

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 927 925**

51 Int. Cl.:

G06T 5/50 (2006.01)

G06T 3/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.05.2019** **PCT/EP2019/061790**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.11.2019** **WO19215210**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.05.2019** **E 19724144 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.07.2022** **EP 3791359**

54 Título: **Correlación de datos térmicos de imágenes satelitales para generar mapas térmicos de alta resolución espacial**

30 Prioridad:

09.05.2018 DE 102018207265

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

11.11.2022

73 Titular/es:

**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN
FORSCHUNG E.V. (100.0%)
Hansastr. 27c
80686 München, DE**

72 Inventor/es:

GULDE, MAX

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 927 925 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

Correlación de datos térmicos de imágenes satelitales para generar mapas térmicos de alta resolución espacial

- 5 La presente invención se refiere a la determinación de mapas térmicos de alta resolución espacial utilizando datos térmicos de imágenes satelitales.

La temperatura de la superficie terrestre (LST, *Land Surface Temperature*), determinada con la mayor exactitud posible, es un componente importante de muchas aplicaciones diferentes, por ejemplo, en la detección de incendios forestales, la medición de los máximos locales en la distribución de la temperatura urbana (UHI, *Urban Heat Island*), en la determinación de los índices de vegetación en la agricultura o en la modelización del clima local y global. A este respecto, la medición de gran superficie y exacta de la temperatura de la superficie terrestre solo ha sido posible con el uso de satélites.

- 15 A este respecto, la temperatura, por ejemplo, no se mide directamente, sino que se deriva de la radiancia en el detector a bordo del satélite. A este respecto, la radiancia R_λ es la radiación (energía) emitida por una superficie en un tiempo dado en un rango espectral dado en una dirección dada y se indica en vatios por metro cuadrado de estereorradián.

El propio detector capta una imagen en escala de grises, en la que el brillo de un único píxel se puede asignar a una radiancia medida.

La asignación de escalas de grises DN a la radiancia R se realiza, por ejemplo, mediante una ecuación lineal de la forma.

$$R = a \, DN + b$$

donde las constantes a y b se determinan mediante una calibración del detector.

- A través de la ley de radiación de Planck se puede inferir directamente la temperatura T a la longitud de onda conocida λ a través de la siguiente relación:

$$R_\lambda = \frac{k_1}{\lambda^5 (e^{\frac{k_2}{\lambda T}} - 1)}$$

$$k_1 = 2hc^2$$

$$k_2 = hc/\sigma_B$$

A este respecto, h es el quantum de efecto de Planck, c es la velocidad de la luz en vacío y σ_B es la constante de Boltzmann.

- La magnitud de salida medida de la que se puede derivar la temperatura puede depender a este respecto del tipo de detector. En los llamados microbolómetros se mide, por ejemplo, una resistencia eléctrica dependiente de la temperatura o el cambio de temperatura del absorbedor directamente a través de un termómetro. En el primer caso se infiere la temperatura mediante una dependencia funcional previamente determinada entre resistencia y temperatura.

Los detectores de telururo de mercurio-cadmio (MCT) son elementos semiconductores en los que la cantidad de energía capturada por píxel se correlaciona linealmente con su brillo en una buena aproximación. Por lo tanto, con un campo de visión del píxel y tiempo de exposición conocidos, se puede inferir la radiancia, que, como se describió anteriormente, está relacionada con la temperatura.

Otro tipo de detector es el fotodetector infrarrojo de maceta cuántica (en inglés, *QWIP*), en el que igualmente se liberan portadores de carga durante la incidencia de luz infrarroja (IR), que luego generan una corriente medible.

- Hay otros tipos de detectores que, sin embargo, habitualmente tienen en común que la temperatura se determina como una magnitud derivada mediante una modificación de los parámetros físicos fácilmente medibles (resistencia, tensión, etc.).

Un desafío general en la medición de LST por cámaras infrarrojas desde el espacio es la obtención de una alta exactitud radiométrica absoluta, es decir, la exactitud de la temperatura de radiación medida de la superficie de la tierra. La temperatura medida debe reproducir en este caso con la mayor exactitud posible la temperatura de radiación real del rango de medición en promedio. En este caso, surgen dificultades, entre otras cosas, debido a las fluctuaciones

de temperatura del detector, el paso de la radiación IR a medir a través de la atmósfera, el grado de emisión de la superficie de la tierra en función de la longitud de onda y el ángulo de visión, los diferentes tipos de superficie (como carreteras, campos, bosques, edificios, etc.) con diferentes grados de emisión en el rango de medición, la radiación solar reflejada y la interpretación física de los resultados. Por lo tanto, habitualmente se mide una temperatura de radiación y luego se intenta inferir la temperatura de la superficie a través de un modelo de superficie.

Muchas de las aplicaciones mencionadas anteriormente requieren simultáneamente tanto una alta resolución espacial como también temporal, por ejemplo, para registrar el ciclo diario de UHIs o evapotranspiración. Este requisito no se puede satisfacer por las plataformas satelitales existentes actualmente y previstas para los próximos años.

Los satélites geoestacionarios como GOES o Meteosat poseen tasas de repetición de tiempo muy altas (5 minutos para MSG SEVIRI en *modo de escaneo rápido*) y una alta precisión radiométrica, pero una resolución espacial limitada con tamaños de píxeles proyectados de varios kilómetros cuadrados.

Las plataformas de alta resolución espacial como Landsat-7 u 8 (ETM+, TIRS) y Terra (ASTER) ofrecen resoluciones espaciales de aproximadamente 60-120 m, pero solo permiten una cobertura global con una tasa de repetición de aproximadamente dos semanas.

En general, los métodos de calibración de alta calidad para la medición precisa de la temperatura de la superficie a bordo del satélite son muy complejos y, hasta ahora, solo se pueden implementar dentro de satélites grandes. A este respecto, estas plataformas tienen la desventaja de que con una alta resolución espacial (por ejemplo, Landsat 7 y 8) en órbitas bajas pasa un tiempo muy largo hasta que se puede observar de nuevo la misma región y un uso de una constelación de una pluralidad de tales sistemas significaba un esfuerzo financiero extremo. Las plataformas más distantes (Meteosat, GEOS) sufren la problemática de la mala resolución espacial, como se describió anteriormente.

Por lo tanto, existen varios enfoques para generar datos térmicos radiométricamente precisos con alta resolución espacial y opcionalmente también alta resolución temporal. Todos los enfoques tienen en común combinar datos satelitales térmicos precisos existentes de grandes plataformas como Meteosat y Landsat, que disponen de métodos de calibración complejos a bordo, con datos auxiliares de mayor resolución espacial. Una muestra descendente semejante de datos térmicos se puede utilizar para obtener imágenes térmicas de mayor resolución espacial y utilizarlas, por ejemplo, en el marco de una serie temporal de alta resolución temporal.

Actualmente hay dos tipos de procedimientos para lograr este aumento de resolución espacial. En el afilado térmico (TSP, *Thermal SharPening*) se utilizan modelos de entorno físico de alta resolución para inferir temperaturas en una red rectangular de subpíxeles. Estos pueden ser, por ejemplo, mapas con indicaciones exactas sobre los coeficientes de emisión o el albedo local. A este respecto, se supone que el píxel de temperatura grueso, captado se puede expresar como una combinación lineal de sus constituyentes de subpíxeles. Estos se dividen en clases según el conjunto de parámetros (por ejemplo, "bosque", "prado", "carretera", "edificio") y se correlacionan, por ejemplo, a través de regresión multilínea o métodos secuenciales de Monte Carlo.

A este respecto, el coeficiente de emisión ϵ determina la relación entre la temperatura de radiación medida T_s y la temperatura superficial cinética T_o de un cuerpo a través de la siguiente relación:

$$T_s = \epsilon T_o$$

En los métodos de teledetección se mide habitualmente el producto de la temperatura y el coeficiente de emisión. Dado que ambos tamaños no se pueden determinar al mismo tiempo de forma independiente entre sí en una banda, el problema está entonces subdeterminado. En consecuencia, se necesita más información. Hay distintas posibilidades de determinar el coeficiente de emisión.

Por un lado, a través de un mapa de la región observada con información detallada sobre el tipo de paisaje (CORINE es un mapa de este tipo para Europa, que se elabora de nuevo aproximadamente cada 2 años). Si se conoce el tipo de paisaje, se puede leer y asignar de las llamadas bibliotecas espectrales (Gillespie, A. R, Rokugawa, S, Matsunaga, T, Cothorn, J. S, Hook, S y Kahle, A. B. 1998. A Temperature and Emissivity Separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer ASTER images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36: 1113-1126) los coeficientes de emisión correspondientes (o los coeficientes de reflexión estrechamente relacionados).

Alternativamente, cuando se utilizan varias bandas espectrales (al menos 3), se puede realizar una separación de los coeficientes de emisión y la temperatura. Para las regiones cubiertas de vegetación, el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) también infiere con frecuencia el coeficiente de emisión (Valor, E. and Caselles, V. (1996) Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African and South American Areas. Remote Sensing of Environment, 57, 167-184. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)).

Spinhrne et al: "Performance and results from a space borne, uncooled microbolometer array spectral radiometric imager", Aerospace Conference Proceedings, 2000, páginas 125 - 134, ISBN: 978-0-7803-5846-1 discute el

rendimiento de las imágenes infrarrojas y su calibración a bordo de un transbordador espacial, así como la medición de las temperaturas de la superficie del terreno, nubes y océano.

El documento US 2003/152292 A1 discute la elaboración de imágenes de alta y baja resolución de imágenes infrarrojas en el espacio. Uno o varios satélites observan una región con una cobertura de repetición seleccionada para fines agrícolas.

Gwinner et al.: "The High Resolution Stereo Camera (HRSC) of Mars Express and its approach to science analysis and mapping for Mars and its satellites", Planetary and Space Science, Vol. 126, páginas 93 - 138, ISSN: 0032-0633 discute la cartografía de alta resolución de la superficie de Marte. Las imágenes estéreo multispectrales se capturan en múltiples órbitas, entre otras cosas, para generar modelos digitales de una región. Los sensores pueden estar calibrados radiométrica y geoméricamente.

La aplicación de TSP puede conducir a resultados relativamente precisos con un aumento moderado de la resolución (por ejemplo, factor 10) y una buena base de datos, con errores medios de LST (RMSE, *Root Mean Square Error*) de aproximadamente 2 - 3 K. A este respecto, los resultados son tanto más exactos cuanto menos clases y subcomponentes se seleccionan. No obstante, en la aplicación real de los datos de Meteosat, el factor de aumento de resolución (downsampling) se sitúa en aproximadamente 40 - 100 según el caso de aplicación y existen muchas clases dentro de un píxel grueso (tamaño de píxel de SEVIRI mínimo 9.6 km², sobre Europa Central alrededor de 15 km²). El error medio se sitúa aquí, en el mejor de los casos, en aproximadamente 5 K, pero donde los valores atípicos individuales pueden diferir en 20 K o más.

Alternativamente, se intenta inferir componentes de subpíxeles de forma irregular mediante desmezcla espectral (TUM, *Temperature Un-Mixing*). En este procedimiento, por ejemplo, varias bandas térmicas se analizan en paralelo para lograr un aumento de la resolución de los datos de salida. Alternativamente, también se pueden utilizar secuencias de imágenes temporales de la misma región, diferentes ángulos de visión o diferentes resoluciones en otras bandas térmicas captadas de forma sincronizada para mejorar la resolución espacial de una región. Sin embargo, hay pocos sensores satelitales que capten las regiones desde varios ángulos de visión, el coeficiente de emisión necesario es difícil de determinar cuándo se utilizan varias bandas y las secuencias temporales son difíciles de parametrizar cuando los parámetros de la superficie son variables en el tiempo.

Por el contrario, los satélites pequeños más baratos con alta resolución espacial no son capaces de capturar imágenes con alta precisión radiométrica. Al utilizar plataformas satelitales más pequeñas, por ejemplo, picosatélites o nanosatélites, los enfoques para elaborar datos térmicos de alta resolución espacial se basan por lo tanto principalmente en la calibración de imágenes IR de alta resolución espacial junto con objetos de referencia de temperatura conocida. Al reconocer los objetos de referencia dentro de la imagen IR, esta se puede calibrar luego correspondientemente. Alternativamente se usa un segundo sensor que proporciona información precisa de la temperatura de una sección de la imagen. El uso de detectores refrigerados en satélites pequeños se efectúa igualmente, pero en su mayoría no es suficiente para determinar con exactitud la temperatura a menos de unos pocos Kelvin.

Por lo tanto, existe una necesidad de soluciones simples y rentables para la elaboración de imágenes térmicas de alta resolución espacial con alta precisión radiométrica, así como para la elaboración de series temporales de alta resolución temporal compuestas por diversas imágenes térmicas de alta resolución espacial de alta precisión radiométrica.

La presente aplicación del derecho de propiedad intelectual resuelve este objetivo según las reivindicaciones independientes. Perfeccionamientos ventajosos se describen además en las reivindicaciones dependientes y en esta descripción.

A este respecto, la solución propuesta consiste en el uso de satélites pequeños para elaborar mapas térmicos de alta resolución espacial de la superficie de la tierra con una alta precisión radiométrica al mismo tiempo. El principio presentado se basa a este respecto en la compilación de 1) datos térmicos captados con satélites de alta exactitud de medición absoluta, pero de baja resolución espacial con 2) registrados en el tiempo y en el espacio, es decir, sincronizados en el tiempo y de la misma región, datos térmicos captados de una segunda plataforma satelital con menor exactitud de medición, pero con una resolución espacial significativamente mayor.

En este caso, los valores de medición son, por ejemplo, las escalas en grises de un fotosensor, que se pueden asignar a una radiancia física (y con ello a una temperatura de radiación), la resistencia eléctrica o una tensión eléctrica, a la que se puede asignar directamente una temperatura u otras magnitudes de medición físicas utilizadas para la determinación de la temperatura sin contacto.

El procedimiento descrito aquí, así como el dispositivo, combinan las ventajas de ambas mediciones y, por lo tanto, resultan tanto en una alta precisión de temperatura como también en una alta resolución espacial. A este respecto, se pueden evitar al menos en gran medida las incertidumbres generadas por los procedimientos habituales para la disgregación espacial (disaggregation) de LST basado en satélite. Además, se describe un procedimiento para

elaborar una serie temporal de mapas térmicos de alta resolución espacial, así como un producto de programa de ordenador para llevar a cabo los procedimientos descritos.

El procedimiento descrito está diseñado para determinar el mapa térmico de una región, preferentemente para
5 determinar un mapa térmico de alta resolución espacial con una alta exactitud de medición, tal como, por ejemplo, una alta exactitud de temperatura.

El procedimiento comprende una recepción de una primera imagen térmica, así como una recepción de una segunda
10 imagen térmica, donde las imágenes térmicas se ponen a disposición mediante diferentes plataformas y, por lo tanto, tienen diferentes propiedades.

A este respecto, una imagen térmica es una representación gráfica de una unidad física sobre una región y puede representar distintas unidades físicas, por ejemplo, una radiancia (W/m^2sr) o una temperatura (K).

15 La primera imagen térmica que se capta por un dispositivo de captación de un primer satélite tiene una alta precisión radiométrica pero una baja resolución espacial. La primera imagen térmica muestra la radiación térmica captada de un primer paisaje que comprende la región, donde la primera imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y asigna la primera imagen térmica a la región respectivamente por píxel un primer valor de temperatura, radiancia o valor de medición de otra magnitud de medición radiométrica.

20 La segunda imagen térmica, que se capta por un dispositivo de captación de un segundo satélite o, alternativamente, de un dron, un globo u otro objeto volador tripulado o no tripulado, tiene una precisión radiométrica menor pero una resolución espacial mayor en comparación con la primera imagen térmica. La segunda imagen térmica muestra la radiación térmica captada de un segundo paisaje que comprende la región, donde la segunda imagen térmica
25 comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y asigna la segunda imagen térmica a la región respectivamente por píxel un segundo valor de temperatura medido.

La "región" para la que se debe determinar el mapa térmico puede ser en este caso tanto una pequeña parte del paisaje, por ejemplo, un edificio o campo individual, como una parte más grande del paisaje que se muestra en las
30 imágenes térmicas, tal como, por ejemplo, un pueblo, un distrito o incluso una ciudad entera. Por lo tanto, la "región" se puede extender a través de diversos píxeles al menos de la segunda imagen térmica.

A los píxeles individuales de las dos imágenes térmicas pueden estar asignados respectivamente diferentes valores. Además, la resolución espacial de la segunda imagen térmica es más alta que la resolución espacial de la primera
35 imagen térmica, de modo que respectivamente una pluralidad de píxeles de la segunda imagen térmica están asignados espacialmente a un píxel de la primera imagen térmica.

La primera y la segunda imagen térmica se han captado además de forma sincronizada en el tiempo o con solo un pequeño decalado en el tiempo por debajo de una barrera fija de preferiblemente pocos minutos, por ejemplo, 10
40 minutos. A este respecto, la tolerancia temporal está dada por el intervalo de tiempo característico con el que cambian significativamente la temperatura o las propiedades de radiación en la región. Este intervalo de tiempo puede ser diferente en función de las condiciones marco, tal como las condiciones meteorológicas, así como del caso de uso previsto.

45 La alta exactitud radiométrica y, por lo tanto, la exactitud de temperatura o, más generalmente, la exactitud de medición de la primera imagen térmica resulta, por ejemplo, del dispositivo de captación del primer satélite, que es preferentemente un satélite grande, por ejemplo, un satélite meteorológico, y que dispone de una técnica de calibración compleja, por ejemplo, utilizando cuerpos negros o sensores especialmente templados. Los satélites que pueden captar imágenes con una alta exactitud de medición, por ejemplo, exactitud de temperatura, son conocidos por el
50 estado de la técnica, sin embargo, la técnica de calibración necesaria es muy costosa y demasiado grande para satélites pequeños, tal como, por ejemplo, picosatélites, nanosatélites o microsatélites. El primer satélite puede ser un satélite geoestacionario, lo que permite además una alta tasa de repetición temporal de las imágenes térmicas captadas. Sin embargo, los satélites meteorológicos geoestacionarios son incapaces de captar imágenes de alta resolución espacial debido a su gran distancia de la tierra. Por lo tanto, la resolución espacial de la primera imagen
55 térmica se sitúa en el rango de uno a varios kilómetros cuadrados por píxel.

Alternativamente, el primer satélite puede ser un satélite grande en una órbita terrestre baja, tal como se conoce, por ejemplo, por los satélites Landsat. Gracias a un satélite de este tipo, que igualmente está configurado a través de la
60 tecnología de calibración para captar imágenes térmicas con alta precisión radiométrica, es posible una resolución espacial significativamente mejor en comparación con un satélite geoestacionario. Sin embargo, en este caso la resolución espacial también es mejorable para muchas aplicaciones. Además, tales satélites grandes en una órbita terrestre baja pueden captar la misma sección parcial de la superficie terrestre solo a una distancia de varios días a varias semanas, por lo que no es posible una captación en un momento deseado o una serie temporal de varias capturas o solo con una resolución temporal muy baja o mediante la combinación de varios satélites de este tipo. Pero,
65 dado que los satélites grandes son muy costosos, es financieramente costoso utilizar la pluralidad de satélites grandes necesarios para una mejor exactitud del tiempo en una órbita terrestre baja (con una distancia por debajo de 2000 km

de la tierra).

La segunda imagen térmica se puede captar por un satélite pequeño que orbita más cerca de la tierra claramente por debajo de 1000 kg o por debajo de 500 kg, como un picosatélite de hasta aproximadamente 1 kg, un nanosatélite de hasta aproximadamente 10-15 kg o un microsatélite de hasta aproximadamente 100 kg. Gracias a la proximidad a la tierra se puede posibilitar una mayor resolución espacial. Dichos satélites orbitan en una órbita terrestre más baja, a una distancia típica de entre 300 y 1000 km de la superficie terrestre, por ejemplo, una distancia entre 500 y 800 km de la superficie terrestre. En general, los satélites más pequeños y los satélites con una vida útil más corta orbitan más cerca de la tierra que los satélites más grandes y/o los satélites con una vida útil más larga. Sin embargo, en el caso de los satélites pequeños más baratos en varios órdenes de magnitud (con un nivel de 2018, los costes de un geosatélite se sitúan en el rango de aprox. 1000 millones de euros, mientras que un nanosatélite cuesta aproximadamente entre 1 y 10 millones de euros), las posibilidades técnicas y el espacio para tecnología compleja, tal como, por ejemplo, la tecnología de calibración a bordo están limitados, de modo que las imágenes térmicas medidas por un satélite pequeño pueden diferir significativamente de la magnitud de medición real, tal como las temperaturas o las radiancias. Las desviaciones se pueden originar, por ejemplo, por fluctuaciones de temperatura del sensor infrarrojo que se utiliza para la captación. Dado que los satélites pequeños orbitan mucho más cerca de la tierra que, por ejemplo, los satélites meteorológicos, las imágenes térmicas se pueden captar por un satélite pequeño con una resolución significativamente mayor de las longitudes de borde de los píxeles individuales por debajo de 100 m, preferentemente por debajo de 50 m, entre 30 m y 50 m o por debajo de 30 m. En caso de posprocesamiento de las imágenes captadas, por ejemplo mediante el uso o superposición de varias imágenes captadas, también es posible una resolución espacial aún mayor, por ejemplo, por debajo de 20 m o por debajo de 10 m. El segundo satélite, con cuyo dispositivo de captación se ha captado la segunda imagen térmica, está en este caso en general en una órbita terrestre baja, en particular en una órbita terrestre más baja que el primer satélite, por lo que a través de un único satélite solo es posible una frecuencia de repetición menor, de al menos varias horas o días o, por ejemplo, de 2 a 4 semanas a una resolución relativamente alta de, por ejemplo, unos 100 m, para las imágenes de una región. En este caso, la frecuencia de repetición se puede considerar como una función de la resolución. Cuando se recibe imágenes de alta resolución espacial, entonces mediante el tamaño limitado del detector necesariamente se captura una pequeña región. En consecuencia, se necesita un tiempo relativamente largo hasta que se cubre de nuevo esta región (a menos que la órbita se ha ajustado exactamente de modo que se sobrevuela una región determinada con más frecuencia a expensas de la cobertura total de la superficie de la tierra). Por lo tanto, la frecuencia de repetición (*revisit time*) es una función del rango de visión del detector y, por lo tanto, puede estar acoplada directamente con la capacidad de resolución.

El procedimiento para determinar el mapa térmico comprende además la determinación de un decalado de magnitudes de medición, tal como, por ejemplo, un decalado de temperatura, de un primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica asignado espacialmente a la región, donde el primer grupo de píxeles comprende una pluralidad de píxeles. Como se ha descrito anteriormente, la exactitud de medición absoluta, por ejemplo, la exactitud de temperatura, de la segunda imagen térmica es baja y, si la magnitud de medición es, por ejemplo, una temperatura, se puede desviar de la realidad en varios grados, por ejemplo, por encima de 2 K, o, más a menudo, por encima de 5 K o incluso por encima de 10-20 K. Sin embargo, se puede partir de que los valores de medición relativos, por ejemplo, valores de temperatura relativos, de la segunda imagen térmica presentan una exactitud suficiente, en particular los valores de medición relativos de píxeles adyacentes o de píxeles que se sitúan cerca uno del otro, por ejemplo, dentro de unos pocos píxeles el uno del otro.

Por lo tanto, para el primer grupo de píxeles con un valor de la misma magnitud de medición de los píxeles de referencia de la primera imagen térmica, se puede determinar un decalado de magnitud de medición para el primer grupo de píxeles mediante una comparación de un valor medio de magnitud de medición, por ejemplo, del valor medio de temperatura. En este caso, también es posible tener en cuenta, por ejemplo, píxeles adyacentes tanto con respecto a la primera imagen térmica (es decir, píxeles adyacentes del al menos un primer píxel) como también con respecto a la segunda imagen térmica (es decir, píxeles adyacentes del primer grupo de píxeles) al determinar el decalado de magnitud de medición. Los píxeles de referencia "más gruesos" de la primera imagen térmica se pueden expresar en este caso como combinación lineal o suma ponderada del primer grupo de píxeles. Los píxeles del primer grupo de píxeles se tienen en cuenta al calcular el valor medio con la ponderación de su porcentaje de área. Por lo tanto, también se pueden tener en cuenta los píxeles de diferentes tamaños. Los valores de medición pueden ser, para cada píxel, magnitudes de medición escalares, o es posible que se registren simultáneamente varios valores, de modo que entonces los valores de medición individuales estén en forma vectorial.

El procedimiento comprende además la etapa de determinar valores de medición absolutos corregidos de los píxeles del primer grupo de píxeles asignados a la región con base en los segundos valores de medición medidos de los píxeles del primer grupo de píxeles así como el decalado de valores de medición.

La determinación de los valores de medición absolutos corregidos para los píxeles del primer grupo de píxeles se realiza preferentemente mediante una adición de los segundos valores de medición medidos y del decalado de valores de medición determinado anteriormente.

El procedimiento también incluye una etapa para determinar o generar el mapa térmico de alta resolución espacial

con alta precisión radiométrica sobre la base de los valores de medición absolutos corregidos.

Por ejemplo, la magnitud de medición es una temperatura, medida, por ejemplo, en Kelvin. En este caso, se determina el decalado de temperatura entre las dos imágenes térmicas. Sin embargo, también se puede tratar de un tamaño de radiación, medido, por ejemplo, en vatios por metro cuadrado y por estereorradián, una resistencia eléctrica, por ejemplo, medida en ohmios, o una tensión medida, por ejemplo, en voltios.

Por lo tanto, mediante una combinación de dos imágenes térmicas captadas de diferentes propiedades se puede elaborar un mapa térmico claramente mejorado de la región.

Mediante el procedimiento se determina en particular, por ejemplo, por medio de infrarrojos, la temperatura de radiación de la superficie de la tierra. Según la aplicación se puede realizar adicionalmente una determinación exacta de la temperatura de la superficie terrestre a partir de la temperatura de radiación dada por el mapa térmico determinado, con ayuda de un grado de emisión de la superficie respectiva, en función del tipo de superficie respectiva.

A este respecto se debe tener en cuenta que mediante sensores infrarrojos se miden en primer lugar intensidades o radiancias específicas, que se integran para la comparación de las radiancias medidas de la primera y segunda imagen térmica sobre las respectivas superficies lo más congruentes posible. A partir de los valores medidos se puede determinar entonces una temperatura de radiación, que se puede promediar para las superficies respectivas.

Para ello, por ejemplo, un píxel se ilumina con una cierta cantidad de energía en el IR y, por lo tanto, tiene una cierta luminosidad. Mediante la conocida respuesta de píxeles (por ejemplo, medida en el laboratorio antes del inicio), que normalmente es casi lineal en la región a considerar, ahora se puede inferir unidades físicas a partir de la luminosidad de píxel, por ejemplo, por medio de una función de compensación o una tabla de conversión. En este caso, se trata de la radiancia espectral (*spectral radiance*, $W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$). La temperatura (de radiación) resulta entonces directamente de la ley de radiación de Planck. La temperatura de la superficie se puede determinar entonces a partir de esta, así como de un coeficiente de emisión.

Gracias a la alta resolución espacial, así como a la alta precisión radiométrica de las imágenes térmicas generadas por el procedimiento descrito, es posible determinar la temperatura de la superficie con un esfuerzo claramente reducido, en comparación con los procedimientos conocidos en el estado de la técnica.

Preferentemente, al primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica está asignado espacialmente exactamente un píxel de la primera imagen térmica. En este caso, la determinación del decalado de valores de medición del primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica se realiza preferentemente mediante una suma, posiblemente ponderada, de valores de medición relativos del primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica con respecto al primer valor de medición del píxel de la primera imagen térmica asignado espacialmente al primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica.

Este cálculo se realiza suponiendo que mediante el valor del primer píxel de la primera imagen térmica medido con alta exactitud de medición se conoce un valor medio de los valores de medición de los píxeles del primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica. Por lo tanto, se puede calcular el decalado de valores de medición ΔT . Esto está dado por la diferencia de medición relativos del primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica con respecto al primer valor de medición del píxel de la primera imagen térmica con respecto, por otro lado, a los valores de medición medidos de los píxeles del primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica.

$$\Delta T = T_A(x, y) - \frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in T_A(x,y)} w(i, j) T_B(i, j) \quad (1)$$

A este respecto es válido

$$\sum_{(i,j) \in T_A(x,y)} w(i, j) = N. \quad (2)$$

$T_A(x, y)$ es la magnitud de medición captada de la primera imagen térmica del píxel (x, y) y $T_B(i, j)$ es la de la medición de la segunda imagen térmica en todos los píxeles (i, j) que se sitúan dentro del primer grupo de píxeles, donde $w(i, j)$ reproduce la parte de superficie respectiva del píxel (i, j) en la superficie total asignada espacialmente al primer píxel. Por lo tanto, $w(i, j)$ es = 1 si el píxel (i, j) está completamente contenido en la superficie total del primer píxel.

Si se elige la temperatura como valor de medición, entonces este enfoque lineal es válido en buena aproximación para un rango de temperatura medio a encontrar en la tierra alrededor de 300 K, como se debe encontrar normalmente en una sola imagen térmica, con una diferencia entre la temperatura máxima y mínima registrada de unas pocas decenas de Kelvin, por ejemplo, 20 K o 30 K.

Si en su lugar se seleccionan las radiancias como magnitud de medición, entonces la formulación matemática corresponde al teorema de conservación de energía y se aplica exactamente.

Además, preferentemente es posible que el procedimiento después del cálculo de los valores de temperatura absolutos corregidos de los píxeles del primer grupo de píxeles incluya un procesamiento posterior opcional de los píxeles del primer grupo de píxeles utilizando modelos de superficie terrestre. Mediante tales modelos de superficie terrestre se pueden calcular temperaturas de superficie precisas a partir de valores de temperatura absolutos corregidos que indican, por ejemplo, una temperatura de radiación, por ejemplo, utilizando coeficientes de emisión que están asociados con las superficies respectivas.

La presente solicitud comprende además un dispositivo para determinar el mapa térmico de una región, donde el dispositivo comprende al menos una unidad de recepción y una unidad de determinación.

La unidad de recepción está configurada en este caso para la recepción de una primera imagen térmica de un primer paisaje que comprende la región, donde la primera imagen térmica ha sido captado por un dispositivo de captación de un primer satélite, donde la primera imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y la imagen térmica asigna respectivamente por píxel un primer valor de medición captado a la región,

La al menos una unidad receptora está configurada además para la recepción de una segunda imagen térmica de un segundo paisaje que comprende la región, donde la segunda imagen térmica ha sido captado por un dispositivo de captación de un segundo satélite, donde la segunda imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y la segunda imagen térmica asigna por píxel un segundo valor de medición captado a la región,

Entre la captación de la primera imagen térmica y la captación de la segunda imagen térmica existe en este caso solo un pequeño decalado temporal por debajo de una barrera fijada de preferiblemente unos pocos minutos, por ejemplo, menos de 30 minutos o menos de 10 minutos.

Además, como ya se ha descrito con respecto al procedimiento, una precisión radiométrica de la primera imagen térmica es mayor que una precisión radiométrica de la segunda imagen térmica, y una resolución espacial de la segunda imagen térmica es mayor que una resolución espacial de la primera imagen térmica.

La unidad de determinación del dispositivo para determinar el mapa térmico de la región está configurada para determinar un decalado de valores de medición de un primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica, asignado espacialmente a la región, donde el primer grupo de píxeles comprende una pluralidad de píxeles, mediante una suma o combinación lineal de valores de medición relativos de los píxeles del primer grupo de píxeles con respecto al primer valor de medición captado del al menos un primer píxel de la primera imagen térmica, donde el al menos un primer píxel de la primera imagen térmica está asignado al menos parcialmente espacialmente al primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica.

Si los valores de medición son valores de temperatura, entonces la determinación de un decalado de temperatura se puede realizar por ejemplo, con ayuda de las fórmulas (1) y (2).

En este caso se debe tener en cuenta que, en el caso del registro de datos de radiación, el cálculo de la temperatura de radiación se puede realizar opcionalmente antes o después de la determinación del decalado. Por lo tanto, como se describe en las fórmulas (1) y (2), es posible que los datos de sensor se conviertan en valores de temperatura y luego se determine un decalado de temperatura mediante la comparación de los valores de temperatura de la primera y segunda imagen térmica. Pero, alternativamente también se puede realizar un decalado de valores de medición sobre la base de otra magnitud medida o derivada y la conversión en valores de temperatura solo se puede realizar después.

La unidad de determinación está configurada además para determinar valores de medición absolutos corregidos de los píxeles del primer grupo de píxeles con base en los segundos valores de medición captados de los píxeles del primer grupo de píxeles, así como del decalado de valores de medición.

A continuación se describen formas de realización ventajosas opcionales para el procedimiento y el dispositivo para la determinación del mapa térmico.

Preferentemente, tanto la primera como también la segunda imagen térmica son respectivamente imágenes infrarrojas que se han captado respectivamente por sensores infrarrojos del primer o del segundo satélite.

Por ejemplo, para LST normales en el rango de temperaturas de gran superficie que ocurren en la tierra, por ejemplo -40 a 60 °C, se utilizan ondas infrarrojas en el rango de 8 - 14 μm , a menudo incluso solo 10,8 y 12 μm . Para los incendios forestales, el rango de infrarrojos de onda más corta es más interesante, por ejemplo, entre 3 - 5 μm . Por lo tanto, la mayoría de los satélites meteorológicos tienen varias bandas que cubren el rango de 0,5 - 13 μm . Por lo tanto, los valores de medición captados pueden estar presentes en forma vectorial.

La resolución espacial de la primera imagen térmica es generalmente evidente, por lo menos uno o incluso dos o tres

órdenes de magnitud más grueso que la resolución espacial de la segunda imagen térmica. Por ejemplo, los píxeles de la primera imagen térmica pueden tener una longitud de borde de al menos aprox. 1 km, de modo que la superficie cubierta por un píxel se sitúa en la primera imagen térmica en el rango de aproximadamente 1 km² o incluso más de 1 km² o más de 3 km². En contraste a ello, la longitud de borde de un píxel de la segunda imagen térmica está
5 preferiblemente por debajo de 100 m, o incluso por debajo de 70 m o por debajo de 50 m. Idealmente, la longitud de borde de un píxel de la segunda imagen térmica se sitúa en el rango de solo 10 m, de modo que la superficie que se reproduce por un píxel de la segunda imagen térmica es de solo unos pocos 100 m².

Pero, alternativamente el procedimiento descrito aquí también se puede aplicar cuando la resolución espacial de la
10 primera imagen térmica es menos de un orden de magnitud, por ejemplo, solo un factor de 2 o 3, más grueso que la resolución espacial de la segunda imagen térmica. El procedimiento se puede aplicar a cualquier par de imágenes en el que la resolución espacial de la segunda imagen térmica es mayor o menor que la resolución espacial de la primera imagen térmica.

Además, la precisión radiométrica de la primera imagen térmica es mayor que la precisión radiométrica de la segunda
15 imagen térmica. Esta propiedad de las imágenes térmicas se consigue preferentemente porque el dispositivo de captación del primer satélite dispone de la técnica de calibración correspondiente, por ejemplo, mediante el uso de cuerpos negros o sensores especialmente refrigerados o controlados por temperatura, que garantizan una alta exactitud radiométrica, preferentemente por debajo de 2 K o, de forma especialmente preferente, incluso por debajo
20 de 1 K, idealmente por píxel o también en el medio de las imágenes térmicas captadas. Para aumentar la capacidad de estimación de la exactitud, los dispositivos de captación de los satélites pueden proporcionar además datos que indican, preferentemente por píxel captado, una exactitud de medición estimada por los sensores del dispositivo de captación. La precisión radiométrica de la segunda imagen térmica es menor, por ejemplo, porque la segunda imagen térmica se ha captado por el dispositivo de captación de un satélite pequeño más económico u otro objeto volador
25 tripulado o no tripulado, que no dispone de una técnica de calibración correspondientemente precisa.

Además, la presente solicitud comprende un procedimiento para determinar la modificación de una magnitud de
medición dentro de una región durante un período de tiempo, tal como, por ejemplo, dentro de una hora, un día o también dentro de una semana, un mes o un año. Mediante una determinación lo más precisa posible de la
30 modificación temporal de la magnitud de medición de una región se pueden registrar, por ejemplo, islas de calor urbanas y analizarse sus causas. Además, tales series de tiempo de magnitudes de medición proporcionan información para la planificación urbana, por ejemplo, el efecto de las zonas verdes, distintos tipos de techos o superficies de agua en el clima urbano.

El procedimiento descrito para determinar la modificación de la magnitud de medición dentro de una región comprende
35 en primer lugar la determinación de al menos dos, preferentemente una pluralidad de más de 10 o más de 100, mapas térmicos de la región lo más preciso posible en diferentes momentos, donde los dos mapas térmicos se han determinado según el procedimiento descrito anteriormente.

En particular, el primer mapa térmico se ha determinado utilizando una primera y una segunda imagen térmica recibida
40 de la región, donde la primera y segunda imagen térmica se han captado de forma sincronizada en el tiempo o aproximadamente sincronizada en un primer momento y, a partir de la primera y segunda imagen térmica, la primera imagen térmica posee una mayor precisión radiométrica y la segunda imagen térmica posee una mayor resolución espacial.

Además, el segundo mapa térmico se ha determinado utilizando una tercera y una cuarta imagen térmica recibida de
45 la región, donde la tercera y cuarta imagen térmica se han captado de forma sincronizada en el tiempo o aproximadamente sincronizada en un segundo momento y, a partir de la tercera y cuarta imagen térmica, la tercera imagen térmica posee una mayor exactitud radiométrica y la cuarta imagen térmica posee una mayor resolución
50 espacial.

A partir del primer y segundo mapa térmico de la región se puede elaborar entonces una serie temporal de la magnitud
de medición dentro de la región.

También es posible determinar opcionalmente en este tipo de mapas térmicos de una pluralidad de momentos para
55 una región y elaborar una serie temporal de la magnitud de medición dentro de la región con base en la pluralidad de mapas térmicos de la región.

Preferentemente, el primer y segundo momento se encuentran dentro de un intervalo de tiempo determinado, por
60 ejemplo, dentro de un día, o dentro de unas pocas horas o incluso dentro de una hora o media hora, para garantizar una alta resolución temporal de la serie temporal de la magnitud de medición dentro de la región, por ejemplo, para detectar la modificación de la magnitud de medición dentro de un día.

Para conseguir una alta resolución temporal de este tipo, es posible, por ejemplo, que la primera y la tercera imagen
65 térmica se capten respectivamente por una gran plataforma satelital con la técnica de calibración correspondiente para garantizar una alta precisión radiométrica, tal como, por ejemplo, un satélite meteorológico geoestacionario. Al utilizar

una primera y tercera imagen térmica, que se captan por satélites geoestacionarios, se captan preferentemente tanto la primera como la tercera imagen térmica por el dispositivo de captación del mismo satélite geoestacionario. Alternativamente, la primera y tercera imagen térmica también pueden provenir de diferentes satélites geoestacionarios con una cobertura similar.

5

Además, también es posible alternativamente que la primera y tercera imagen térmica se capten por los dispositivos de captación de diferentes satélites grandes pero no geoestacionarios en una órbita terrestre baja, donde los dispositivos de captación deben estar equipados respectivamente con técnica de calibración para una alta exactitud de medición. Si la primera y la tercera imagen térmica provienen de diferentes plataformas satelitales no geoestacionarias, entonces esto solo es posible si estas dos plataformas satelitales se encuentran sobre la región dentro del período de tiempo predeterminado. Dado que los satélites grandes no geoestacionarios, como por ejemplo Landsat, tienen una tasa de repetición temporal de varios días a varias semanas con respecto a una región determinada, tales imágenes son posibles, sobre todo de manera oportunista, dentro de una ventana de tiempo predeterminada por diferentes satélites no geoestacionarios con infraestructura de satélite actualmente existente, pero no son adecuadas para la elaboración de series temporales continuas sobre una región seleccionada con varios, por ejemplo, más de 10 o más de 100 pares de imágenes, donde los intervalos de tiempo de cada dos pares de imágenes captadas consecutivamente presentan respectivamente un intervalo de tiempo de pocos minutos u horas.

La cantidad de pares de imágenes necesarios para elaborar una serie temporal, como también los intervalos de tiempo tolerables de los pares de imágenes, generalmente dependen en gran medida de la aplicación. Así, por ejemplo, para algunas aplicaciones en las que se desea observar un desarrollo de temperatura a lo largo del año, una o dos imágenes por día pueden ser suficientes, mientras que para otras aplicaciones en las que se desea estudiar, por ejemplo, un desarrollo de calor a lo largo del día, es deseable una resolución temporal de solo unos pocos minutos, por ejemplo, menos de 10 o menos de 30 minutos. Para elaborar una serie temporal más larga que se compone de más de 10 o más de 100 pares de imágenes, es útil que la primera imagen térmica de cada par de imágenes captadas sincrónicamente con la mayor precisión radiométrica se ha capturado siempre o al menos la mayoría de las veces por el mismo satélite geoestacionario. Para lograr al mismo tiempo una alta resolución espacial, la segunda imagen térmica y también la cuarta imagen térmica se captan respectivamente mediante dispositivos de captación de satélites pequeños u otros objetos voladores tripulados o no tripulados que, por su proximidad a la tierra, pueden proporcionar una alta resolución espacial de las imágenes térmicas captadas.

Estos satélites pequeños recién descritos orbitan la tierra en una órbita terrestre baja. Para la implementación de una alta resolución temporal, por lo tanto, se pueden utilizar preferentemente las imágenes térmicas de varios satélites pequeños diferentes, tales como picosatélites, nanosatélites o microsatélites, de modo que la segunda imagen térmica se ha captado por el dispositivo de captación de un primer satélite pequeño, mientras que la cuarta imagen térmica se ha captado por el dispositivo de captación de un segundo satélite pequeño. Dado que los satélites pequeños, tal como, por ejemplo, CubeSats, son menos costosos de fabricar en comparación con los satélites grandes geoestacionarios, es posible utilizar diversos satélites pequeños para generar una serie temporal con una alta resolución temporal de la magnitud de medición dentro de una región.

40

La presente descripción comprende además un producto de programa de ordenador para el cálculo de una imagen térmica, donde el producto de programa de ordenador comprende instrucciones que, cuando se ejecutan en un ordenador, realizan el procedimiento descrito anteriormente. A este respecto, las instrucciones pueden ser instrucciones opcionales para la determinación de una imagen térmica de alta resolución espacial y al mismo tiempo exacta de medición de una región o las instrucciones pueden ser instrucciones para la determinación de una serie temporal de la magnitud de medición dentro de la región. En cualquier caso, las instrucciones se basan en imágenes térmicas de diferentes plataformas satelitales, que se reciben a través de una unidad receptora correspondiente del ordenador.

En este caso, el ordenador puede ser un PC estacionario o un ordenador móvil. El ordenador también puede formar parte de un sistema distribuido o de un servicio basado en la nube que es adecuado para ejecutar las instrucciones del programa.

Las características descritas anteriormente con referencia al procedimiento o al dispositivo para elaborar un mapa térmico también se pueden utilizar con referencia al procedimiento, al dispositivo o al producto de programa de ordenador.

A continuación se describen otras formas de realización ventajosas con referencia a las figuras. En este caso, debido a su fácil interpretación, se ha elegido la temperatura como magnitud de medición. Pero, alternativamente, los valores de medición también pueden comprender otros datos radiométricos tales como radiancias u otros datos registrados por los sensores de los satélites utilizados o derivados de los valores de medición detectados. Muestran:

Fig. 1 una representación esquemática de un dispositivo para la determinación de un mapa térmico de una región;
Fig. 2 una representación esquemática de un desarrollo del procedimiento para la determinación de un mapa térmico de una región;
Fig. 3A representación esquemática de una imagen térmica de la superficie terrestre captada con un primer satélite A.

65

Fig. 3B representación esquemática de una imagen térmica de la superficie terrestre captada con un segundo satélite B de forma sincronizada temporalmente con respecto a la fig. 3B;

Fig. 4A representación esquemática de un único punto de imagen de la imagen térmica captada por el satélite A según la fig. 3A;

5 Fig. 4B representación esquemática de la medición del satélite B de la misma región que se muestra en la fig. 4A;

Fig. 4C representación esquemática de la determinación del mapa térmico sobre la base de la fig. 4B y un decalado de temperatura determinado.

La figura 1 muestra un dispositivo para determinar un mapa térmico de una región. El dispositivo 101 comprende una
10 unidad de recepción 102 que puede recibir señales de distintos satélites 104 y 105 que orbitan alrededor de la tierra 106. La recepción de las señales de los satélites 104, 105 se realiza en su mayoría indirectamente, es decir, no directamente desde el satélite, sino a través de un equipo intermedio 107, que recibe las señales del o de los satélites 104, 105 y luego las reenvía o las proporciona para su descarga. La unidad receptora recibe en particular datos de
15 imágenes térmicas de la superficie de la tierra, que se han captado por dispositivos de captación de los satélites 104 y 105. Para elaborar un mapa térmico detallado de una región con alta resolución espacial en el rango de unos pocos metros a menos de 10 metros y alta exactitud de medición radiométrica, como alta exactitud de temperatura, el dispositivo receptor 102 está configurado para recibir primero una primera imagen térmica de un primer satélite 104 y una segunda imagen térmica de un segundo satélite 105.

20 En este caso, el primer satélite 104 es un satélite grande con una alta exactitud de temperatura, tal como, por ejemplo, un satélite meteorológico geoestacionario o un satélite grande que orbita en una órbita terrestre baja, tal como, por ejemplo, un Landsat. Para alcanzar una exactitud de temperatura preferentemente por debajo de 2 K, el primer satélite 104 dispone de una técnica de calibración incorporada. Pero, en el caso de un primer satélite geoestacionario, debido a su gran distancia de la tierra, este primer satélite 104 solo dispone de una capacidad de resolución espacial bastante
25 gruesa, de modo que los píxeles captados tienen un tamaño de varios kilómetros cuadrados. Alternativamente, si un satélite grande en una órbita terrestre baja, tal como, por ejemplo, un Landsat, se utiliza como primer satélite 104, entonces la resolución espacial ya es mejor que con los satélites geoestacionarios descritos anteriormente, pero todavía es posible un potencial de mejora teniendo en cuenta imágenes térmicas de resolución espacial más alta de una segunda plataforma satelital. Por ejemplo, Landsat 8 actualmente tiene una resolución de 100 m. Mediante el uso
30 de un satélite pequeño como satélite auxiliar, esta resolución se puede mejorar a significativamente por debajo de 60 m. Con el procesamiento posterior de los datos también son posibles resoluciones aún más bajas, por ejemplo, por debajo de 30 m.

El segundo satélite 105 es un satélite pequeño o CubeSat, que tiene una resolución espacial más alta en comparación
35 con el primer satélite, pero solo una exactitud de medición reducida, en comparación con el primer satélite.

La unidad de recepción 102 del dispositivo descrito recibe primeras y segundas imágenes térmicas capturadas en el tiempo y sincrónicamente de paisajes espacialmente corregidos de los dos satélites 104 y 105, es decir, las regiones
40 parciales de la superficie de la tierra capturadas se solapan al menos parcialmente. Para elaborar ahora un mapa térmico preciso de una región, que está representado en ambas imágenes térmicas, el dispositivo 101 comprende además una unidad de determinación 103.

La unidad de determinación 103 está configurada para asignar espacialmente un punto de imagen de la primera
45 imagen térmica del primer satélite a un grupo de puntos de imagen de la segunda imagen térmica del segundo satélite y calcular un decalado de magnitud de medición o decalado de temperatura del grupo de puntos de imagen de la segunda imagen térmica. Este cálculo se realiza suponiendo que la desviación de temperatura o la desviación de magnitud de medición de los puntos de imagen de la segunda imagen térmica es al menos localmente constante, es decir, que la desviación de un punto de imagen no difiere o solo muy poco de la desviación de los puntos de imagen
50 adyacentes. Además se produce la suposición de que la magnitud de medición o la temperatura (medida con alta precisión) del punto de imagen de la primera imagen térmica se puede representar como suma (ponderada) o combinación lineal de los puntos de imagen asociados de la segunda imagen térmica. Por lo tanto, el decalado de magnitud de medición para el grupo de puntos de imagen de la segunda imagen térmica se puede determinar a partir de las diferencias de magnitud de medición relativas de los puntos de imagen del grupo de la segunda imagen térmica y de la magnitud de medición capturada del punto de imagen asignado de la primera imagen térmica. La unidad de
55 determinación 103 está configurada además para elaborar a partir del decalado de magnitudes de medición y de las magnitudes de medición capturadas de la segunda imagen térmica un mapa térmico preciso de la región.

La figura 2 muestra esquemáticamente un procedimiento para determinar un mapa térmico preciso de una región, donde el procedimiento se puede implementar, por ejemplo, a través de la disposición descrita anteriormente o a
60 través de un producto de programa de ordenador que comprende instrucciones correspondientes para llevar a cabo el procedimiento.

El procedimiento descrito aquí para determinar el mapa térmico preciso de una región comprende las siguientes etapas:

65

S201: Recepción de una primera imagen térmica de un primer paisaje que abarca la región, que se ha captado por

un dispositivo de captación de un primer satélite, donde la primera imagen térmica píxeles que están asignados espacialmente a la región y asigna la imagen térmica a la región por píxel respectivamente un primer valor de medición captado.

- 5 S202: Recepción de una segunda imagen térmica de un segundo paisaje que abarca la región, que se ha captado por un dispositivo de captación de un segundo satélite, donde la segunda imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y la imagen térmica asigna a la región por píxel respectivamente un segundo valor de medición captado.

- 10 Cabe señalar que las etapas S201 y S202 se pueden realizar en cualquier orden o también al mismo tiempo.

Para llevar a cabo el procedimiento, la primera y segunda imagen térmica recibida deben cumplir adicionalmente los siguientes requisitos: entre la captación de la primera imagen de satélite y la captación de la segunda imagen de satélite, solo puede existir un decalado temporal por debajo de una barrera fija, preferentemente por debajo de 10 minutos o incluso por debajo de 5 minutos, ya que la correlación de los valores de medición térmica dados en las dos imágenes térmicas no es posible o solo difícil con un intervalo de tiempo mayor entre las captaciones de las dos imágenes. La barrera temporal se puede seleccionar en función de las presentes condiciones marco. Por lo tanto, en condiciones climáticas constantes, los intervalos más largos eventualmente entre las dos captaciones pueden ser tolerables en comparación con las condiciones climáticas cambiantes.

- 20 Además, una precisión radiométrica de la primera imagen térmica, es decir, la exactitud de la magnitud de medición captada, es mayor que una precisión radiométrica de la segunda imagen térmica, mientras que una resolución espacial de la segunda imagen térmica es mayor que una resolución espacial de la primera imagen térmica.

- 25 Después de recibir las dos imágenes térmicas, se pueden realizar los siguientes pasos de procedimiento adicionales:

S203: Determinación de un decalado de magnitud de medición de un primer grupo de píxeles, asignado espacialmente a la región, de la segunda imagen térmica, donde el primer grupo de píxeles comprende una pluralidad de píxeles, mediante una suma ponderada de valores de medición relativos de los píxeles del primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica en comparación con el primer valor de medición captado de al menos un píxel de la primera imagen térmica, que está asignado al menos parcialmente espacialmente al primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica. En este caso se determina, por ejemplo, el valor medio de los valores de medición del primer grupo de píxeles para determinar luego el decalado, por ejemplo, como diferencia, con respecto al o a los valores de medición asignados de la primera región de la primera imagen térmica.

- 35 S204: Determinación de los valores de medición absolutos corregidos de los píxeles del primer grupo de píxeles asignados a la región con base en los segundos valores de medición medidos de los píxeles del primer grupo de píxeles y del decalado de valores de medición.

- 40 S205: Elaboración del mapa térmico preciso de la región con base en los valores de medición absolutos corregidos.

El procedimiento descrito anteriormente para determinar mapas térmicos de alta resolución espacial con una alta exactitud de medición se describe además mediante las figuras 3A, 3B, 4A, 4B y 4C. El procedimiento presentado aquí combina la exactitud radiométrica de grandes plataformas satelitales con la capacidad de resolución espacial de una segunda plataforma satelital, por ejemplo, un satélite pequeño o CubeSat. El procedimiento se basa en la suposición de que la intensidad específica (radiancia, radiance) de un punto de imagen resulta de la combinación lineal de sus componentes de subpíxeles (*modelo de mezcla lineal*). Como plataforma satelital grande, idealmente sirve una con una precisión radiométrica muy alta (Sentinel-3) y al mismo tiempo una alta resolución temporal (Meteosat segunda y tercera generación).

- 50 A este respecto, el único requisito para el satélite adicional más pequeño es que este posea la capacidad de capturar imágenes sincrónicas, es decir, capture imágenes IR de la misma región al mismo tiempo. Las imágenes capturadas están representadas esquemáticamente para ambos satélites en las figuras 3A y 3B, donde en este caso la temperatura se ha seleccionado como magnitud de medición relevante. A este respecto, el satélite A (figura 3A) designa la plataforma con alta precisión radiométrica y el satélite B (figura 3B) la plataforma con alta resolución espacial.

- La cuadrícula dibujada muestra qué regiones de la imagen del satélite B se pueden asignar a qué punto de imagen del satélite A. Los datos del satélite B poseen un decalado de temperatura no conocido ΔT en la medición de la temperatura de radiación, que no permite una determinación absoluta exacta de la temperatura del satélite B solo. Las diferencias de temperatura relativas, por ejemplo, entre los puntos de imagen adyacentes, se miden correctamente por el satélite B (garantizado por una calibración previa del instrumento).

- Mediante la captura del satélite A se conoce el valor medio de cada celda de rejilla registrada a partir de la imagen del satélite B. Por lo tanto, se puede calcular el decalado de temperatura aún desconocido ΔT . Esto se da por la diferencia de los valores medios de cada celda de ambas imágenes,

$$\Delta T = T_A(x, y) - \frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in T_A(x,y)} w(i, j) T_B(i, j).$$

A este respecto es válido

5

$$\sum_{(i,j) \in T_A(x,y)} w(i, j) = N.$$

$T_A(x, y)$ es la temperatura medida del satélite A en la celda (x, y) y $T_B(i, j)$ de la medición de temperatura del satélite B en todos los puntos de imagen (i, j) que se sitúan dentro de esta celda (x, y) del satélite A, cada uno con una porción de área de $w(i, j)$.

10

El procedimiento de medición está representado esquemáticamente para una sola celda en las figuras 4A, 4B y 4C: El valor medio de todos los puntos de imagen representados del satélite B (figura 4B) no corresponde todavía al valor del punto de imagen correspondiente del satélite A (figura 4A). Mediante la deducción de un decalado de temperatura resultante de la diferencia se calibra toda la celda de la imagen del satélite B y ahora posee el mismo valor medio como el capturado por el satélite A (figura 4C).

15

Hay varias ventajas sobre las soluciones existentes:

20 El procedimiento presentado combina las ventajas de ambas mediciones, alta precisión radiométrica por un lado y alta resolución espacial por el otro, sin tener que acceder a otras fuentes de datos. Por lo tanto, se pueden implementar resoluciones del orden de magnitud de unos pocos metros, lo que es especialmente importante para aplicaciones en el campo de la UHI y la agricultura asistida por satélite.

25 Debido a la alta resolución espacial del satélite B, no se debe realizar ningún o solo un muestreo descendente muy limitado y el número de clases de superficie por píxel se reduce significativamente a una alta resolución, lo que aumenta la estabilidad y la exactitud de la temperatura de la superficie terrestre, que se puede determinar teniendo en cuenta los modelos de superficie terrestre y los grados de emisión conocidos a partir de la temperatura de radiación dada por el mapa térmico determinado.

30

Además, se evita un uso de la correlación inestable entre imágenes visuales e infrarrojas y se mitiga significativamente el efecto de la homogeneización de la temperatura mediante la elección de demasiado pocas clases de superficie. Además, se evitan errores debido a una gran brecha de resolución entre la resolución en tierra del sensor satelital y la resolución de los datos auxiliares.

35

Ya existen datos térmicos de alta precisión radiométrica que pueden servir como punto de referencia de calibración para el concepto. Así, Copernicus ofrece datos de temperatura a través de Sentinel-3 con una exactitud de $< 0,2$ K a una resolución de 1 km^2 . Estos datos son de libre acceso a través del programa Copernicus. Meteosat-9 ofrece aproximadamente $9 - 15 \text{ km}^2$ de resolución con una exactitud de temperatura de aproximadamente 2 K y una resolución temporal de unos pocos minutos con una cobertura de gran superficie.

40

Con una tasa de repetición de tiempo de aproximadamente $10 - 15$, o hasta 5 minutos sobre Europa a través de Meteosat-9, una sincronización temporal y espacial de los dos flujos de datos también se puede realizar fácilmente.

45 Por lo tanto, el concepto también es adecuado para mediciones con altas tasas de repetición de tiempo cuando se utilizan varios satélites (pequeños) en una constelación adecuada. Por lo tanto, se puede crear una serie temporal de la magnitud de medición dentro de una región, que permite un análisis y/o una visualización de la modificación de la magnitud de medición de una región en el curso de un período de tiempo determinado, por ejemplo, en el curso de un día.

50

En este caso, mapas térmicos previamente determinados de una región se agrupan en una serie temporal, donde los momentos de captura se sitúan respectivamente dos mapas térmicos consecutivos de la serie temporal, respectivamente dentro de un intervalo temporal fijado. Como momento de captación de un mapa térmico se puede considerar en este caso el momento de la captura de las primeras y segundas imágenes térmicas asociadas a este

55

mapa térmico o, en el caso de un pequeño decalado temporal de las dos capturas sincrónicas de las imágenes térmicas por los dos satélites utilizados, también un momento medio o un par de los dos momentos de captura de las imágenes térmicas. El tiempo especificado puede variar según la aplicación, pero en muchos casos se sitúan dentro de unas pocas horas, por debajo de una hora o incluso en el rango de aproximadamente 10 minutos. Por lo tanto, en muchos casos, la captación de varias imágenes consecutivas dentro del período de tiempo fijado solo se puede realizar a

60

través de un satélite geoestacionario o a través de una pluralidad de satélites en una órbita terrestre baja.

Los requisitos para el detector de infrarrojos del satélite B son relativamente bajos, de modo que el enfoque es adecuado para su uso en satélites pequeños o CubeSat significativamente más baratos en comparación con las misiones satelitales tradicionales. Por lo tanto, es posible mejorar la resolución espacial disponible hasta ahora en varios órdenes de magnitud a una fracción del coste de una misión satelital tradicional. La resolución espacial máxima alcanzable está limitada casi solo por el detector y la óptica del satélite.

Se suprime una calibración absoluta compleja y costosa del detector a bordo del satélite B, sin que esto empeore la exactitud de la temperatura de la superficie terrestre resultante. La solución no requiere seguimiento o detección de objetos en la imagen, ni mediciones del suelo.

10

El aumento significativo de la resolución espacial sin la introducción de fuentes de error generadas por el muestreo descendente permite una pluralidad de aplicaciones nuevas o mejoradas, por ejemplo, en la predicción localizada de las condiciones del tráfico (por ejemplo, carreteras mojadas o transitadas), en la investigación ambiental (por ejemplo, movimiento de depósitos de grava en glaciares, incendios forestales), en la agricultura (salud de la vegetación a través de la evapotranspiración), en la medicina (por ejemplo, riesgo para la salud del sobrecalentamiento), así como en la planificación urbana (por ejemplo, determinación de la eficiencia energética de los edificios o medición del microclima urbano).

Esta última es especialmente interesante como aplicación para estudiar los efectos de las islas de calor urbanas y las contramedidas correspondientes. Aumentar la resolución de kilómetros cuadrados al tamaño de un edificio o bloque de edificios proporciona información importante sobre la eficiencia energética, el desarrollo de la temperatura y la influencia de los espacios verdes, los techos verdes o reflectantes o las áreas de agua abierta en el clima urbano. Hasta ahora, las encuestas correspondientes se han basado en una pieza de trabajo de modelos simulados junto con mediciones de suelo aisladas, así como datos que se han generado por uno de los procedimientos de muestreo descendente descritos anteriormente. Un método de alta resolución temporal y espacial puede ayudar a planificar las ciudades del futuro de una manera más saludable y respetuosa con el medio ambiente.

25

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para elaborar un mapa térmico de una región, que comprende las siguientes etapas:

- 5 - recepción de una primera imagen térmica de un primer paisaje que comprende la región, que ha sido captado por un dispositivo de captación de un primer satélite (104), donde la primera imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y la imagen térmica asigna respectivamente por píxel un primer valor de medición a la región (S201);
- 10 - recepción de una segunda imagen térmica de un segundo paisaje que comprende la región, que ha sido captado por un dispositivo de captación de un segundo satélite (105), donde la segunda imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y la imagen térmica asigna respectivamente por píxel un segundo valor de medición a la región (S202);
donde entre la captación de la primera imagen térmica y la captación de la segunda imagen térmica existe un decalado temporal por debajo de una barrera fijada; y una precisión radiométrica de la primera imagen térmica es mayor que una precisión radiométrica de la segunda imagen térmica; y una resolución espacial de la segunda imagen térmica es mayor que una resolución espacial de la primera imagen térmica;
- 15 - determinación de un decalado de valores de medición de un primer grupo de píxeles asignado espacialmente a la región de la segunda imagen térmica, donde el primer grupo de píxeles comprende una pluralidad de píxeles, mediante una comparación de valores de medición relativos de los píxeles del primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica con respecto al primer valor de medición del al menos un píxel de la primera imagen térmica, que está asignado espacialmente al menos parcialmente al primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica (S203),
- 20 - determinación de los valores de medición absolutos corregidos de los píxeles del primer grupo de píxeles asignados a la región con base en los segundos valores de medición de los píxeles del primer grupo de píxeles así como del decalado de valores de medición (S204); y
- 25 - elaboración del mapa térmico preciso de la región con base en los valores de medición absolutos corregidos (S205).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además una determinación de las temperaturas de la superficie terrestre de la región con base en el mapa térmico preciso y modelos de superficie terrestre y/o modelos de emisión.

3. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde las imágenes térmicas son imágenes infrarrojas.

4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la resolución espacial de la segunda imagen térmica es al menos uno o dos órdenes de magnitud mayor que la resolución espacial de la segunda imagen térmica.

5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los valores de medición son valores de temperatura y una desviación radiométrica de la primera imagen térmica por píxel está por debajo 2K y la desviación radiométrica de la segunda imagen térmica está por encima 2K en promedio.

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la primera imagen térmica se ha captado por un dispositivo de captación del primer satélite calibrado para aumentar la precisión radiométrica.

7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la primera imagen térmica se ha captado por el dispositivo de captación de un satélite que dispone de métodos de calibración a bordo.

8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la segunda imagen térmica se ha captado por el dispositivo de captación de un satélite con un peso por debajo de 1000 kg.

9. Procedimiento para determinar una modificación de temperaturas de una región durante un período de tiempo que contiene las etapas siguientes:

- 55 - determinación de un primer mapa térmico de la región en un primer momento según el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 utilizando una primera y segunda imagen térmica recibida;
- 60 - determinación de un segundo mapa térmico de la región en un segundo momento según el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 utilizando una tercera y cuarta imagen térmica recibida,
- 60 - elaboración de una serie temporal de la temperatura de la región basada en el primer y segundo mapa térmico.

10. Procedimiento según la reivindicación 9, donde el primer y el segundo momento se sitúan dentro de un intervalo de tiempo fijado y la primera y la tercera imagen térmica tienen respectivamente una mayor precisión radiométrica que la segunda y la cuarta imagen térmica y se han captado respectivamente por una primera plataforma satelital que dispone de métodos de calibración a bordo, la segunda imagen térmica tiene una resolución espacial más alta que la primera y tercera imagen térmica y se ha captado por el dispositivo de captación de un segundo satélite y la cuarta

imagen térmica tiene una resolución espacial más alta que la primera y tercera imagen térmica y se ha captado por el dispositivo de captación de un tercer satélite, donde el segundo y tercer satélite son satélites diferentes con un peso por debajo de 1000 kg.

5 11. Procedimiento según la reivindicación 9 o 10, que comprende además las siguientes etapas:

- determinación de una pluralidad de mapas térmicos adicionales de la región en momentos adicionales, donde dos momentos consecutivos de los momentos adicionales se sitúan respectivamente dentro de un intervalo de tiempo fijado, y
- 10 - elaboración de una serie temporal de la temperatura de la región con base en el primer mapa térmico, el segundo mapa térmico y los mapas térmicos adicionales.

12. Producto de programa de ordenador para determinar un mapa térmico de una región, donde el producto de programa de ordenador comprende instrucciones que, cuando se ejecutan en un ordenador, realizan el procedimiento

15 según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11.

13. Dispositivo (101) para elaborar un mapa térmico de una región que comprende

- al menos una unidad de recepción (102) configurada para la

20

recepción de una primera imagen térmica de un primer paisaje que comprende la región, que ha sido captado por un dispositivo de captación de un primer satélite (104), donde la primera imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y la imagen térmica asigna respectivamente por píxel un primer valor de medición a la región,

25

recepción de una segunda imagen térmica de un segundo paisaje que comprende la región, que ha sido captado por un dispositivo de captación de un segundo satélite (105), donde la segunda imagen térmica comprende píxeles que están asignados espacialmente a la región y la segunda imagen térmica asigna por píxel un segundo valor de medición a la región,

30

donde entre la captación de la primera imagen térmica y la captación de la segunda imagen térmica existe un decalado temporal por debajo de una barrera fijada; y una precisión radiométrica de la primera imagen térmica es mayor que una precisión radiométrica de la segunda imagen térmica; y una resolución espacial de la segunda imagen térmica es mayor que una resolución espacial de la primera imagen térmica;

- unidad de determinación (103) configurada para la

35

determinación de un decalado de valores de medición de un primer grupo de píxeles asignado espacialmente a la región de la segunda imagen térmica, donde el primer grupo de píxeles comprende una pluralidad de píxeles, mediante una comparación de valores de medición relativos de los píxeles del primer grupo de píxeles con respecto al primer valor de medición del al menos un píxel de la primera imagen térmica, que está asignado espacialmente al menos parcialmente al primer grupo de píxeles de la segunda imagen térmica;

40

determinación de los valores de medición absolutos corregidos de los píxeles del primer grupo de píxeles con base en los segundos valores de temperatura medidos de los píxeles del primer grupo de píxeles así como del decalado de valores de medición;

elaboración del mapa térmico de la región con base en los valores de medición absolutos corregidos.

Fig. 1

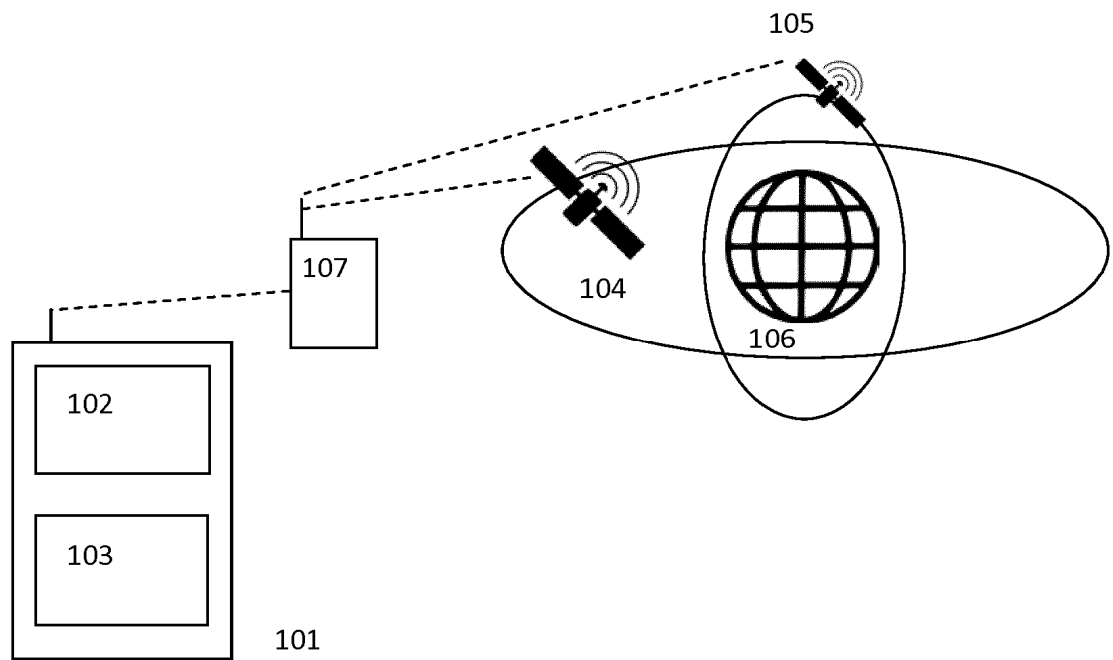


Fig. 2

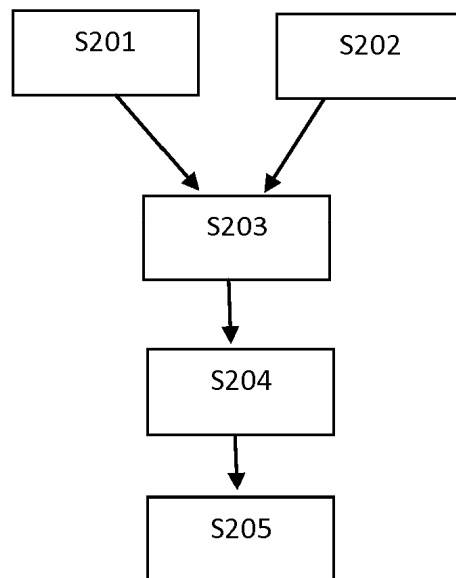


Fig. 3A

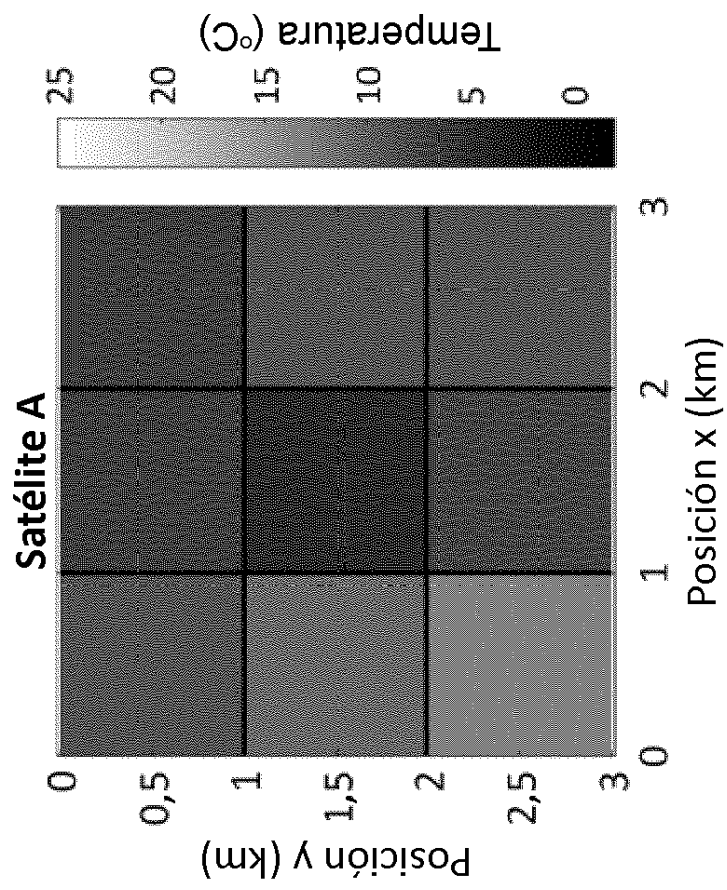


Fig. 3B

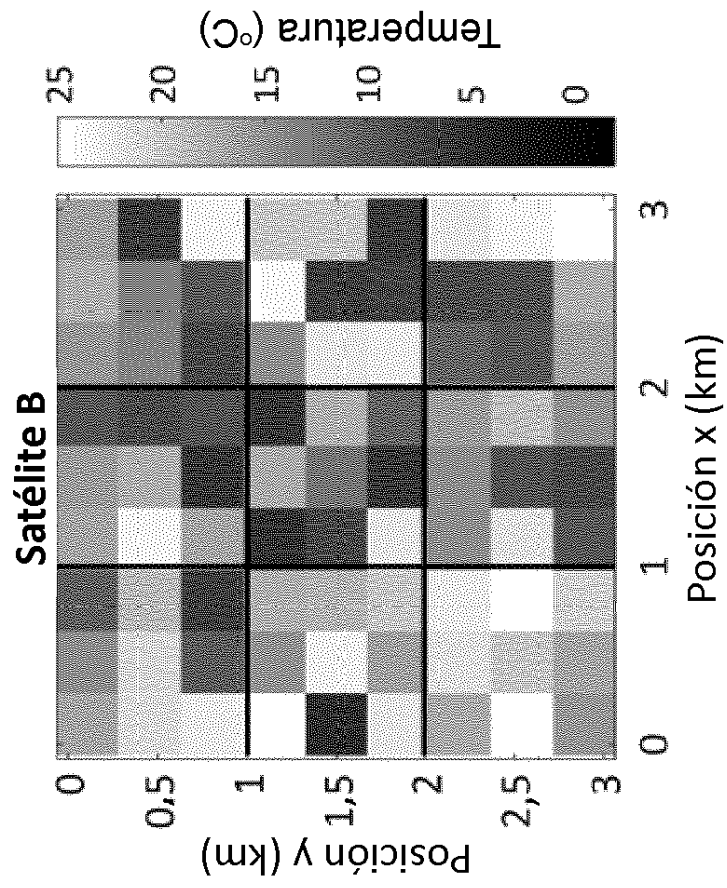


Fig. 4A

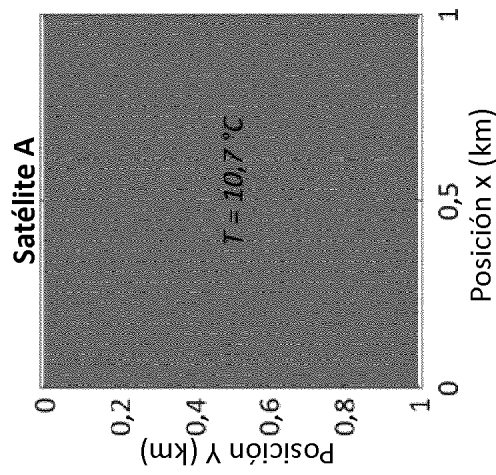


Fig. 4B

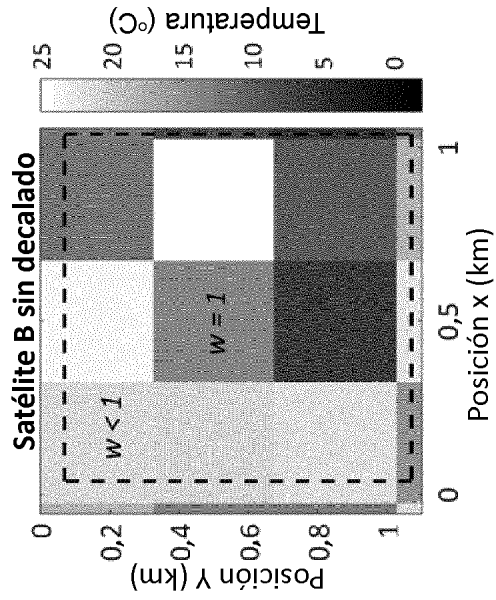


Fig. 4C

