists a \in Q_1 | \exists b \in Q_2$  que verifica Distance(a, b) < d
- 3.  $\forall H_1, H_2 \in S_P^d, H_1 \cap H_2 = Enclosed(P, H_1) \cap Enclosed(P, H_2)$
- 4.  $\forall H_1, H_2 \in S_P^d, \forall a, b \in P,$   $a \in H_1 \land a \notin H_2 \land b \notin H_1 \land b \in H_2 \Longrightarrow$ Distance(a, b) > d

5. 
$$\forall p \in P, \exists H \in S_P^d \mid p \in Enclosed(P, H)$$



Fig. 1. Obtención de una forma basada en múltiples envolventes a partir de un conjunto de puntos (P).

GetShape es una función no inyectiva. En consecuencia, no se puede recuperar el conjunto original de partida P a partir de  $S_P^d$ . Además, no es sobreyectiva, de modo que un conjunto aleatorio de puntos no representa necesariamente una envolvente.

Nótese que la cantidad de envolventes proporcionada por GetShape depende del valor del parámetro d (o distancia umbral). En la Fig. 1, dado un conjunto de puntos P, se muestra el resultado obtenido por GetShape para dos distancias diferentes,  $d_1$  y  $d_2$ , suponiendo que  $d_1$  $< d_2$ . Las envolventes se representan mediante puntos negros enlazados. Los puntos que no pertenecen a ninguna envolvente se representan en blanco. Independientemente del valor que tome d, todos los puntos de P quedarán encerrados en alguna envolvente.

Finalmente, dada una forma constituida por múltiples envolventes que representa un incendio forestal en un instante determinado, a continuación proporcionamos una herramienta para determinar si el fuego ha alcanzado una posición arbitraria.

Definición 8 (Función de pertenencia). Dada una forma  $S_P^d$  y un punto  $p \in \mathbb{R}^2$ , la función *Inside*:  $\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{R}^2)) \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^2 \to \{true, false\}, denotada por$ *Inside*( $S_P^d$ , *p*), verifica:

 $Inside(S_{P}^{d}, p) = \begin{cases} true, & si S_{P}^{d} = S_{P \cup \{p\}}^{d} \\ false, & en otro caso \end{cases}$ 

#### IV. EVALUACIÓN

En esta sección, se analiza el uso de nuestra propuesta basada en múltiples envolventes convexas para la aproximación de los incendios forestales con WSNs. Tras describir la metodología de simulación, se presentan un conjunto de resultados que nos permitirán determinar la calidad de nuestra aproximación y la sobrecarga que representa.

# A. Metodología de Simulación

En el contexto del sistema EIDOS, usamos un completo entorno de simulación [8] que nos permite desplegar una WSN sobre un área, propagar un incendio forestal, situar a los bomberos en una localización concreta y visualizar la percepción que tendrían de la evolución de los frentes de fuego. Esta herramienta se compone de varios módulos independientes е

interconectados, que comparten información a través de una base de datos global.

En cada simulación, se despliega de forma aleatoria una red de sensores sobre un área de 2500×2500 metros. Se han considerado tamaños de red desde 2000 hasta 15000 nodos, con un grado de conectividad (número medio de vecinos por nodo) de 3.02 a 23.6. Dos horas después del inicio de cada simulación, un incendio forestal comienza a propagarse en la zona de despliegue, y cuatro horas más tarde el fuego ya ha alcanzado aproximadamente a la mitad de los nodos.

El comportamiento de los nodos de la red se detalla en la Sección II.A. En este caso, suponemos que todos los nodos están equipados con un receptor GPS. Cada vez que un nodo detecta la proximidad del fuego (por medio de un aumento brusco en la temperatura captada), procede a difundir su posición a toda la red. Tras un breve periodo de tiempo, el nodo se quema y deja de ser operativo. Nótese que, aunque muchos nodos dejan de estar operativos al quemarse, la conectividad de la red nunca se pierde. Esto supone que cualquier evento de detección de fuego siempre será recibido por todos los nodos de la red que sigan operativos y, por tanto, todos ellos obtendrán la misma aproximación al incendio.

Finalmente, para incrementar la representatividad de los resultados, cada experimento se ha repetido 10 veces para cada tamaño de red y técnica de aproximación, presentándose aquí los valores medios obtenidos.

# B. Resultados

# 1) Calidad de la Aproximación

El simulador de fuego empleado (Farsite [4]) obtiene la evolución de un incendio forestal como un conjunto capas raster. Una capa raster es una rejilla de celdas 2D que representan la zona en cuestión. Para este trabajo, hemos establecido el tamaño de celda de 10×10 metros. La salida más relevante para nuestro estudio es la capa TOA (Time of Arrival), que proporciona el tiempo de llegada del fuego al centro de cada celda. A partir de esta información, podemos analizar la manera en la que el fuego se propaga a lo largo del tiempo. Dado un tiempo de simulación t, el conjunto de celdas alcanzadas por el fuego está formado por aquellas celdas que verifican que  $TOA(cell) \leq t$ .

Un criterio objetivo para obtener la calidad de la aproximación puede ser la cantidad de celdas TOA correctamente detectadas. En la gráfica de la Fig. 2, el



Fig. 2. Calidad instantánea de la aproximación.

eje horizontal representa el tiempo de simulación (en invervalos de 10 minutos), y el eje vertical representa la cantidad de celdas quemadas correctamente detectadas en un momento dado. Obviamente, la serie "Farsite" muestra en todo momento la cantidad real de celdas alcanzadas por el fuego. Esta serie representa un límite superior ideal para cualquier aproximación de fuego.

El resto de series muestran la cantidad de celdas correctamente detectadas al emplear la aproximación basada en múltiples envolventes convexas, teniendo en cuenta diferentes valores para el parámetro d, desde d=40 metros hasta  $d=\infty$ . Nótese que  $d=\infty$  implica el uso de una única envolvente en la forma, lo que supone un límite inferior para esta técnica de aproximación.

Además, como estamos suponiendo que todos los nodos (operativos) de la red reciben todos los eventos de detección de fuego, la aproximación calculada debe ser exactamente la misma para todos ellos. En otras palabras, este análisis se puede realizar a partir de la forma obtenida por cualquiera de los nodos.

La Fig. 3 muestra el aspecto del incendio proporcionado por Farsite y de las distintas aproximaciones al mismo en un instante concreto de la simulación. Como podemos ver, se ha considerado un incendio que se inicia desde varios puntos de ignición separados (colores fríos). Por esta razón, en la Fig. 1 se puede apreciar que al inicio de la simulación la serie " $d = \infty$ " ofrece una aproximación bastante pobre. Lo mismo sucede con d=400 metros. A medida que el valor de *d* disminuye, aumenta la exactitud de la representación. Por otro lado, al final de la simulación, cuando las distintas áreas alcanzadas por el incendio ya se han fusionado y el fuego ocupa un gran porcentaje de la zona, la calidad de todas las aproximaciones tiende a converger, y desaparece la ventaja de utilizar valores



Fig. 4. Calidad de la aproximación a las 4 horas, en función del grado de la red.

muy pequeños para el parámetro d. Para concluir, puede observarse que la serie "d=50" ofrece el mejor comportamiento durante la primera parte de la simulación, mientras que después de cuatro horas y media d=40 metros es la mejor opción.

El despliegue considerado en las gráficas anteriores consta de 5000 nodos, con un grado de conectividad de 7,89 vecinos por nodo. La Fig. 4 muestra la influencia del grado de la red en la precisión de la aproximación obtenida a las 4 horas del comienzo de la simulación. El eje vertical representa la tasa de celdas correctas con respecto a la salida de Farsite.

Podemos concluir que, exceptuando los grados más bajos (recordemos que EIDOS emplea redes densas), tanto d=50 metros como d=40 metros proporcionan mejores aproximaciones que cuando la forma consta de una sola envolvente ( $d=\infty$ ). Lo mismo puede apreciarse gráficamente en la Fig. 3.

## 2) Requerimientos de Memoria

En la aproximación propuesta, el valor del parámetro dtiene un efecto directo sobre la cantidad de memoria requerida en cada nodo de la red para almacenar el modelo de fuego. Valores más bajos implican que el proceso de fusión de las envolventes contenidas en la misma forma se retrase en el tiempo. Por lo tanto, el nodo tendrá que almacenar una mayor cantidad de datos (eventos de fuego) en su memoria.

La Fig. 5 muestra los requisitos de memoria en el tiempo. Nótese que la cantidad de memoria consumida cuando  $d = \infty$  (una única envolvente) tiende a estabilizarse en valores relativamente bajos. En el extremo opuesto, podemos observar que el uso de d=40metros supone incrementar notablemente la memoria necesaria. Sin embargo nótese que este incremento no es



Fuego después de 4 horas

Fig. 3. Varias aproximaciones al fuego "real", después de 4 horas de simulación.



Fig. 5. Requisitos instantáneos de memoria.

tan importante para d=50 metros, valor que, como hemos visto, también obtiene buenas aproximaciones.

#### V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito un nuevo mecanismo para la obtención distribuida del contorno de un incendio forestal por medio de una red de sensores inalámbricos. A partir de la información recibida, cada nodo de la red mantiene una aproximación actualizada de la forma del incendio. Esta aproximación se compone de un conjunto de envolventes convexas, cada una de las cuales representa un área del terreno ocupada por el fuego. Hemos mostrado que esta técnica puede llegar a obtener una representación muy aproximada del perímetro del fuego.

Como trabajo futuro, planeamos sustituir esta aproximación basada en envolventes convexas por una forma no convexa que se adapte mejor a la forma del incendio. Además, teniendo en cuenta el poder computacional de los dispositivos móviles considerados en el sistema EIDOS, pretendemos enriquecer el modelo de fuego obtenido, proporcionando datos sobre la velocidad y la dirección de los frentes del incendio.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), el Programa Consolider y el Plan E, así como por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), bajo los proyectos CSD2006-00046 y TIN2009-14475-C04. También ha sido parcialmente financiado por la Junta de Comunidades de Castilla–La Mancha bajo el proyecto PII1C09-0101-9476.

#### REFERENCIAS

- Abbasi, A. and Younis, M. 2007. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. Computer Communications 30, 2826–2841.
- [2] Chintalapudi, K. K. and Govindan, R. 2003. Localized edge detection in sensor fields. Ad Hoc Networks 1, 273–291.
- [3] Duttagupta, S., Ramamritham, K., and Ramanathan, P. 2006. Distributed boundary estimation using sensor network. In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems. IEEE, Vancouver, Canada, 316–325.
- [4] Firemodels.org. 2012. Farsite fire area simulator.
- http://www.firemodels.org/index.php/national-systems/farsite.
- [5] Gandhi, S., Hershberger, J., and Suri, S. 2007. Approximate Isocontours and Spatial Summaries for Sensor Networks. In

Proc. of the 6th Int. Conf. on Information processing in sensor networks. ACM, Cambridge, MA, 400–409.

- [6] García, E. M., Bermúdez, A., and Casado, R. 2011. Range-Free Localization for Air-Dropped WSNs by Filtering Neighborhood Estimation Improvements. In Proc. of the First Int. Conf. on Computer Science and Information Technology. Springer, Bangalore, India, 325–337.
- [7] García, E. M., Bermúdez, A., Casado, R., and Quiles, F. J. 2007. Collaborative Data Processing for Forest Fire Fighting. In adjunct poster/demo Proc. of European Conf. on Wireless Sensor Networks. Delft, The Netherlands.
- [8] García, E. M., Serna, M.A., Bermúdez, A., and Casado, R. 2008. Simulating a WSN-based Wildfire Fighting Support System. In Proc. of the 2008 IEEE Int. Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications. IEEE, Sidney, Australia, 896–902.
- [9] Guestrin, C., Bodik, P., Thibaux, R., Paskin, M., and Madden, S. 2004. Distributed regression: an efficient framework for modeling sensor network data. In Proc. of the Third Int. Symposium on Information Processing in Sensor Networks. ACM, Berkely, CA, 1–10.
- [10] Ham, M. I. and Rodriguez, M. A. 2010. A Boundary Approximation Algorithm for Distributed Sensor Networks. Int. Journal of Sensor Networks 8, 1, 41–46.
- [11] Jakobson, G., Buford, J. F., and Lewis, L. 2010. Guest Editorial: Situation Management. IEEE Communications Magazine 48, 3.
- [12] Jin, G. and Nittel, S. 2008. Towards Spatial Window Queries over Continuous Phenomena in Sensor Networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 19, 4, 559–571.
- [13] Jin, G. and Nittel, S. 2011. Efficient tracking of 2D objects with spatio-temporal properties in wireless sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Databases 29, 3–30.
- [14] Kass, M., Witkin, A., and Terzopoulos, D. 1988. Snakes: active contour models. Int. Journal on Computer Vision 1, 4, 321–331.
- [15] King, K. and Nittel, S. 2010. Efficient Data Collection and Event Boundary Detection in Wireless Sensor Networks Using Tiny Models. In Proc. of the Sixth Int. Conf. on Geographic Information Science. Springer-Verlag, Zurich, Switzerland, 100– 114.
- [16] Li, Y., Loke, S.W., and Ramakrishna, M.V. 2007. Performance Study of Data Stream Approximation Algorithms in Wireless Sensor Networks. In Proc. of the 13th Int. Conf. on Parallel and Distributed Systems. IEEE, Hsinchu, Taiwan, 1–8.
- [17] Liao, P. K., Chang, M. K., and Jay Kuo, C.C. 2007. A Cross-Layer Approach to Contour Nodes Inference with Data Fusion in Wireless Sensor Networks. In Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf.. IEEE, Hong Kong, PRC, 2773–2777.
- [18] MySQL. 2012. MySQL website. http://www.mysql.com/.
- [19] Ovalle-Martínez, F. J., Nayak, A., Stojmenovic, I., Carle, J., and Simplot-Ryl, D. 2006. Area-based beaconless reliable broadcasting in sensor networks. Int. Journal on Sensor Networks 1, 20–33.
- [20] Nittel, S. 2010. A Survey of Geosensor Networks: Advances in Dynamic Environmental Monitoring. Sensors 9, 5664–5678.
- [21] Nowak, R. and Mitra, U. 2003. Boundary estimation in sensor networks: theory and methods. In Proc. of the 2nd Int. Conf. on Information processing in sensor networks. Springer-Verlag, Palo Alto, CA, 80–95.
- [22] Preparata, F.P. and Shamos, M.I. 1985. Computational Geometry - An Introduction. Springer-Verlag, New York.
- [23] Serna, M. A., García, E. M. Bermúdez, A., and Casado, R. 2010. Information Dissemination in WSNs Applied to Physical Phenomena Tracking. In Proc. of the 4th Int. Conf. on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. IARIA, Florence, Italy, 458–463.
- [24] Serna, M. A., Bermúdez, A., Casado, R., and Kulakowski, P. 2011. A Convex Hull-based Approximation of Forest Fire Shape with Distributed Wireless Sensor Networks. In Proc. of the 7th Int. Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks, and Information Processing. IEEE, Adelaide, Australia, 419–424.
- [25] Xu, Y., Lee, W. C., and Mitchell, G. 2008. CME: A Contour Mapping Engine in Wireless Sensor Networks. In Proc. of the 28th Int. Conf. on Distributed Computing Systems, 2008. IEEE, Beijing, China, 133–140.
- [26] Zhu, X., Sarkar, R., Gao, J., and Mitchell, J.S.B. 2008. Lightweight Contour Tracking in Wireless Sensor Networks. In Proc. of the 27th Conf. on Computer Communications. IEEE, Phoenix, AZ, 1175–1183.