



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 364 509**

51 Int. Cl.:
G06K 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07788015 .1**

96 Fecha de presentación : **27.07.2007**

97 Número de publicación de la solicitud: **2047404**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **15.04.2009**

54 Título: **Detección automática de fuegos sobre la superficie de la tierra y de fenómenos atmosféricos tales como nubes, velos, brumas o similares, por medio de un sistema satelital.**

30 Prioridad: **28.07.2006 EP 06118137**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
05.09.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
05.09.2011

73 Titular/es: **TELESPAZIO S.p.A.**
Via Tiburtina 965
00156 Roma, IT

72 Inventor/es: **Zavagli, Massimo y**
Costantini, Mario

74 Agente: **Pons Ariño, Ángel**

ES 2 364 509 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

5 Detección automática de fuegos sobre la superficie de la Tierra y de fenómenos atmosféricos tales como nubes, velos, brumas o similares, por medio de un sistema satelital.

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION.

10 La presente invención se relaciona con la detección automática de fuegos sobre la superficie de la Tierra y de fenómenos atmosféricos tales como nubes, velos, brumas o similares, por medio de un sistema satelital, en particular, explotando los datos multiespectrales adquiridos por sensores multiespectrales de sistemas satelitales geoestacionarios o polares.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION.

20 Tal como es sabido, las imágenes multiespectrales son imágenes adquiridas por radiómetros con Sensores Remotos (RS), cada uno de los cuales adquiere una imagen digital (en detección remota, denominada una escena) en una banda pequeña del espectro visible, que varía desde 0.4 μm hasta 0.7 μm , denominada región rojo-verde-azul (RGB), y va hasta longitudes de onda del infrarrojo de 0.7 μm a 10 μm o más μm , clasificada como NIR (infrarrojo cercano), MIR (infrarrojo medio), FIR (infrarrojo lejano) o TIR (infrarrojo térmico). Una imagen multiespectral por lo tanto es una recolección de varias imágenes espectrales individuales (de banda sencilla o monocromática) de la misma escena, tomada cada una con un sensor sensible a una longitud de onda diferente.

25 Se han desarrollado diferentes técnicas para detección de fuego, con base en los criterios de umbral y algoritmos contextuales, para los sistemas polares multiespectrales y, en los últimos años, para los sensores geoestacionarios. Para una discusión detallada de estas técnicas puede hacerse referencia, por ejemplo, a Kaufman, Y.J., Justice, C.O., Flynn, L.P. Kendal, J.D., Prins, E.M., Giglio, L. Ward, D.E. Menzel, W.P. and Setzer, A.W., 1998, Potential global fire monitoring from EOS-MODIS, Journal of Geophysical Research, 103, 32215-32238, and Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O. & Kaufman, Y.J. (2003), An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, Rem. Sen. Environment, 87:273-282.

35 Los sensores multiespectrales en los satélites polares se caracterizan por una resolución espacial relativamente alta, pero, debido al largo tiempo de retorno de los satélites polares, no puede alcanzarse la rapidez necesaria para propósitos de detección efectiva del fuego, aun combinando todos los sensores polares multiespectrales existentes. Por el contrario, los sensores geoestacionarios multiespectrales proporcionan adquisiciones muy frecuentes, por ejemplo, cada 15 minutos para el sensor MSG SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager), aunque se caracteriza por una resolución espacial más baja (3 x 3 km^2 y superior para canales infrarrojos), lo cual podría evitar que se detectaran fuegos pequeños.

40 Con el fin de superar las limitaciones de la resolución espacial, se propuso recientemente una metodología basada en un modelo físico para detección de fuegos a nivel de subpíxeles a partir de datos de sensores geoestacionarios, por parte de E. Cisbani, A. Bartoloni, M. Marchese, G. Elisei, A. Salvati, Early fire detection system based on multi-temporal images of geostationary and polar satellites, IGARSS 2002, Toronto, 2002, y Calle, A., Casanova, J.L., Moclan, C., Romo, A.J., Costantini, M., Cisbani, E., Zavagli, M., Greco, B., Latest Algorithms and Scientific Developments for Forest Fire Detection and Monitoring Using MSG/SEVIRI and MODIS Sensors, IEEE, 2005, 118-123.

50 En particular, se propone un Modelo de Transferencia Radiativa analítico (RTM) que caracteriza los fenómenos radiativos que determinan la energía detectada por el sensor, expresada por medio de radiancias R_λ ($\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$) para cada banda λ en ventanas atmosféricamente transparentes en las regiones espectrales de infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo térmico (TIR). Tal como se muestra en la figura 1(a), la radiancia R_λ recogida por un sensor satelital remoto es la suma de la radiancia solar $R_{S,\lambda}$ reflejada por la Tierra, la radiancia térmica atmosférica $R_{A,\lambda}$ (tanto los componentes de corriente ascendente como de corriente descendente), y, finalmente, la emisión térmica del suelo. Dada la temperatura de fondo T_B , la emisividad ϵ_λ de la superficie de la tierra, y la transmitancia de la atmósfera τ_λ entre la superficie de la tierra y el sensor, el RTM puede expresarse como:

$$R_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} B_{\lambda}(T_B) + R_{A:\lambda} + R_{S:\lambda}, \quad (1)$$

5 donde, $B_{\lambda}(T)$ es la emisión de cuerpo negro de Planck a una temperatura T y a una longitud de onda λ . Así mismo, pueden explotarse otros modelos de RTM.

De acuerdo con C.C. Borel, W.B. Clodius, J.J. Szymanski and J.P. Theiler, Comparing Robust and Physics-Based Sea Surface Temperature Retrievals for High Resolution, Multi-Spectral Thermal Sensors Using one or Multiple Looks, Proc. of the SPIE'99, Conf. 3717-09, la principal contribución a la transmitancia τ_{λ} en las ventanas atmosféricas en las regiones NIR y TIR proviene del contenido de vapor de agua atmosférico y de las relaciones entre la transmitancia y el vapor de agua pueden parametrizarse con bastante aproximación mediante la siguiente expresión:

$$15 \quad \tau_{\lambda}(W, \vartheta) = \exp\left(-\left[\frac{A_{\lambda}}{\cos\vartheta} + B_{\lambda}\left(\frac{W}{\cos\vartheta}\right)^{C_{\lambda}}\right]\right) \quad (2)$$

20 Donde w es el vapor de agua total a lo largo del camino de terminación/inicio en/desde el pixel examinado y que tiene un ángulo de zenit θ . Los parámetros A_{λ} , B_{λ} y C_{λ} dependen (al menos) de la longitud de onda λ y pueden estimarse a través de varias simulaciones MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) (diseñadas por programas de ordenador para modelar la propagación atmosférica de la radiación electromagnética de $100\text{-}50000\text{ cm}^{-1}$ con una resolución espectral de 1 cm^{-1}) y métodos de regresión. Pueden considerarse otros modelos/métodos para estimar τ_{λ} .

25 El contenido W de vapor de agua puede estimarse tal como se describe en Eumetsat Satellite Application Facility, *Software Users Manual of the SAFNWC/MSG: Scientific part for the PGE06*, SAF/NWC/INM/SCI/SUM/06, edición 1.0, enero de 2002, pero pueden considerarse otros métodos.

30 El término solar $R_{S,\lambda}$ puede calcularse tal como se describe en el antes mencionado *Potential global fire monitoring from EOS-MODIS*:

$$35 \quad R_{S,\lambda} = E_{S,\lambda} \cos(\vartheta_S) \tau_{\lambda}(z_{SE}) \frac{1 - \epsilon_{\lambda}}{\pi} \tau_{\lambda}(z_{ED}) \quad (3)$$

40 Donde el $E_{S,\lambda}$ es la radiación del Sol en la parte superior de la atmósfera, $\tau_{\lambda}(z_{SE})$ es la transmitancia a lo largo del camino entre el Sol y la superficie de la Tierra, $\tau_{\lambda}(z_{ED})$ es la transmitancia a lo largo del camino entre la superficie de la tierra y el sensor satelital, y ϵ_{λ} es la emisividad de la superficie de la tierra. Pueden explotarse otros modelos/métodos para calcular $R_{S,\lambda}$.

La contribución de radiancia atmosférica $R_{A,\lambda}$ describe un fenómeno complejo, caracterizado por humo, aerosoles y temperaturas atmosféricas locales difíciles de modelar. Un modelo posible es el siguiente:

$$45 \quad R_{A,\lambda} = \underbrace{(1 - \epsilon_{\lambda}) \tau_{\lambda}(z_{ED}) [1 - \tau_{\lambda}(z_{TOA})]}_{\text{descendente}} B_{\lambda}(T_A) + \underbrace{[1 - \tau_{\lambda}(z_{ED})]}_{\text{ascendente}} B_{\lambda}(T_A) \quad (4)$$

50 donde, con referencia a la Figura 1(b), el $\tau_{\lambda}(z_{TOA})$ es la transmitancia a lo largo del camino vertical entre la superficie de la Tierra y la parte superior de la atmósfera, $\tau_{\lambda}(z_{ED})$ es la transmitancia a lo largo del camino entre la superficie de la Tierra y el sensor satelital, y ϵ_{λ} , es como en lo anterior, la emisividad de tierra.

La formulación Dozier tal como se describe en J. Dozier, A Method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution, Remote Sensing of Environment, 11 (1981) 221-229 y aplicado a la ecuación 1 (o otros modelos de RTM) hace una descripción de subpíxeles de los procesos radioactivos posibles, considerando la extensión del fuego (fracción de píxel f de un píxel de radiancia adquirido por el sensor satelital) y la temperatura del fuego T_F :

$$R_{\lambda} = \varepsilon_{F;\lambda} \cdot \tau_{\lambda} \cdot B_{\lambda}(T_F) \cdot f + \varepsilon_{B;\lambda} \cdot \tau_{\lambda} \cdot B_{\lambda}(T_B) \cdot (1 - f) + R_{A;\lambda} + R_{S;\lambda}, \quad (5)$$

donde $\varepsilon_{F;\lambda}$ y $\varepsilon_{B;\lambda}$ son las emisividades del fuego y de fondo, respectivamente, a la longitud de onda λ .

De acuerdo con el sistema de detección temprana de fuego antes mencionado con base en imágenes multitemporales de satélites geoestacionarios y polares, si se consideran dos adquisiciones sucesivas, la formulación de Dozier (5) puede escribirse como sigue:

$$\Delta R_{\lambda,t} \equiv R_{\lambda,t} - R_{\lambda,t-\Delta t} = \varepsilon_{\lambda} \cdot \tau_{\lambda,t} \cdot [B_{\lambda}(T_F) - B_{\lambda}(T_B)] \cdot \Delta f \quad (6)$$

donde t y $t-\Delta t$ denotan dos tiempos de adquisición cercanos, y $\Delta f = f_t - f_{t-\Delta t}$ y donde se hacen las siguientes suposiciones:

- la temperatura de fondo T_B es constante entre dos adquisiciones consecutivas (durante 15 minutos para datos MSG SEVIRI);
- la emisividad del fuego es la misma que la emisividad de la superficie que no se está quemando; y
- los términos solar y atmosférico ($R_{S;\lambda}$, $R_{A;\lambda}$), se consideran constantes entre dos adquisiciones consecutivas (dentro de los 15 minutos para los datos MSG SEVIRI).

El RTM (1) y las ecuaciones (2), (3), (4), (5) y (6) presentadas son fiables solamente si no hay nubes en la escena analizada. Por lo tanto, es necesario un procedimiento fiable de enmascaramiento de nubes para identificar las adquisiciones que son compatibles con las suposiciones del modelo físico. Se han desarrollado muchas técnicas para el enmascaramiento de nubes explotando los sensores polares o geoestacionarios. Básicamente, todas estas técnicas se basan en la aplicación de los criterios de umbral a las relaciones analíticas entre las diferentes bandas de una adquisición individual. Los métodos para recolectar tales relaciones entre las bandas espectrales pueden basarse en modelos físicos o en modelos de aprendizaje con base en redes neuronales. Las redes Bayesianas, las máquinas de vector de soporte todas las cuales requieren una fase de preprocesamiento para el entrenamiento del sistema. También las técnicas contextuales que explotan la información espacial son conocidas en la literatura.

OBJETO Y RESUMEN DE LA INVENCION

El solicitante ha notado que el análisis divulgado en el antes mencionado *Sistema de detección temprana de fuegos con base en imágenes multitemporales de satélites geoestacionarios y polares* y representado por la ecuación (6) donde se explotaron dos adquisiciones sucesivas sufre de aproximaciones bastas y fuertes restricciones que llevan a resultados no satisfactorios para aplicaciones fiables. En particular, mientras la contribución atmosférica en el RTM puede considerarse que cambia lentamente con el tiempo, la estimación de la contribución atmosférica $R_{A;\lambda}$ dada por la ecuación (4) en combinación con la ecuación (2), en el RTM se ve afectada por una gran incertidumbre debido a ruido e inexactitud en el modelo, y la forma no lineal dada por la ecuación (5) amplifica esta incertidumbre, haciendo que la estimación de los parámetros de fuego sea no fiable.

Además, el Solicitante también ha notado que, en cada nueva adquisición, se resuelve la ecuación (6) y Δf , T_F y T_B se estiman sin explotar resultados previamente computados, esto es, Δf , T_F y T_B computados para las adquisiciones previas.

El objetivo de la presente invención es proporcionar una técnica automática mejorada para la detección de fuegos a partir de datos multiespectrales de satélites geoestacionarios lo cual supera las limitaciones de las técnicas conocidas.

Este objetivo se alcanza mediante la presente invención en cuanto que se relaciona con un método para detectar automáticamente fuegos sobre la superficie de la Tierra y fenómenos atmosféricos tales como nubes, velos, brumas o similares, por medio de una sistema de satélites, tal como se define en las reivindicaciones anexas.

5 La presente invención se origina en la observación del Solicitante de que muchas variables físicas en la ecuación (1), tales como la contribución atmosférica $R_{A,\lambda}$, la contribución solar $R_{S,\lambda}$, las transmitancias τ_λ y las emisividades ϵ_λ están altamente correlacionadas de forma temporal. Por esta razón, el conocimiento y la explotación de muchas adquisiciones de la misma escena permiten que se recupere la información de interés, tales como fuegos, nubes y estimaciones de parámetros físicos con una exactitud y robustez más alta que cuando se consideran solamente una o dos adquisiciones.

10 En particular, la presente invención alcanza el objetivo antes mencionado explotando, además de la información espectral y espacial, también la información temporal contenida en las adquisiciones muy frecuentes hechas por los sensores geoestacionarios, con el fin de detectar incluso fuegos pequeños (mucho más pequeños que la resolución espacial del sensor), nubes y temperatura del suelo con robustez y exactitud. En particular, la presente invención se basa en el uso combinado de un modelo físico del proceso de transferencia radiativa y un algoritmo predictivo adaptable puramente matemático para invertir (resolver) el RTM descrito por las ecuaciones (1) y (5) explotando un alto número de adquisiciones, mucho mayor que 2. Con respecto a esta técnica basada en la ecuación (6), esta técnica de la inversión basada en muchas adquisiciones y en información espectral y espacial permite estimar los parámetros físicos de interés con mayor exactitud y robustez.

20 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Para un mejor entendimiento de la presente invención, se describirán ahora realizaciones preferidas, que están previstas únicamente a manera de ejemplo y no deben considerarse como limitantes con referencia a los dibujos anexos (no todos a escala), donde:

- La Figura 1 (a) muestra esquemáticamente contribuciones diferentes de la radiancia adquirida por un sensor satelital;
- La Figura 1 (b) muestra la geometría de la radiancia térmica descendente emitida por la atmósfera;
- 30 • La Figura 2 (a) muestra las radiancias de una región de la Tierra con actividades de fuego sucesivas adquiridas por el sensor MSG/SEVIRI durante un día;
- Las Figuras 2 (b) y 2 (c) muestran la temperatura de fondo estimada y la extensión del fuego, respectivamente, en la región de la Tierra de la Figura 2 (a) de acuerdo con una realización preferida de la invención;
- Las Figuras 3 (a) y 3 (b) muestran gráficas de radiancias de una región de la Tierra medidas y predichas de acuerdo con la segunda realización preferida de la invención;
- 35 • La Figura 4 muestra una tabla con la lista de las probabilidades de detección de fuego correspondientes al área quemada global de acuerdo con la presente invención; y
- La Figura 5 muestra una tabla con la lista de la tasa de detecciones falsas correspondientes a la extensión de fuego estimada de acuerdo con la presente invención.

40 **DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS REALIZACIONES PREFERIDAS DE LA INVENCION**

La siguiente descripción tiene como objetivo capacitar a una persona experimentada en la técnica para llevar a cabo y usar la invención. Diversas modificaciones de las realizaciones serán evidentes fácilmente para las personas experimentadas en la técnica, sin apartarse del alcance de la presente invención tal como se reivindica.

Con el fin de mejorar la confiabilidad de la estimación de los parámetros de fuego, en la presente invención se utiliza convenientemente un diferencial, o más precisamente una forma de diferencia finita del RTM de Dozier, donde se consideran las diferencias de las radiancias en dos adquisiciones en tiempo cercano:

50

$$\Delta R_{\lambda,t} \equiv R_{\lambda,t} - R_{\lambda,t-\Delta t} = \epsilon_{F,\lambda} \cdot \tau_{\lambda,t} \cdot B_\lambda(T_F) \cdot [f_t - f_{t-\Delta t}] + \epsilon_{B,\lambda} \cdot \tau_{\lambda,t} \cdot [B_\lambda(T_{B,t}) \cdot (1 - f_t) - B_\lambda(T_{B,t-\Delta t}) \cdot (1 - f_{t-\Delta t})] + R_{S,\lambda,t} - R_{S,\lambda,t-\Delta t} \quad (7)$$

En la ecuación (7) el término atmosférico $R_{A,\lambda}$ ha sido rechazado porque se asume sin cambios a lo largo de pocas adquisiciones (del orden de decenas de minutos). Adicionalmente, puesto que se consideran bandas diferentes, la parte no correlacionada espectralmente de las perturbaciones se filtra en la solución de (7). Esta ecuación puede considerarse para los canales SEVIRI en las ventanas atmosféricas con el fin de formar un sistema de ecuaciones solucionable.

Con el fin de eliminar las aproximaciones bastas que afectan la ecuación (6) y las suposiciones sobre las cuales se basa, se han introducido varios parámetros. En efecto, las temperaturas de suelo en $T_{B,t}$ y $T_{B,t-\Delta t}$ a diferentes tiempos se consideran diferentes, los términos solares $R_{S,\lambda,t}$ y $R_{S,\lambda,t-\Delta t}$ no son rechazados, y las emisividades de fuego y suelo $\epsilon_{F,\lambda}$ y $\epsilon_{B,\lambda}$ se consideran diferentes.

La ecuación (7) tiene más variables desconocidas que la ecuación (6) y puede resolverse por medio de una aproximación de sistema dinámico. En efecto, la ecuación diferencial (o de diferencias finitas) Dozier RTM puede considerarse como un sistema dinámico con las variables de estado f_t y $T_{B,t}$:

$$\begin{pmatrix} f_t \\ T_{B,t} \end{pmatrix} = F \left(\begin{pmatrix} f_{t-\Delta t} \\ T_{B,t-\Delta t} \end{pmatrix}, T_F, \Delta R_{\lambda,j}, \Delta R_{S,\lambda,j}, \epsilon_{F,\lambda}, \epsilon_{B,\lambda}, \tau_{\lambda,j}; \Lambda \right), \quad (8)$$

donde, t y $t-\Delta t$ denotan dos tiempos de adquisición cercanos, $\Delta R_{\lambda,j} = R_{\lambda,j} - R_{\lambda,j,t-\Delta t}$, $\Delta R_{S,\lambda,j} = R_{S,\lambda,j} - R_{S,\lambda,j,t-\Delta t}$, y Λ es un conjunto de longitudes de onda correspondientes a los canales disponibles en las ventanas atmosféricas.

La ecuación dinámica (8) describe el comportamiento dinámico en el tiempo del RTM de Dozier, donde las variables en el tiempo t (f_t y $T_{B,t}$) pueden estimarse por medio del conocimiento de las variables calculadas en el tiempo previo $t-\Delta t$. En particular, por ejemplo, el término solar puede calcularse por medio de la ecuación (3) y las emisividades tal como se describen en el antes mencionado *Sistema de detección temprana de fuegos con base en imágenes multitemporales de satélites geoestacionarios y polares*, pero pueden considerarse otros métodos/modelos. La transmitancia, por ejemplo, puede estimarse por medio de una parametrización similar a la ecuación (2). El análisis de sensibilidad en la ecuación (8) y la prueba sobre los datos reales han demostrado que la temperatura del fuego T_F puede considerarse fija (a aproximadamente 700°K) con el fin de incrementar la exactitud de la estimación de la fracción de píxel. Sin embargo, la temperatura del fuego T_F podría considerarse como una variable desconocida, generalizando adicionalmente la ecuación dinámica (8).

La metodología del sistema dinámico expresada en la ecuación (8) representa un modelo físico del proceso de transferencia radiativa.

La introducción de variables desconocidas adicionales, tal como se muestra en la ecuación (7), y el uso de la aproximación de sistema dinámico mostrada en la ecuación (8) permite que la fracción de píxel y la temperatura de fondo sean estimadas con mayor exactitud y robustez con respecto a la metodología basada en la ecuación (6).

En cada adquisición, se necesitan al menos dos bandas para resolver la ecuación (8) y para estimar las variables de estado f_t y $T_{B,t}$. Si hay canales adicionales disponibles, su explotación hace que la solución sea más exacta. El canal MIR (3.9 μm de longitud de onda) es particularmente sensible a la presencia de fuegos y se utiliza en cada algoritmo para la detección de fuegos a partir de sensores remotos. Desafortunadamente, en el sensor SEVIRI el canal MIR tiene un nivel de saturación bajo que no permite su uso para monitorizar grandes fuegos. La ecuación (8) puede resolverse incluso si no puede utilizarse el canal MIR debido a que está saturado. Además, la solución de la ecuación (8) es particularmente robusta para vacíos de datos, que se presentan cuando faltan algunas adquisiciones o no pueden utilizarse debido al cubrimiento por nubes. En efecto, los parámetros de fuego pueden estimarse aun utilizando adquisiciones suficientemente cercanas en vez de dos consecutivas.

La exactitud de la estimación de la fracción de píxel f_t puede mejorarse notablemente si las oscilaciones con el periodo diario se suprimen con un filtro paso alto. Esta filtración se lleva a cabo eliminando de la última fracción de píxel estimada por la ecuación (8) el promedio de las fracciones de píxel disponibles N previas consecutivas (por ejemplo 5 fracciones de píxel son suficientes):

$$\hat{f}_t = f_t - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{t-\Delta t_i} \quad (9)$$

5

La fracción de píxel filtrada \hat{f}_t se explota de forma útil para la detección de fuego. En efecto, la exactitud de la estimación de la fracción de píxel filtrada obtenida utilizando cuatro bandas del sensor SEVIRI-MSG (canales 1 MIR y 3 TIR) en la ventana atmosférica es aproximadamente 10^{-5} .

10

La Figura 2 (a) muestra las radiancias SEVIRI (temperatura de brillo de las bandas infrarroja media e infrarroja térmica 3.9 μm , 8.7 μm , 10.8 μm , 12 μm) adquiridas durante aproximadamente un día en un píxel con actividades de fuego sucesivas, mientras que las Figuras 2 (b) y 2 (c) muestran la temperatura de fondo estimada correspondiente y la fracción de píxel estimada, respectivamente.

15

Se detecta fuego cuando la fracción de píxel filtrada \hat{f}_t está por encima de un umbral dado. Se ha obtenido un buen compromiso entre las probabilidades de detección y de una falsa alarma con un umbral que corresponde a un tamaño de fuego activo de aproximadamente 2000 m^2 utilizando datos MSG/SEVIRI.

20

Como se dijo previamente, la exactitud de la estimación de los parámetros de fuego y la detección y la aparición de falsas alarmas se reducen significativamente cuando surgen nubes, bordes de nubes, nubes delgadas, velos, brumas (o similares) y condiciones de baja transmitancia atmosférica. Es necesario un procedimiento de enmascaramiento de nubes confiable para identificar las adquisiciones que son compatibles con las suposiciones del modelo físico.

25

Con el fin de reconocer estas condiciones atmosféricas desfavorables, se propone un algoritmo predictivo adaptable que explote la información temporal y las correlaciones contenidas en un alto número de adquisiciones con el fin de detectar nubes y fuegos.

30

La idea es que la radiancias varíen lentamente durante un día y que tengan una periodicidad intrínseca de aproximadamente un día, mientras que la presencia de nubes y/o fuegos añada oscilaciones de alta frecuencia, lo que también induce vacíos de datos. La cuasi-periodicidad de las radiancias observadas durante un día de cielos claros sin fuegos puede modelarse utilizando pocas funciones armónicas, y el modelo necesita ser adaptado con el fin de seguir las variaciones estacionales y otras variaciones lentas.

35

En particular, el algoritmo predictivo adaptable permite llevar a cabo un modelo predictivo adaptado, donde, al explotar los datos SEVIRI/MSG, se considera una secuencia de radiancia espectral de 24 horas constituida por una pluralidad de adquisiciones en 96 tiempos de adquisición (cada 15 minutos). El modelo se basa en la estimación y filtración del espectro de la secuencia de radiancia espectral de 24 horas. El espectro se evalúa por medio de una Transformada de Fourier Discreta; luego un filtro paso bajo selecciona las armónicas de interés y, finalmente, la señal filtrada con bajo paso se retrotransforma. El modelo predictivo adaptado es la señal retrotransformada filtrada con bajo paso que es capaz de proporcionar valores predichos de radiancia.

40

En lo que sigue se describirá el algoritmo predictivo adaptado etapa por etapa.

45

La primera etapa consiste en formar, para cada píxel, un vector h_λ ($h_\lambda(n)$, $n=0, \dots, 95$) que contiene una secuencia de 96 radiancias espectrales consecutivas en el tiempo R_λ con relación a 24 horas y no necesariamente adquiridas durante precisamente el mismo día. Si algunas adquisiciones no están disponibles, las radiancias espectrales relativas pueden computarse por interpolación con base en adquisiciones adyacentes.

50

En efecto, para cada píxel, se necesitan varias radiancias adquiridas por el sensor satelital a diferentes tiempos y no afectadas por nubes o fuegos.

En particular, el vector h_λ puede ser formado convenientemente considerando varios días vecinos. Una adquisición libre de nubes para cada elemento del vector puede reconocerse como la que asume el máximo valor de radiancia espectral en una banda TIR entre aquellas que correspondan al mismo elemento de vector en los días considerados. Se adopta un criterio adicional para reconocer las adquisiciones libres de fuegos en una banda MIR. Una adquisición libre de fuegos para cada elemento de vector libre de nubes ya seleccionado puede reconocerse como la que asume el mínimo valor de radiancia espectral en una banda MIR entre las que correspondan al mismo elemento de vector en los días considerados.

La segunda etapa del algoritmo predictivo adaptado consiste en el cómputo de la Transformada de Fourier Discreta (DFT) del vector h_λ , obteniéndose así un vector H_λ con 96 elementos definidos como:

$$H_\lambda(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_\lambda(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk}, \quad k = 0, \dots, 95 \quad (10)$$

La tercera etapa consiste en el cómputo de un modelo predictivo adaptable asociado a la banda $\lambda \mu\text{m}$. El modelo predictivo adaptable es un vector m_λ constituido por 96 elementos y se define como:

$$m_\lambda(n) = \frac{1}{N} H_\lambda(k) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^A \left[H_\lambda(k) e^{j \frac{2\pi}{N} nk} + H_\lambda(N-k) e^{j \frac{2\pi}{N} n(N-k)} \right], \quad (11)$$

En particular, m_λ es la Transformada de Fourier Discreta inversa de la Transformada de Fourier Discreta filtrada paso bajo del vector h_λ . El filtro paso bajo selecciona el componente continuo (armónico 0) y el primer armónico A (1, 2, ..., A) de la Transformada de Fourier Discreta del vector h_λ . Por ejemplo, con A=2 el modelo es lo suficientemente fiable como para ajustarse con una tendencia de radiancia no nubosa durante 24 horas.

Cada muestra n del modelo m_λ contiene el valor predicho para la radiancia espectral adquirida en un momento dado del día. Por esta razón es necesario almacenar el índice \bar{n} lo cual señala el elemento de m_λ con respecto a la última adquisición. En particular, suponiendo que la adquisición actual en el tiempo t es relativo al índice \bar{n} la radiancia predicha en el tiempo t está dada por el valor $m_\lambda(\bar{n})$:

$$R_{PRD,\lambda} = m_\lambda(\bar{n}) = \frac{H_\lambda(0)}{N} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^A \left[H_\lambda(k) e^{j \frac{2\pi}{N} \bar{n}k} + H_\lambda(N-k) e^{j \frac{2\pi}{N} \bar{n}(N-k)} \right] \quad (12)$$

La cuarta etapa del algoritmo predictivo adaptado es la detección de nubes/fuego que consiste en revisar si la radiancia espectral predicha $R_{PRD,\lambda}$ difiere de la radiancia espectral adquirida correspondiente R_λ utilizando algunos umbrales. La detección de nubes considera los datos adquiridos a 10.8 μm o a 12.0 μm , mientras que la detección de fuego considera los datos adquiridos a 3.9 μm .

En particular, los umbrales utilizados en tal procedimiento de detección son tres. El primero $th_{DET,10.6}$ y el segundo $th_{DET,12}$ se utilizan para la detección de nubes permitiendo una comparación entre los valores predichos a 10.8 μm o a 12 μm y las radiancias espectrales adquiridas en tales bandas. El tercer umbral $th_{DET,3.9}$ se utiliza para la detección de fuego de una forma similar en la banda de la banda de 3.9 μm .

Más en detalle, comparando el valor predicho $R_{PRD,\lambda}$ con la radiancia espectral adquirida R_λ , se detecta una nube

- si $R_{PRD,10.8} - R_{10.8} > th_{DET,10.8}$; 0
 - si $R_{PRD,12} - R_{12} > th_{DET,12}$;
- y se detecta un fuego, también si se ha detectado una nube,

- si $R_{3,9} - R_{PRD,3,9} > th_{DET,3,9}$.

El algoritmo predictivo adaptable es capaz de detectar correctamente dos tipos diferentes de nubes: nubes espesas y delgadas.

5

Las Figuras 3 (a) y 3 (b) muestran gráficas de radiancias medidas y predichas de acuerdo con el algoritmo predictivo adaptable durante días nubosos. En particular, en la Figura 3 (a) se muestra la detección de nubes en ausencia de fuego mientras que en la Figura 3 (b) se muestra la detección tanto de nubes como de fuego.

10

La quinta etapa del algoritmo predictivo adaptable consiste en la actualización del vector h_λ con el fin de seguir variaciones estacionales y otras variaciones lentas de las radiancias. Si una adquisición es válida y no está identificada como un fuego o una nube, se utiliza para actualizar el vector h_λ . También en este procedimiento se utilizan tres umbrales, $th_{UPD,10,8}$, $th_{UPD,12}$ y $th_{UPD,3,9}$ para identificar los datos válidos que se van a usar para la actualización del vector h_λ .

15

En particular, las radiancias adquiridas $R_{10,8}$, R_{12} y $R_{3,9}$ se consideran válidas si no se detectan anomalías:

- una anomalía a 10.8 μm se detecta si $R_{PRD,10,8} - R_{10,8} > th_{UPD,10,8}$;
- una anomalía a 12 μm se detecta si $R_{PRD,12} - R_{12} > th_{UPD,12}$; y
- una anomalía a 3.9 μm se detecta si $R_{3,9} < R_{FRD,3,9} - th_{UPD,3,9}$ o si $R_{3,9} > R_{PRD,3,9} + th_{UPD,3,9}$.

20

Si la radiancia actual R_λ es válida, reemplaza en el vector h_λ la radiancia contenida en la posición \bar{n} (índice relativo a la adquisición actual R_λ); de otra forma con la radiancia predicha $R_{PRD,\lambda}$ reemplaza en el vector h_λ el valor de radiancia contenido en la posición \bar{n} .

25

A cada nueva adquisición, el puntero \bar{n} es un módulo 96 incrementado y el procedimiento antes descrito se repite partiendo la segunda etapa del algoritmo predictivo adaptable.

30

Nótese que el algoritmo puede generalizarse y pueden aplicarse pruebas sobre la validez de las radiancias o sobre la presencia de fuegos o nubes también a las adquisiciones en tiempos antes del último, con el fin de refinar resultados previamente obtenidos con base también en los nuevos datos a medida que se hacen disponibles.

35

El modelo predictivo adaptable tiene altas capacidades de trazado aun con series de adquisiciones a largo plazo afectadas por cubrimiento por nubes o datos ausentes.

40

El algoritmo predictivo adaptable se utiliza como una etapa de preprocesamiento para determinar cuándo puede aplicarse el modelo físico. Si no se detectan nubes mediante el algoritmo predictivo adaptable en el píxel analizado, junto con el modelo predictivo adaptable también puede explotarse el modelo físico con el fin de detectar fuegos y estimar el tamaño de los fuegos (fracción de píxel f_i) y la temperatura de fondo T_B ; de otra forma, cuando las nubes cubren el píxel analizado, solamente el algoritmo predictivo adaptable puede aun detectar fuegos potentes. Un ejemplo de este segundo caso se muestra en la Figura 3 (b), donde se detecta un fuego bajo nubes delgadas. El análisis de la banda de 10.8 μm resalta la presencia de nubes que son detectadas correctamente por el algoritmo predictivo adaptable. Los resultados oscilantes se deben al encuentro alternado de pequeñas nubes y cielos claros. Se detecta un fuego grande mediante el algoritmo predictivo adaptable, aunque haya nubes presentes y no pueda utilizarse el modelo físico.

45

50

Una validación del método de detección de fuegos automático descrito aquí se ha ejecutado utilizando datos de suelos verdaderos relativos a las regiones italianas de Cerdeña, Lazio y Calabria, proporcionados por el Departamento de Protección Civil Italiano. Se han considerado dos periodos de 15 días consecutivos en julio de 2004 y 15 días consecutivos en agosto de 2005. Estos periodos se caracterizaron por días no muy nubosos y una gran cantidad de ocurrencias de fuegos, en particular presentándose 286 fuegos en áreas mayores de una hectárea.

La validación ha sido llevada a cabo comparando los resultados obtenidos mediante el método de detección automática de fuegos y los datos de tierra verdaderos. En particular, los fuegos han sido clasificados en cinco grupos dependiendo

del tamaño del área quemada según se reporta en los datos verdaderos de tierra. Con relación a esto es importante anotar que el método de detección automática de fuegos detecta el tamaño de la línea frontal de la llama, el cual es el tamaño del fuego activo real y es mucho más pequeño que el área global quemada, mientras que los datos verdaderos de tierra reportan solamente el tamaño del área global quemada.

5

Para cada clase de tamaño de área quemada la probabilidad de detección ha sido estimada como la tasa de detección: $P_d = N_{TP} / (N_{TP} + N_{FN})$, donde N_{TP} es el número de casos positivos verdaderos y N_{FN} es el número de los falsos negativos. Los resultados se reportan en la Tabla mostrada en la Figura 4. Como se muestra en la Figura 4, la probabilidad de detección de fuego se incrementa con el incremento del área global quemada. La probabilidad de alarmas falsas se ha estimado por medio de la tasa de alarma falsa: $P_{fa} = N_{FP} / (N_{FP} + N_{TN})$, donde N_{FP} es el número de eventos falsos positivos y N_{TN} es el número de eventos verdaderos negativos.

10

La probabilidad de la falsa alarma no depende del tamaño del fuego; de hecho la estimación encontrada en la validación ejecutada ha sido $P_{fa} = 5.36 \cdot 10^{-6}$, lo que significa que solamente se detectaron erróneamente 5 píxeles por millón como fuegos.

15

Otro índice interesante de la confiabilidad del método de detección automática de fuegos es la tasa de detecciones falsas, definida como $P_{fd} = N_{FP} / (N_{FP} + N_{TP})$. Esta variable depende del tamaño de fuego estimado, esto es, de la fracción de píxeles estimada (f_t). En la Figura 5 se muestra una tabla que presenta la tasa de detección falsa para tamaños de fuegos estimados diferentes. Como se muestra en la Figura 5, la tasa de detección falsa disminuye con el incremento del tamaño de fuego estimado.

20

De lo anterior, puede apreciarse inmediatamente que el método de detección automático de fuegos aquí divulgado permite llevar a cabo una detección fiable y robusta de fuegos tanto en presencia como en ausencia de nubes. En particular, en ausencia de nubes que cubran el píxel analizado, el método es capaz de detectar de forma fiable un fuego y estimar el tamaño del fuego y la temperatura de fondo, mientras que, en presencia de nubes delgadas, aun es capaz de detectar fuegos. Además, el algoritmo predictivo adaptable es capaz de detectar correctamente la presencia de nubes gruesas y delgadas.

25

Finalmente, es claro que pueden hacerse numerosas modificaciones y variantes a la presente invención tal como se define en las reivindicaciones anexas.

30

REIVINDICACIONES

- 5
1. Un método para detectar automáticamente fuegos sobre la superficie de la tierra por medio de un sistema satelital que comprende:
- 10
- adquirir imágenes multiespectrales de la Tierra en diferentes tiempos por medio de un sensor satelital multiespectral, siendo cada imagen multiespectral una colección de imágenes espectrales simples asociada cada una con una longitud de onda respectiva (λ), constituyéndose cada imagen espectral simple de pixeles indicativo cada uno de una radiancia espectral (R_λ) de un área respectiva de la Tierra;
 - proveer un modelo físico relacionado con radiaciones espectrales (R_λ) de los pixeles en las imágenes multiespectrales adquiridas en diferentes tiempos con respecto a variables físicas que representan fenómenos termodinámicos que ocurren en la superficie de la Tierra, incluyendo un posible fuego sobre la superficie de la Tierra, en la atmósfera de la Tierra, tales como nubes, velos o brumas, y relacionadas con las posiciones relativas de la Tierra y el Sol;
- 15
- caracterizado por:
- computar el modelo físico, para al menos un píxel considerado en un tiempo dado (t), una temperatura de fondo ($T_{B,t}$) y una fracción de píxel (f_t) que se representa una extensión de un posible fuego en un área de la superficie de la Tierra correspondiente al píxel considerado sobre la base de la radiancia espectral ($R_{\lambda,t}$) del píxel considerado en el tiempo dado (t), de una radiancia espectral previamente adquirida ($R_{\lambda,t-\Delta t}$) del píxel considerado, de la fracción de píxel ($f_{t-\Delta t}$) previamente computada en el mismo modelo físico para el mismo píxel considerado, y de la temperatura de fondo ($T_{B,t-\Delta t}$) previamente computada en el mismo modelo físico para el mismo píxel considerado; y
 - detectar un fuego en un área de la superficie de la Tierra con base en la fracción de píxel (f_t) computada en el modelo físico para el píxel correspondiente.
- 20
2. El método de la reivindicación 1, donde se provee un modelo físico que comprende:
- proveer un sistema de ecuación multiespectral dinámico que comprende al menos una ecuación espectral simple asociada con una longitud de onda respectiva (λ), y relacionar las radiancias espectrales (R_λ) de los pixeles en imágenes espectrales sencillas adquiridas en tiempos diferentes a las variables físicas en los mismo tiempos;
- 25
- y donde el cálculo del modelo físico, para al menos un píxel considerado, en un tiempo dado (t), una temperatura de fondo ($T_{B,t}$) y una fracción de píxel (f_t) comprende:
- computar la fracción de píxel (f_t) y la temperatura de fondo ($T_{B,t}$) resolviendo el sistema de ecuaciones multiespectrales dinámicas en un tiempo dado (t) para el píxel considerado sobre la base de una fracción de píxel ($f_{t-\Delta t}$) y la temperatura de fondo ($T_{B,t-\Delta t}$) computada previamente resolviendo el sistema de ecuaciones multiespectral dinámico en un tiempo previo ($T_{t-\Delta t}$) para el mismo píxel considerado.
- 30
3. El método de la reivindicación 2, donde las ecuaciones espectrales sencillas del sistema de ecuaciones multiespectrales dinámico se basan en diferencias entre las ecuaciones que relacionan las radiancias espectrales (R_λ) adquiridas en tiempos diferentes y las variables físicas en los mismos tiempos.
- 35
4. El método de acuerdo con la reivindicación 2 o 3, donde las variables físicas en el modelo físico comprenden una o más de las siguientes variables:
- 40
- una temperatura de fuego (T_F);
 - una radiancia del Sol ($R_{S,\lambda}$);
 - una emisividad de fuego ($\epsilon_{F,\lambda}$);
 - una emisividad de fondo ($\epsilon_{B,\lambda}$); y
 - una transmitancia de la atmósfera de la Tierra (T_λ).
- 45
5. El método de la reivindicación 4 donde el sistema de ecuaciones multiespectrales dinámico es:
- 50

$$\begin{pmatrix} f_t \\ T_{B,t} \end{pmatrix} = F \left(\begin{pmatrix} f_{t-\Delta t} \\ T_{B,t-\Delta t} \end{pmatrix}, T_F, \Delta R_{\lambda,t}, \Delta R_{S,\lambda,t}, \epsilon_{F,\lambda}, \epsilon_{B,\lambda}, \tau_{\lambda,t}; \Lambda \right)$$

donde t y $t-\Delta t$ denotan dos tiempos diferentes, λ denota una longitud de onda considerada, f_t y $f_{t-\Delta t}$ denotan la fracción de píxel, $T_{B,t}$ y $T_{B,t-\Delta t}$ denotan la temperatura de fondo, T_F denota una temperatura de fuego, $\Delta R_{\lambda,t} = R_{\lambda,t} - R_{\lambda,t-\Delta t}$ denota una diferencia de radiancia espectral, $\Delta R_{S,\lambda,t} = R_{S,\lambda,t} - R_{S,\lambda,t-\Delta t}$ denota una diferencia de radiancia del Sol, $\epsilon_{F,\lambda}$ denota la emisividad de fuego, $\epsilon_{B,\lambda}$ denota la emisividad de fondo, $\tau_{\lambda,t}$ denota las transmitancia de la atmósfera de la tierra y Λ denota un conjunto de longitudes de onda consideradas (λ); y donde:

- la fracción de píxel (f_t) y la temperatura de fondo ($T_{B,t}$) en el momento t se obtienen resolviendo el sistema de ecuación multiespectral dinámico;
- la diferencia de radiancia espectral ($\Delta R_{S,\lambda,t}$) se computa directamente a partir de las imágenes multiespectrales adquiridas;
- la temperatura de fuego (T_F), la diferencia de radiancia del Sol ($\Delta R_{S,\lambda,t}$), la emisividad de fuego ($\epsilon_{F,\lambda}$), la emisividad de fondo ($\epsilon_{B,\lambda}$) y la transmitancia de la atmósfera de la Tierra ($\tau_{\lambda,t}$) se computan independientemente;
- la fracción de píxel ($f_{t-\Delta t}$) y la temperatura de fondo ($T_{B,t-\Delta t}$) en el tiempo $t-\Delta t$ se computan resolviendo el sistema de ecuaciones multiespectral dinámico en un iteración previa donde en la primera iteración la extensión de fuego ($f_{t-\Delta t}$) y la temperatura de fondo ($T_{B,t-\Delta t}$) se definen independientemente en valores respectivos.

6. El método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, donde la detección de un fuego en un área de la superficie de la Tierra con base en la fracción de píxel (f_t) computada en el modelo físico para el píxel correspondiente incluye:

- filtrar la fracción de píxel (f_t) computada en el modelo físico para un píxel sustrayéndole un valor correlacionado con una secuencia filtrada en paso bajo de fracciones de píxel en ($f_{t-\Delta t}$) previamente computadas; y
- detectar un fuego en un área de la superficie de la tierra donde la fracción de píxel filtrada (f_t) computada en el modelo para el píxel correspondiente es mayor que un umbral dado.

7. El método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, que comprende adicionalmente:

- computar un modelo predictivo adaptable que predice radiancias espectrales ($R_{PRD,\lambda}$) en un tiempo considerado para los pixeles considerados sobre la base de radiancias espectrales previamente adquiridas (R_λ) de los pixeles considerados, y de radiancias espectrales ($R_{PRD,\lambda}$) predichas previamente para los mismos pixeles considerados por dicho modelo predictivo adaptable;
- comparar las radiancias espectrales adquiridas (R_λ) de los pixeles considerados en un tiempo considerado con las radiancias espectrales ($R_{PRD,\lambda}$) predichas en el mismo tiempo considerado para los mismos pixeles considerados mediante el modelo predictivo adaptable;
- detectar un fuego en áreas de la superficie de la Tierra o un fenómeno atmosférico en áreas de la atmósfera de la Tierra correspondientes a los pixeles considerados sobre la base de un resultado de la comparación; y,
- cuando no se detecta un fenómeno atmosférico en un área de la atmósfera de la Tierra correspondiente a un píxel considerado, computar en el modelo físico la temperatura de fondo ($T_{B,t}$) y la fracción de píxel (f_t) para dicho píxel considerado y detectar un fuego en un área de la superficie de la Tierra correspondiente a dicho píxel considerado en la fracción de píxel computada (f_t).

8. El método de la reivindicación 7, donde el cómputo de un modelo predictivo adaptable incluye:

- para cada píxel considerado computar un análisis armónico temporal de las radiancias espectrales del píxel relacionado en diferentes tiempos, y adquirido en, o predicho para la misma longitud de onda (λ); y
 - computar el modelo predictivo adaptable con base en componentes de baja frecuencia computados a partir de las radiancias espectrales de manera que se eliminen por filtración los cambios de alta frecuencia en las radiancias espectrales debidos a fuegos sobre la superficie de la Tierra o fenómenos atmosféricos.
- 5
9. El método de la reivindicación 8, donde el análisis armónico temporal es un análisis de Fourier.
10. El método de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, donde la detección de un fuego en un área de la superficie de la Tierra o un fenómeno atmosférico en un área de la atmósfera de la Tierra correspondientes a un píxel considerado comprende:
- 10
- detectar un fenómeno atmosférico si la radiancia espectral adquirida (R_λ) del píxel es inferior a la radiancia espectral predicha correspondiente ($R_{PRD,\lambda}$) de un valor de umbral dado ($th_{DET,\lambda}$); y
 - Detectar un fuego si la radiancia espectral adquirida (R_λ) del píxel es superior a la radiancia predicha espectral correspondiente ($R_{PRD,\lambda}$) de un valor de umbral dado ($th_{DET,\lambda}$).
- 15
11. El método de la reivindicación 10, donde se detecta un fenómeno atmosférico en un área de la atmósfera de la Tierra correspondiente a un píxel utilizando el modelo predictivo adaptable, la radiancia espectral adquirida del píxel ($R_{10,8}$) y el umbral ($th_{DET,10,8}$) asociados con la longitud de onda de 10.8 μm o utilizando el modelo predictivo adaptable, la radiancia espectral adquirida del píxel (R_{12}) y el umbral ($th_{DET,12}$) asociados con la longitud de onda de 12 μm ; y donde se detecta un fuego en un área de la superficie de la Tierra correspondiente a un píxel utilizando el modelo predictivo adaptable, la radiancia espectral adquirida del píxel ($R_{3,9}$) y el umbral ($th_{DET,3,9}$) asociados con la longitud de onda de 3.9 μm .
- 20
- 25
12. El método de acuerdo con cualquier reivindicación 8-11, donde el cómputo, para cada píxel considerado de un análisis armónico temporal incluye:
- formar un vector (h_λ) que contiene las radiancias espectrales relacionadas con tiempos diferentes, y adquiridas en o predichas para la misma longitud de onda (λ) y
 - computar el análisis armónico temporal del vector (h_λ).
- 30
- 35
13. El método de la reivindicación 12, donde la formación de un vector (h_λ) comprende:
- formar un vector inicial (h_λ) que contiene radiancias espectrales (R_λ) del píxel considerado adquiridas en la misma longitud de onda (λ) en tiempos diferentes y no afectadas por fuegos, nubes, velos o brumas.
- 40
- 45
14. El método de la reivindicación 13, donde la formación de un vector inicial (h_λ) comprende:
- considerar varios días vecinos;
 - reconocer una adquisición libre de nubes para cada elemento de vector como la que asume el valor máximo de radiancia espectral en las bandas de longitud de onda de 10.8 o 12 μm entre las correspondientes al mismo elemento de vector en los días considerados; y
 - reconocer una adquisición libre de fuegos para cada elemento de vector libre de nubes ya seleccionado como el que asume el mínimo valor de radiancia espectral en una banda de longitud de onda de 3.9 μm entre aquellas correspondientes al mismo elemento de vector en los días considerados.
- 50
15. El método de acuerdo con cualquier reivindicación 12 a 14, que comprende adicionalmente:
- clasificar como válidas o inválidas las radiancias espectrales adquiridas (R_λ) de acuerdo con un criterio dado;
 - y donde formar un vector (h_λ) comprende adicionalmente:

- actualizar el vector (h_λ) con las radiancias espectrales adquiridas (R_λ) si se clasifican como válidas o con las correspondientes radiancias espectrales predichas ($R_{PRD,\lambda}$) si la radiancias espectrales adquiridas (R_λ) se clasifican como no válidas.
- 5 16. El método de la reivindicación 15, donde la clasificación como radiancias espectrales adquiridas válidas o no válidas (R_λ) de acuerdo con un criterio dado comprende:
- clasificar como válidas las radiancias espectrales adquiridas (R_{12}) asociadas con la longitud de onda 12 μm si son más altas que las radiancias espectrales predichas correspondientes ($R_{PRD,12}$) de un valor de umbral dado ($th_{UPD,12}$);
 - 10 • clasificar como válidas la radiancias espectrales adquiridas ($R_{10.8}$) asociadas con la longitud de onda 10.8 μm si son más altas que las radiancias espectrales predichas correspondientes ($R_{PRD,10.8}$) de un valor de umbral dado ($th_{UPD,10.8}$); y
 - 15 • clasificar como válidas la radiancias espectrales adquiridas ($R_{3.9}$) asociadas con la longitud de onda 3.9 μm si están en el rango definido por las radiancias espectrales predichas correspondientes ($R_{PRD,3.9}$) disminuidas o incrementadas de un valor de umbral dado ($th_{UPD,3.9}$).
17. El método de acuerdo con la reivindicación 15 o 16, donde la actualización de la vector (h_λ) comprende:
- 20 • Reemplazar en el vector (h_λ) las radiancias espectrales en tiempos dados con las radiancias espectrales adquiridas correspondientes (R_λ) clasificadas como válidas o con las correspondientes radiancias espectrales predichas ($R_{PRD,\lambda}$).
- 25 18. Un sistema de procesamiento programado para implementar el método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente.
19. Un *software* que se puede cargar en un sistema de procesamiento y configurarse para implementar, cuando se ejecuta, el método de acuerdo con cualquiera de las Reivindicaciones 1 a 17.

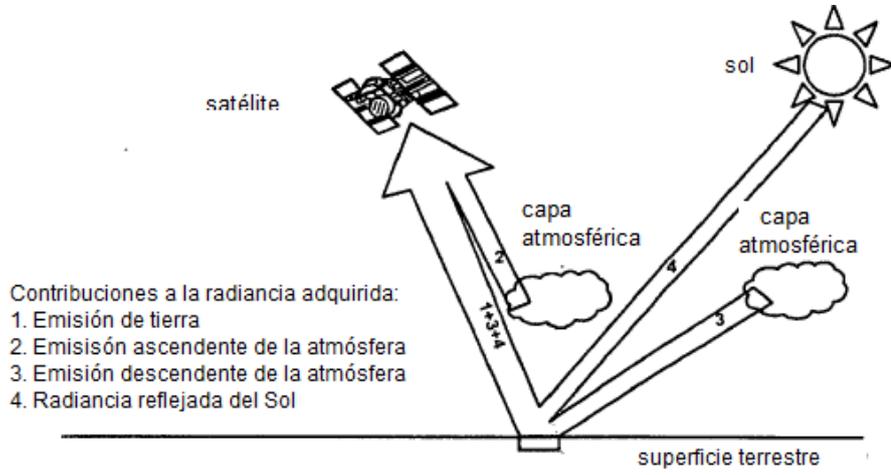


Fig.1a

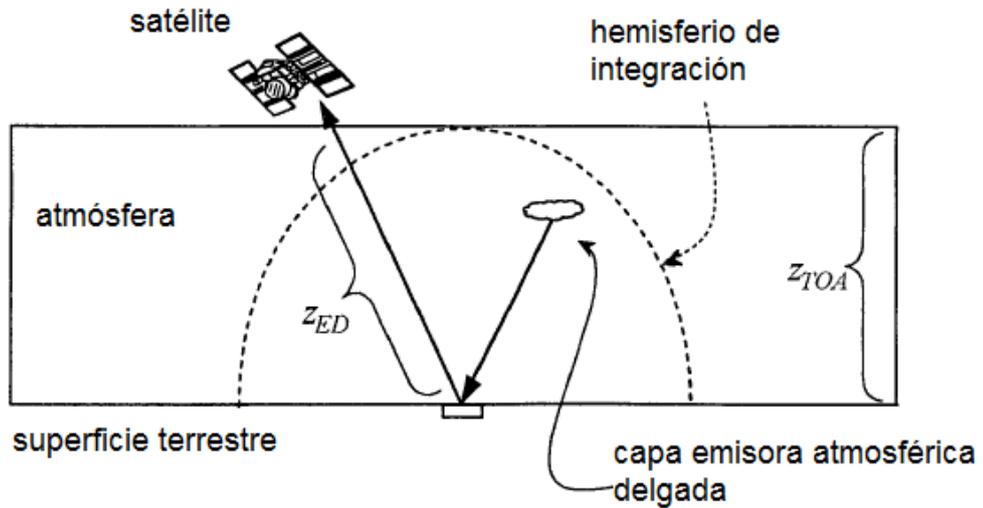


Fig.1b

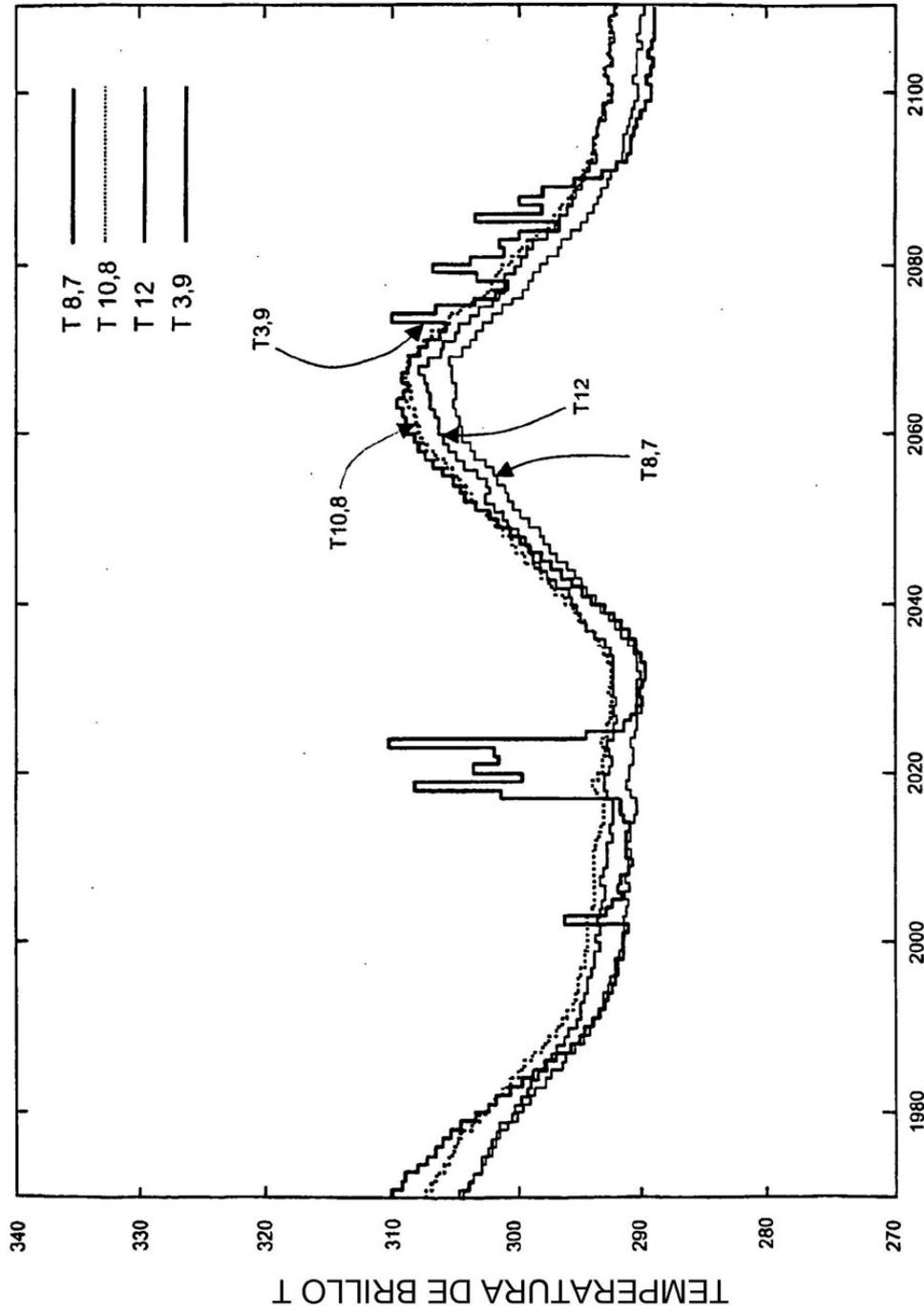
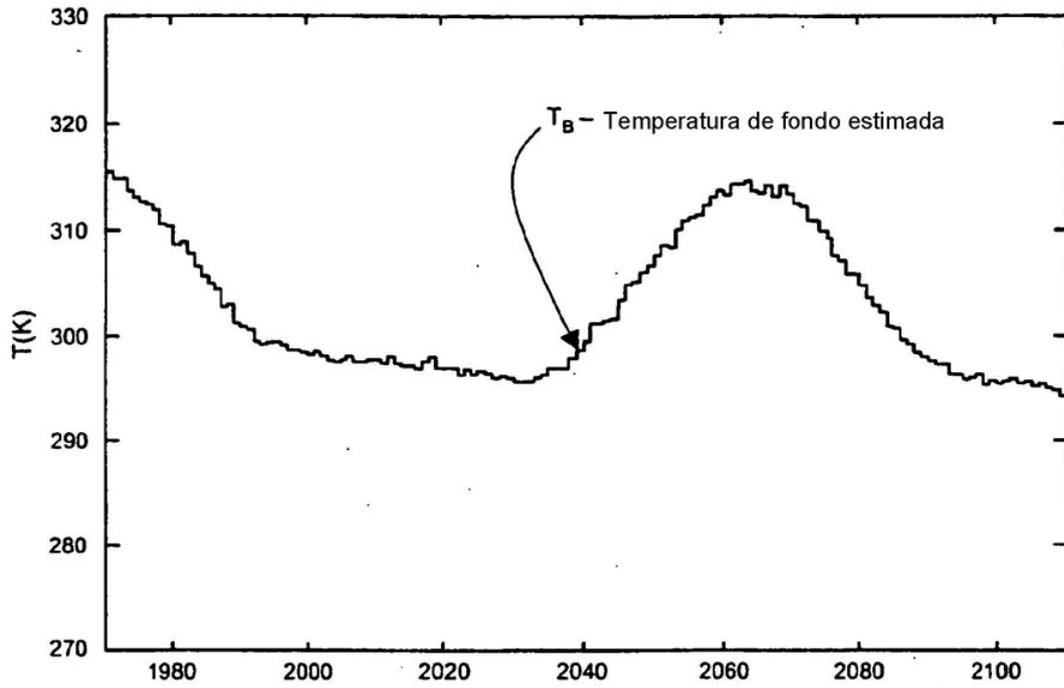


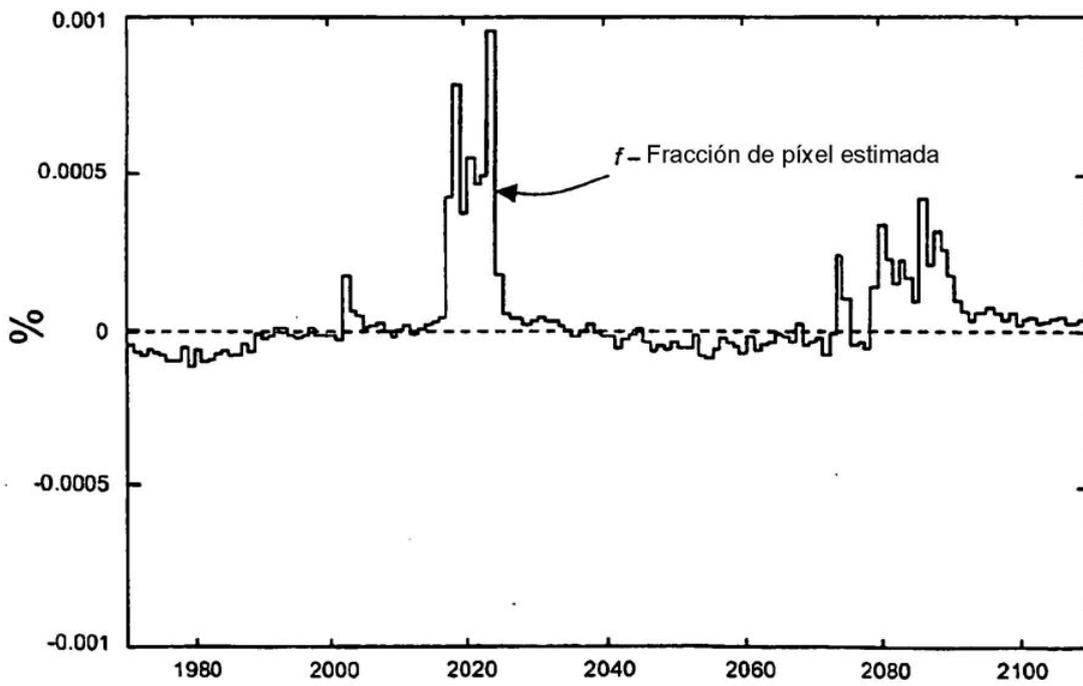
Fig.2a

ADQUISICIONES CADA 15 MINUTOS



ADQUISICIONES CADA 15 MINUTOS

Fig. 2b



ADQUISICIONES CADA 15 MINUTOS

Fig. 2c

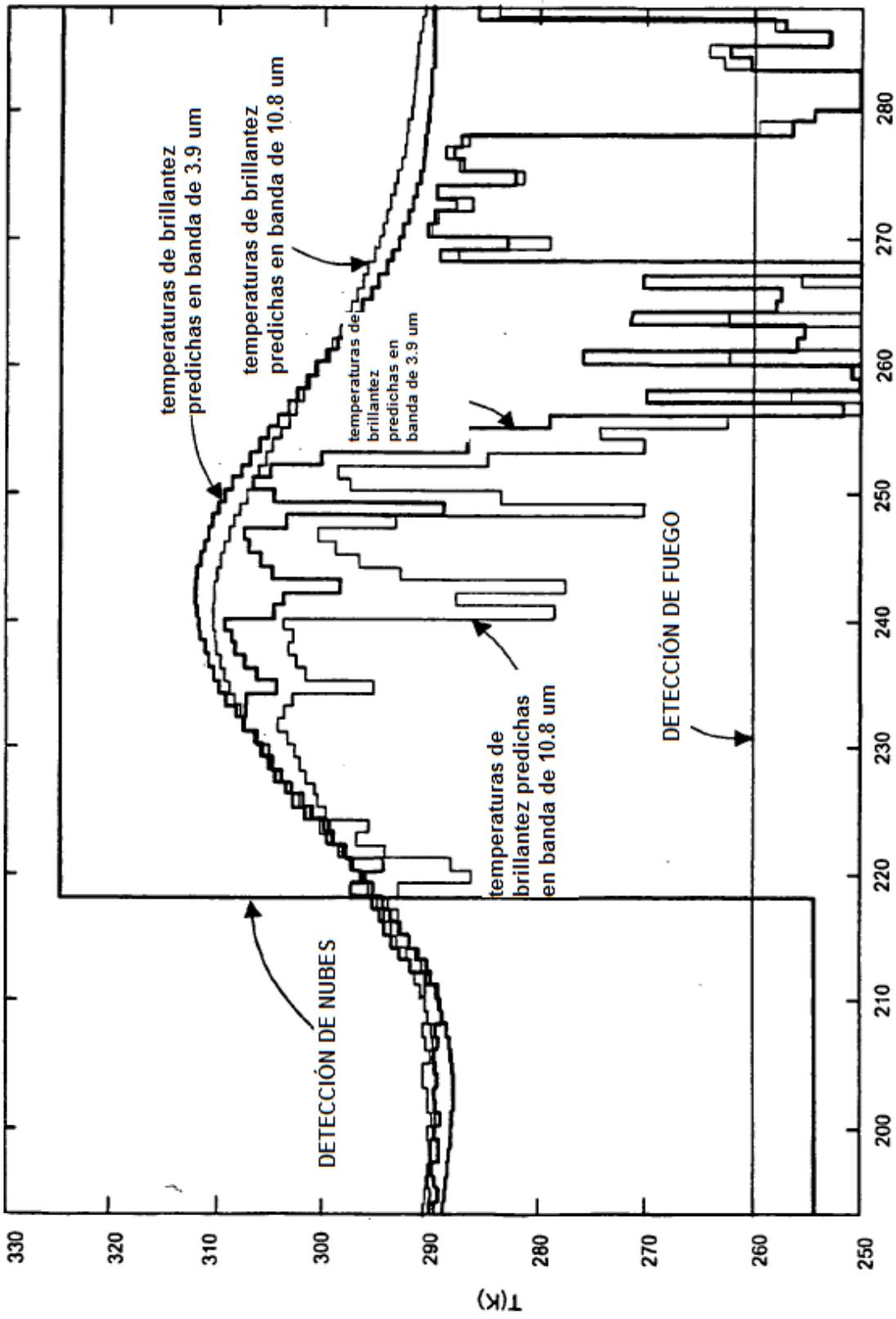


Fig.3a

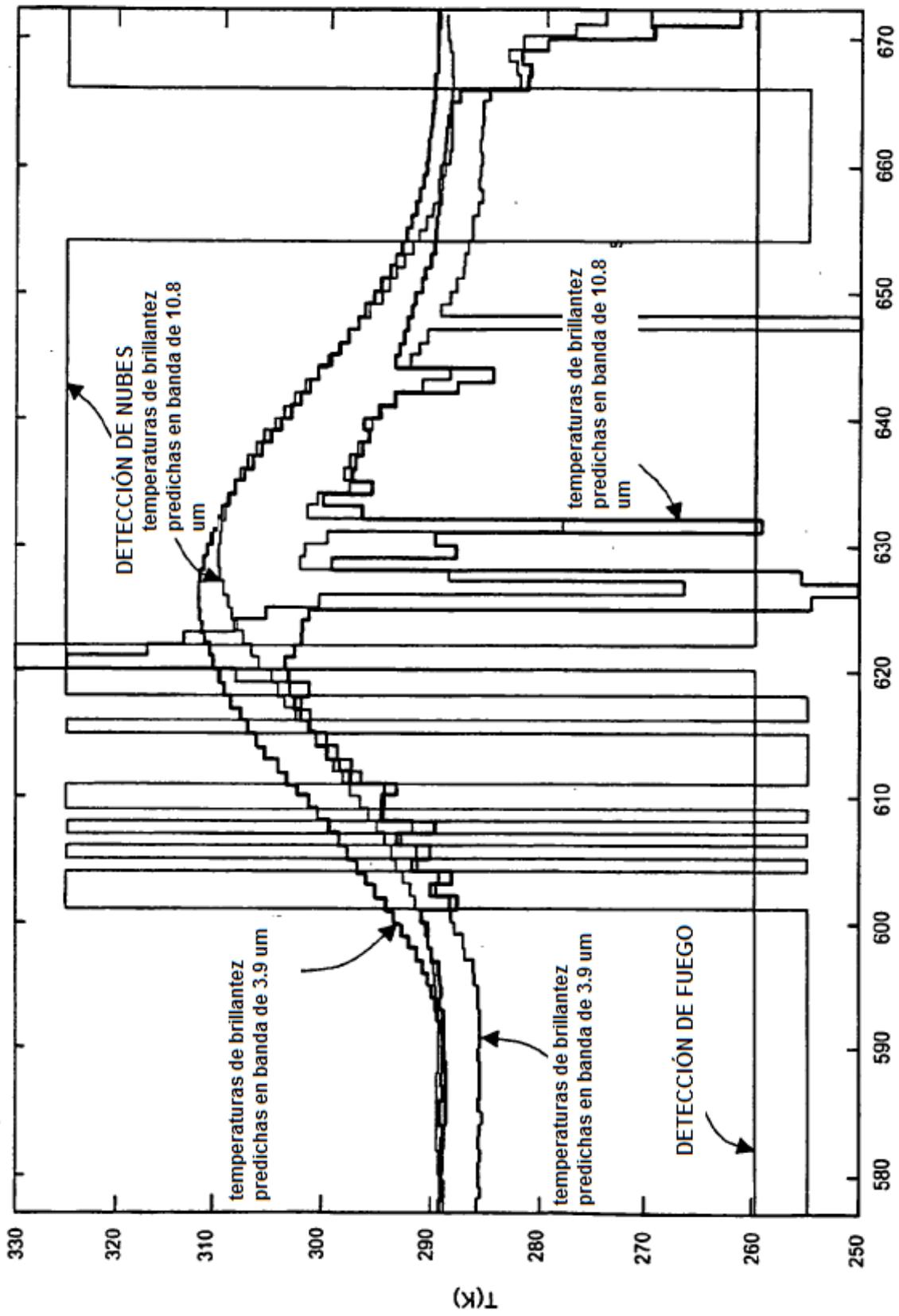


Fig.3b

| Área quemada total [hectáreas] | P_d [%] |
|-----------------------------------|-----------|
| > 1 | 61 |
| > 2 | 70 |
| > 5 | 84 |
| > 15 | 100 |
| > 60 | 100 |

Fig. 4

| Tamaño estimado fuego (f_i) [hectáreas] | P_{fd} [%] |
|------------------------------------------------|--------------|
| > 0.26 | 3.65 |
| > 0.28 | 3.61 |
| > 0.30 | 1.50 |
| > 0.33 | 0.34 |
| > 0.35 | 0.00 |

Fig. 5