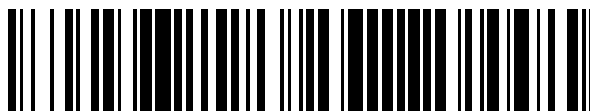


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 778 427**

51 Int. Cl.:

G01S 13/90 (2006.01)

G01S 7/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.10.2016 E 16193951 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.11.2019 EP 3156818**

54 Título: **Geolocalización tridimensional automática de objetivos de SAR y estimación simultánea de retardos de propagación troposférica usando dos imágenes de SAR de apertura larga**

30 Prioridad:

16.10.2015 DE 102015220218

18.12.2015 DE 102015226042

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

10.08.2020

73 Titular/es:

**DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND
RAUMFAHRT E.V. (100.0%)**

**Linder Höhe
51147 Köln, DE**

72 Inventor/es:

**DUQUE, SERGIO;
PARIZZI, ALESSANDRO y
DR. DE ZAN, FRANCESCO**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 778 427 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

Geolocalización tridimensional automática de objetivos de SAR y estimación simultánea de retardos de propagación troposférica usando dos imágenes de SAR de apertura larga

5

Campo de la invención

El propósito principal de la invención es obtener una reconstrucción urbana en 3D absoluta usando únicamente dos adquisiciones de radar de apertura sintética (SAR) espacial. Además, el método de la invención puede derivar estimaciones absolutas del retardo troposférico para ambas adquisiciones.

10

Estado de la técnica

Hasta ahora, obtener una reconstrucción urbana en 3D absoluta usando obtención de imágenes de SAR espacial presenta los siguientes problemas:

15

1) Necesidad de un gran conjunto de imágenes. Esto implica enormes costes económicos para obtener un modelo en 3D de una escena urbana. Además, obtener un gran conjunto de imágenes también requiere tiempo. Normalmente el intervalo de tiempo necesario es de aproximadamente un año.

20

2) Las técnicas basadas en interferometría y tomografía de SAR pueden necesitar puntos de control terrestres. No siempre están disponibles en todas partes puntos de control terrestres fiables. Algunas veces se necesita llevar a cabo estudios de terreno dedicados para obtener puntos de control terrestres fiables lo cual también implica un coste económico.

25

3) Para una geolocalización en 3D precisa usando señales de radar, se necesita tener en cuenta el retardo de trayecto de señal adicional debido al desplazamiento a través de medios diferentes del vacío (es decir, la atmósfera). Esto implica la necesidad de datos externos para estimar los retardos ionosféricos y troposféricos observados por la geometría de sensor. Esta estimación depende de varios modelos diferentes y se necesita proyectar en la línea de visión (LOS) del radar.

30

Por consiguiente, puede no ser preciso e influir en la precisión del posicionamiento en 3D.

4) Las técnicas basadas en radargrametría de SAR presentan problemas para identificar automáticamente los objetivos puntuales dentro de las diferentes geometrías empleadas.

35

El estado de la técnica para la geolocalización en 3D absoluta en situaciones urbanas usando SAR comprende técnicas de radargrametría e interferométricas tales como interferometría de dispersión permanente (PSI) y tomografía de SAR.

40

El primer DEM preciso urbano usando interferometría de dispersión permanente se explica en Perissin, D.; Rocca, F., "High-Accuracy Urban DEM Using Permanent Scatterers", *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transaction on*, vol. 44, n.º 11, págs. 3338, 3347, noviembre de 2006 (doi: 10.1109/TGRS.2006.877754). Este método conocido requiere un gran número de imágenes para reducir las alteraciones troposféricas, el trabajo descrito en la referencia facilitada emplea 100 imágenes. Además, se necesitan puntos de control terrestres (puntos 1 y 2 anteriores).

45

Se realiza un procesamiento de PSI más avanzado usando diferentes geometrías de adquisiciones en Gernhardt, Stefan y Bamler, Richard. "Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 73 (2012): 68-79. En este caso, se generan dos nubes de puntos diferentes y se fusionan en una etapa de procesamiento posterior. El artículo citado proporciona una geolocalización en 3D absoluta precisa así como movimiento de los objetivos puntuales seleccionados. De nuevo, se necesita un gran número de imágenes a partir de ambas geometrías y se necesitan puntos de control terrestres (puntos 1 y 2 anteriores).

50

Se aplica radargrametría de SAR a situaciones urbanas en Goel, K.; Adam, N., "Three-Dimensional Positioning of Point Scatterers Based on Radargrammetry", *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 50, n.º 6, págs. 2355, 2363, junio de 2012 (doi: 10.1109/TGRS.2011.2171975). El método propuesto en este artículo requiere tres pilas de imágenes a partir de geometrías diferentes. Sin embargo, este método no requiere ningún punto de control terrestre. En este artículo, no se tienen en cuenta retardos de trayecto de señal. Esto significa que es posible tener un sesgo de altura significativo de algunos metros cuando se aplica este método (puntos 1 y 3 anteriores).

55

60

La siguiente referencia, Xiao Xiang Zhu; Bamler, R., "Superresolving SAR Tomography for Multidimensional Imaging of Urban Areas: Compressive sensing-based TomoSAR inversion", *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 31, n.º 4, págs. 51, 58, julio de 2014 (doi: 10.1109/MSP.2014.2312098) se refiere a tomografía de SAR en situaciones urbanas.

65

La tomografía de SAR es una evolución de la interferometría de SAR. Su particularidad es que puede distinguir entre diferentes dispersiones dentro de la misma celda de resolución. Por tanto, la salida de tomografía de SAR es una nube de puntos más densa que una nube de puntos de PSI en condiciones similares. La tomografía de SAR aplicada a situaciones urbanas logra una precisión mejor en la geolocalización y monitorización de objetivos en 3D que PSI. Presenta precisiones de posicionamiento típicas del orden de algunos centímetros. Sin embargo, de nuevo, habitualmente necesita un gran número de imágenes para lograr esta precisión. Además, también emplea puntos de control y una estimación *a priori* de los retardos de trayecto de señal (puntos 1, 2 y 3 anteriores).

Hay algunos trabajos recientes relacionados con la obtención de la localización en píxeles absoluta de una imagen de SAR. Esto significa encontrar dónde debe aparecer un objetivo puntual en la imagen de SAR dada su posición en 3D terrestre y aplicar un conjunto de correcciones de retardo de trayecto y geodinámicas. Los siguientes trabajos llevados a cabo usando datos de TerraSAR-X muestran que es posible lograr un acuerdo alrededor del nivel de centímetros entre dónde aparece el objetivo puntual y dónde debería aparecer según su posición en 3D terrestre y todas las correcciones aplicadas.

Los siguientes dos artículos, concretamente Eineder, M.; Minet, C.; Steigenberger, P.; Xiaoying Cong; Fritz, T., "Imaging Geodesy-Toward Centimeter-Level Ranging Accuracy With TerraSAR-X", *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 49, n.º 2, págs. 661, 671, febrero de 2011 (doi: 10.1109/TGRS.2010.2060264), y Balss, Ulrich; Gisinger, Christoph; Cong, Xiao Ying; Brcic, Ramon; Hackel, Stefan; Eineder, Michael, "Precise Measurements on the Absolute Localization Accuracy of TerraSAR-X on the Base of Far-Distributed Test Sites", *EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar; Proceedings of*, vol., n.º, págs. 1, 4, 3-5 de junio de 2014, muestran el potencial de usar adquisiciones de TerraSAR-X para una geolocalización precisa. Los trabajos se limitan a las dimensiones de geometría, alcance (es decir, distancia) y acimut de radar en 2-D. El buen acuerdo entre varias medidas se debe a tener en cuenta todas las correcciones posibles y también a la buena precisión de órbita proporcionada con productos de TerraSAR-X. El segundo trabajo muestra la repetibilidad de los buenos resultados en diferentes sitios de prueba.

La siguiente referencia se refiere a un artículo muy reciente, concretamente Duque, S.; Breit, H.; Balss, U.; Parizzi, A., "Absolute Height Estimation Using a Single TerraSAR-X Staring Spotlight Acquisition", *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. PP, n.º 99, págs. 1, 5 (doi: 10.1109/LGRS.2015.2422893). Este trabajo muestra que es posible obtener las coordenadas en 3D de objetivos puntuales usando una única adquisición de Staring Spotlight (ST) de TerraSAR-X, es decir, tan solo una imagen. Se basa en la sensibilidad de enfoque de aperturas largas espaciales frente a la altura. Este trabajo asocia el efecto de desenfoque con una altura absoluta. Las precisiones obtenidas son del orden de 10 metros para objetivos brillantes en situaciones urbanas. En este estudio también se muestra que hay un efecto de acoplamiento de altura y retardo de trayecto de señal. Por tanto, con el fin de obtener alturas absolutas, se necesita proporcionar el retardo de trayecto de señal troposférico.

Sumario de la invención

Un objetivo de la presente invención es mejorar los métodos de la técnica anterior para obtener geolocalización en 3D mediante imágenes de SAR.

Este objetivo se resuelve según la invención por medio de un método para la geolocalización tridimensional automática de objetivos de SAR y estimación simultánea de retardos de propagación troposférica usando dos imágenes de SAR de apertura larga, que comprende

a) como entrada en el método: dos adquisiciones de SAR con apertura larga adquiridas con geometría diferente,

b) detección de objetivo puntual en ambas imágenes, y

c) proporcionar un análisis de desenfoque para todos los objetivos puntuales en ambas imágenes, que tiene, para cada objetivo puntual, como salida una relación entre la altura estimada y el retardo troposférico,

d) se selecciona una de las dos imágenes como imagen maestra y la otra como esclava,

e) después, para cada objetivo puntual de la imagen maestra se realizan las siguientes subetapas:

e1) se mapea el objetivo puntual en la imagen esclava teniendo en cuenta su estimación de altura a partir de la etapa c) a un retardo de trayecto de cénit de referencia y su alcance y posición de acimut,

e2) una búsqueda de candidatos en la imagen esclava que puede hacer referencia al objetivo puntual mapeado a partir de la imagen maestra e identificar la posición de un candidato en la imagen esclava, en el que puede encontrarse más de un candidato, y

e3) después de eso, para cada candidato se resuelve un sistema de ecuaciones compuesto por cuatro

ecuaciones, en el que dos ecuaciones están relacionadas con el desplazamiento de alcance y de acimut entre el objetivo puntual mapeado de la imagen maestra y la posición de un candidato encontrado en la imagen esclava y en el que las otras dos ecuaciones hacen referencia a la relación establecida en la etapa c) entre la altura y el retardo troposférico para los objetivos puntuales mapeados de la imagen maestra y un candidato encontrado de la imagen esclava.

f) se realizan estimaciones estadísticas del retardo troposférico para identificar para todos los objetivos puntuales los candidatos que es más probable que estén asociados con los objetivos puntuales mapeados respectivos de la imagen maestra.

Realizaciones individuales de la invención son el objeto de las reivindicaciones dependientes.

Según una realización preferida, para cada objetivo puntual de una imagen o de una imagen se realizan las siguientes subetapas:

- se mapea el objetivo puntual en la otra imagen teniendo en cuenta su estimación de altura en la etapa anterior y su alcance y posición de acimut,

- una búsqueda de candidatos que puede hacer referencia al mismo objetivo puntual físico, en el que puede aparecer más de un candidato para el objetivo puntual mapeado, y

- después de eso, para cada candidato se resuelve el siguiente sistema de ecuaciones, en el que las salidas son la altura absoluta precisa estimada y el retardo troposférico del objetivo para ambas imágenes

$$\begin{cases} \Delta Rg = K_{Rg} \cdot (h - h_{ref}^M) + \beta_{Rg}^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) + \beta_{Rg}^S \cdot (ZPD_S - ZPD_{ref}) \\ \Delta Az = K_{Az} \cdot (h - h_{ref}^M) + \beta_{Az}^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) \\ h_{ref}^M = h + \alpha^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) \\ h_{ref}^S = h + \alpha^S \cdot (ZPD_S - ZPD_{ref}) \end{cases}$$

Además, se prefiere que se realicen estimaciones estadísticas del retardo troposférico que aprovechan su carácter de paso bajo espacial y consiguiente identificación automática de los objetivos correctos entre la nube de candidatos.

El método de la invención se basa en dos adquisiciones de SAR con apertura larga adquiridas con geometrías diferentes, es decir, direcciones de vuelo diferentes y ángulos de incidencia diferentes. Estas dos imágenes son la entrada en el método. Después, tienen lugar las siguientes etapas:

- Detección de objetivo puntual independientemente en ambas imágenes.
- Análisis de desenfoque de objetivo puntual. En este caso, el método establece para cada objetivo puntual una relación entre la altura estimada y el retardo troposférico.
- Después, para cada objetivo puntual de una imagen, se producen las siguientes subetapas
 - Se mapea el objetivo puntual en la otra imagen teniendo en cuenta su estimación de altura en la etapa anterior y su alcance y posición de acimut.
 - Una búsqueda de candidatos que puede hacer referencia al mismo objetivo puntual físico. Puede aparecer más de un candidato para el objetivo puntual mapeado.
 - Después, para cada candidato, se resuelve un sistema de ecuaciones. En el caso en el que el candidato corresponde al objetivo puntual en estudio de la primera imagen, las salidas del sistema de ecuaciones son la altura absoluta precisa estimada y el retardo troposférico del objetivo para ambas imágenes. De lo contrario, las salidas serán aleatorias y sin sentido físico.
- Estimación estadística del retardo troposférico aprovechando su carácter de paso bajo espacial y consiguiente identificación automática de los objetivos correctos entre la nube de candidatos.

Las dos adquisiciones de SAR pueden obtenerse por medio de un sistema de SAR que obtiene imágenes de la zona dos veces en dos puntos de tiempo diferentes y con geometría diferente, o por medio de dos sistemas de SAR que cubren la zona con geometrías diferentes. Según la invención, "apertura de SAR larga" significa las que proporcionan una resolución por debajo de dos metros mientras que "con geometría diferente" se refiere a direcciones de vuelo diferentes y ángulos de incidencia diferentes. En este caso, las "direcciones de vuelo

diferentes” significa que difieren al menos en una décima de grado y “ángulos de incidencia diferentes” significa que difieren en al menos un grado. Ambas diferencias se definen para un sistema en la banda X y con resoluciones de acimut y de alcance por debajo del metro. Para sistemas con características diferentes, la diferencia debe ajustarse a escala en consecuencia. Tal ajuste a escala y adaptación son sencillos y típicos en los campos de interferometría o radargrametría. La diferencia de dirección de vuelo mínima debe ajustarse a escala de manera lineal con la resolución de acimut mientras que la diferencia de ángulo de incidencia debe ajustarse a escala de manera lineal con la resolución de alcance. Es decir, en un sistema de SAR con una resolución de 20 cm x 20 cm, solo se necesita la mitad de las diferencias angulares en comparación con un sistema de SAR con una resolución de 40 cm x 40 cm.

El aspecto innovador de la invención es el reducido número o cantidad de imágenes empleadas, la derivación de altura absoluta, la coincidencia radargamétrica automática sin usar información *a priori* y la derivación de los retardos de trayecto de señal absolutos para ambas adquisiciones.

La invención puede caracterizarse por la siguiente combinación de características:

- aprovechar la diversidad geométrica de aperturas de SAR largas
- estimación conjunta con tan solo dos imágenes de todos los parámetros implicados (altura de objetivo puntual y retardos troposféricos en ambas adquisiciones)
- sin necesidad de ningún punto de control terrestre
- coincidencia automática de puntos en dos adquisiciones sin ninguna información *a priori*.

La invención resuelve los primeros cuatro puntos planteados anteriormente mencionados de la siguiente manera:

1) Solo necesita un número mínimo de dos imágenes adquiridas con geometrías diferentes. Esto significa costes reducidos y un transcurso de tiempo de adquisición que puede ser inferior a una semana incluso con sistemas de SAR espaciales actuales.

2) No hay absolutamente ninguna necesidad de puntos de control terrestres.

3) La invención propuesta estima los retardos de trayecto sin ninguna necesidad de información externa.

4) La invención propuesta identifica automáticamente objetivos puntuales en las dos geometrías de obtención de imágenes, basándose únicamente en propiedades de señal de radar. En particular, no hay ninguna necesidad de algoritmos de coincidencia como los usados en visión artificial.

Breve descripción del dibujo

A continuación en el presente documento, se describirá la invención en más detalle haciendo referencia al dibujo, en el que

la figura 1 es un diagrama de flujo del método propuesto,

la figura 2 es un ejemplo de altura encontrada mediante análisis de objetivo puntual suponiendo diferentes retardos troposféricos a nivel del mar,

la figura 3 es un esquema de búsqueda de candidato en la imagen esclava para un objetivo puntual en la imagen maestra,

la figura 4(a) y (b) es un ejemplo de dos adquisiciones con ángulos de incidencia diferentes, (a) 36° y (b) 54°, sobre la misma fachada de edificio,

la figura 5(a) y (b) muestra un punto seleccionado marcado mediante un círculo blanco en la imagen maestra (a) y sus candidatos en (b) también marcados mediante círculos blancos. La zona de búsqueda de candidato está marcada mediante puntos blancos. El mapeo del objetivo puntual dada la altura *a priori* a partir del análisis de enfoque automático suponiendo el ZPD de referencia, el alcance y la posición maestra de acimut están marcados mediante un rombo blanco,

la figura 6 es un histograma en 2D para todos los candidatos de solución de ZPD_M y ZPD_S y

la figura 7 es una comparación para el ejemplo dado entre las alturas obtenidas usando la invención propuesta y las alturas esperadas derivadas a partir de medidas de LiDAR.

Descripción de la realización preferida de la invención

En la figura 1 se ilustra el diagrama de bloques de una realización propuesta del método según la invención. La entrada de este método consiste únicamente en dos adquisiciones de SAR espaciales con aperturas largas y geometrías diferentes. Obsérvese también que, debido a la geometría de adquisición diferente, las adquisiciones deben presentar también un ángulo de rumbo ligeramente diferente. En primer lugar, se identifican independientemente todos los objetivos puntuales posibles en ambas imágenes.

A partir de ahora, se establece una imagen como referencia y se denomina maestra. La otra imagen se denominará esclava. Después, se analiza cada objetivo puntual a partir de cada imagen en cuanto al desenfoque de acimut. Este análisis asocia el desenfoque con el retardo troposférico y la altura del objetivo puntual.

Hay un acoplamiento entre la altura y el retardo troposférico en lo que se refiere a los parámetros de enfoque. Un retardo troposférico no tenido en cuenta durante el enfoque de SAR tiene el mismo efecto que suponer una altura equivocada. Por tanto, a partir del análisis de desenfoque, es posible obtener una estimación de altura para cada objetivo puntual en función de su retardo troposférico. La expresión vinculante entre la altura y el retardo troposférico para un objetivo puntual en la imagen maestra es altamente lineal. Tiene la siguiente forma

$$h_{ref}^M = h + \alpha^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) \quad (1)$$

En este caso, h es la altura absoluta verdadera del objetivo, h_{ref}^M es la altura obtenida a partir del enfoque automático de la imagen maestra suponiendo un retardo de trayecto de cénit (ZPD) troposférico de referencia, ZPD_M es el ZPD verdadero para el objetivo durante la adquisición maestra, ZPD_{ref} es el ZPD de referencia y α^M es el coeficiente lineal para la imagen maestra. La figura 2 muestra la altura absoluta derivada a partir del enfoque automático para un determinado objetivo puntual (PT). Tal como puede observarse, la altura obtenida depende linealmente del ZPD a nivel del mar.

A partir de ahora, dado que el retardo troposférico puede variar significativamente en altura, del orden de 2-3 cm en 100 m de altura, los términos ZPD_M , ZPD_S y ZPD_{ref} hacen referencia a una altura de referencia constante. La traslación de ZPD desde una altura a otra puede realizarse usando alguno de los modelos de retardo troposférico disponibles. Esta etapa puede realizarse de manera opcional. En caso de no realizarse o no realizarse de manera apropiada, empeorará la etapa de coincidencia automática pero puede no ser crítico.

La siguiente etapa se lleva a cabo para todos los PT en la imagen maestra. Se mapea cada objetivo en la geometría esclava teniendo en cuenta su alcance y posición maestra de acimut y la altura derivada para ZPD de referencia. Después, tiene lugar la búsqueda de candidatos de objetivo puntual en la imagen esclava haciendo referencia al mismo objetivo. De manera ideal, si no había ninguna influencia del retardo troposférico no tenido en cuenta, el objetivo puntual correspondiente debe aparecer en la imagen esclava a lo largo de una línea. Obsérvese que esta línea no es paralela a la dirección de alcance debido a la diferencia de ángulo de rumbo entre adquisiciones. Su dirección es una combinación de alcance y acimut. Los valores posibles de ZPD troposférico pueden limitarse de manera razonable. Por ejemplo, un intervalo de búsqueda razonable para ZPD troposférico a nivel del mar puede oscilar entre 2,3 y 3 metros. Teniendo en cuenta esta posible variación de ZPD y el error de altura de enfoque automático, es posible determinar una zona en la que debería aparecer el objetivo puntual en la imagen esclava. Los PT de la imagen esclava que se encuentran dentro de esta zona son los candidatos. La figura 3 ilustra el procedimiento de mapear un PT a partir de la imagen maestra en la imagen esclava y buscar sus candidatos coincidentes.

Después, la siguiente etapa es resolver un sistema de ecuaciones lineales para cada candidato. El sistema de ecuaciones está compuesto por cuatro ecuaciones. Dos de ellas están relacionadas con las diferencias de alcance y de acimut (ΔR_g y ΔA_z) entre las posiciones del punto mapeado a partir de la maestra y un candidato. Las otras dos están relacionadas con el vínculo entre altura de objetivo puntual y el retardo troposférico en la adquisición maestra y esclava tal como se ha descrito en (1). Por tanto, el sistema de ecuaciones puede expresarse mediante

$$\begin{cases} \Delta R_g = K_{Rg} \cdot (h - h_{ref}^M) + \beta_{Rg}^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) + \beta_{Rg}^S \cdot (ZPD_S - ZPD_{ref}) \\ \Delta A_z = K_{Az} \cdot (h - h_{ref}^M) + \beta_{Az}^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) \\ h_{ref}^M = h + \alpha^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) \\ h_{ref}^S = h + \alpha^S \cdot (ZPD_S - ZPD_{ref}) \end{cases} \quad (2)$$

En este caso, K_{Rg} , K_{Az} , β_{Rg}^M , β_{Rg}^S , β_{Az}^M , α^M y α^S pueden considerarse parámetros constantes, pueden calcularse numéricamente o derivarse de manera teórica. Además, h_{ref}^M y h_{ref}^S se refieren a la altura obtenida a partir del

- análisis de desenfoque de objetivo puntual para la imagen maestra y esclava respectivamente dado el ZPD de referencia, es decir, ZPD_{ref} . El sistema de ecuaciones está compuesto por cuatro ecuaciones y tiene tres incógnitas, la altura del objetivo y sus retardos troposféricos para las adquisiciones maestra y esclava, es decir, h , ZPD_M y ZPD_S , respectivamente. Dado que las ecuaciones no son linealmente dependientes, es posible encontrar una
- 5 solución y recuperar las incógnitas. El problema en este punto es que puede haber múltiples candidatos para cada i-ésimo PT maestro. La figura 4 muestra un ejemplo de dos adquisiciones de SAR de TerraSAR-X en modo Staring Spotlight sobre una fachada de edificio con dos ángulos de incidencia diferentes, (a) se refiere a la imagen maestra con un ángulo de incidencia de 36° mientras que (b) es la imagen esclava adquirida con 54° .
- 10 Esta situación se muestra en este caso con el fin de ayudar a comprender el método descrito de la invención. La figura 5 muestra un ejemplo de buscar candidatos de un punto seleccionado en la imagen maestra. El punto seleccionado está marcado mediante un círculo blanco en la imagen maestra, figura 5(a). El mapeo del objetivo puntual detectado en la imagen maestra sobre la geometría esclava se representa gráficamente (en la esclava) como un rombo blanco, figura 5 (b). Tal mapeo, junto con las coordenadas maestras (alcance y acimut), aprovecha
- 15 la altura derivada en el análisis de enfoque automático (suponiendo, en esta primera etapa, un ZPD de referencia). La zona de búsqueda teniendo en cuenta la altura de enfoque automático derivada, su precisión y valores posibles razonables de retardos troposféricos para maestra y esclava está marcada mediante puntos blancos en la imagen esclava, figura 5(b). Aparecen dos candidatos en la imagen esclava, figura 5(b), marcados mediante círculos blancos.
- 20 El método de la invención propuesta consiste en resolver el sistema de ecuaciones para todos los candidatos posibles para cada PT seleccionado en la imagen maestra. Después de eso, es posible aprovechar el comportamiento espacial del retardo troposférico para determinar qué candidatos son los objetivos puntuales verdaderos a partir de la imagen maestra. El retardo troposférico varía lentamente (es decir, tiene una característica
- 25 de paso bajo) en el plano horizontal. Este efecto se aprovecha mediante este método para lograr la coincidencia automática. La variación horizontal de retardo troposférico puede considerarse despreciable para distancias de algunos cientos de metros.
- 30 Todas las soluciones encontradas de ZPD para maestra y esclava se analizan juntas para todos los candidatos dentro de un intervalo espacial relativamente pequeño. La figura 6 muestra el histograma en 2D de ZPD a la altura de referencia para adquisiciones maestra y esclava para el caso de fachada mostrado anteriormente. En este caso, aparecen tres distribuciones gaussianas principales debido al patrón regular de los objetivos puntuales en la fachada. Sin embargo, hay una distribución con mucha más energía. En este caso, se ha seleccionado una fachada específica que sigue alguna distribución de patrón de objetivo puntual. Normalmente, en una prueba más
- 35 heterogénea, el histograma en 2D esperado presentará una distribución gaussiana rodeada por ruido. La potencia de ruido dependerá de la densidad de objetivos puntuales de la escena. Por tanto, una vez en este punto, el problema puede resolverse como un problema de radar clásico de razón de falsas alarmas constante (CFAR). Los candidatos que dan una solución de ZPD para maestra y esclava alrededor de la distribución principal serán los que coincidan más probablemente con los objetivos puntuales en la imagen maestra.
- 40 Por tanto, al final el método puede realizar una coincidencia automática de objetivos puntuales entre imágenes maestra y esclava y derivar la altura del objetivo puntual y retardos troposféricos para ambas adquisiciones. Como ejemplo final, la figura 7 muestra una comparación en representación gráfica para el ejemplo dado entre las alturas obtenidas usando la invención propuesta y las alturas esperadas derivadas a partir de medidas de LiDAR. La
- 45 desviación estándar entre ambas es de tan solo 15,7 cm.
- El método de la invención descrito en este caso puede obtener posicionamiento en 3D absoluto preciso usando tan solo dos adquisiciones de SAR de apertura larga.
- 50 Una aplicación comercial directa para esto es el mapeo en 3D de ciudades. Los datos pueden adquirirse en el plazo de tan solo algunos días y no hay ninguna necesidad de ningún estudio de terreno, todo puede realizarse de manera remota y con bajo coste. La metodología propuesta también puede aplicarse a analizar características de ciudades tales como densidad de edificios, distribución de altura de edificios, zonas sin construir, etc. Estudios repetidos pueden monitorizar rápidamente la evolución de la estructura urbana.
- 55 El retardo troposférico absoluto derivado puede aplicarse a la predicción meteorológica, mejora de modelos meteorológicos y otros productos de procesamiento de SAR en los que la estimación de retardo troposférico desempeña un papel importante, por ejemplo, productos de interferometría de dispersión persistente (PSI).

REIVINDICACIONES

1. Método para la geolocalización tridimensional automática de objetivos de SAR y estimación simultánea de retardos de propagación troposférica usando dos imágenes de SAR de apertura larga que proporcionan, cada una, una resolución por debajo de dos metros, que comprende

a) dos adquisiciones de SAR con apertura larga adquiridas con geometría diferente que se proporcionan como entrada en el método,

b) detección de objetivo puntual en ambas imágenes,

c) proporcionar un análisis de desenfoque para todos los objetivos puntuales en ambas imágenes, en el que para cada objetivo puntual se establece una relación entre una altura estimada y un retardo troposférico,

d) se selecciona una de las dos imágenes como imagen maestra y la otra como esclava,

e) después, para cada objetivo puntual de la imagen maestra se realizan las siguientes subetapas:

e1) se mapea el objetivo puntual en la imagen esclava teniendo en cuenta su estimación de altura a partir de la etapa c) a un retardo de trayecto de cénit de referencia y su alcance y posición de acimut,

e2) una búsqueda de candidatos en la imagen esclava que puede hacer referencia al objetivo puntual mapeado a partir de la imagen maestra e identificar la posición de un candidato en la imagen esclava, en el que puede encontrarse más de un candidato, y

e3) después de eso, para cada candidato se resuelve un sistema de ecuaciones compuesto por cuatro ecuaciones, en el que dos ecuaciones están relacionadas con las diferencias de alcance y de acimut ΔR_g y ΔA_z entre la posición del objetivo puntual mapeado a partir de la imagen maestra y la posición de un candidato encontrado en la imagen esclava y en el que las otras dos ecuaciones hacen referencia a la relación establecida en la etapa c) entre la altura y el retardo troposférico para los objetivos puntuales mapeados de la imagen maestra y un candidato encontrado de la imagen esclava, y

f) se realizan estimaciones estadísticas del retardo troposférico para identificar para todos los objetivos puntuales los candidatos que es más probable que estén asociados con los objetivos puntuales mapeados respectivos de la imagen maestra.

2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque el sistema de ecuaciones mencionado puede describirse de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \Delta R_g = K_{Rg} \cdot (h - h_{ref}^M) + \beta_{Rg}^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) + \beta_{Rg}^S \cdot (ZPD_S - ZPD_{ref}) \\ \Delta A_z = K_{Az} \cdot (h - h_{ref}^M) + \beta_{Az}^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) \\ h_{ref}^M = h + \alpha^M \cdot (ZPD_M - ZPD_{ref}) \\ h_{ref}^S = h + \alpha^S \cdot (ZPD_S - ZPD_{ref}) \end{cases} \quad (3)$$

en el que

- las ecuaciones primera y segunda se refieren respectivamente a las diferencias de alcance y de acimut entre la posición del objetivo puntual mapeado a partir de la imagen maestra y la posición de candidato en la imagen esclava,

- las ecuaciones tercera y cuarta están relacionadas con la relación derivada a partir del análisis de desenfoque de objetivo puntual entre la altura y el retardo troposférico para los objetivos puntuales de las imágenes maestra y esclava respectivamente,

- K_{Rg} , K_{Az} , β_{Rg}^M , β_{Rg}^S , β_{Az}^M , α^M y α^S representan las dependencias entre las diferentes medidas y las diferentes incógnitas y pueden calcularse numéricamente o derivarse de manera teórica,

- h_{ref}^M y h_{ref}^S se refieren a la altura obtenida a partir del análisis de desenfoque de objetivo puntual para los objetivos puntuales de las imágenes maestra y esclava respectivamente dado el retardo de trayecto de cénit de referencia, es decir, ZPD_{ref} ,

- 5
- el sistema de ecuaciones está compuesto por cuatro ecuaciones y tiene tres incógnitas, concretamente la altura del objetivo puntual y su retardo troposférico para la imagen maestra y esclava, es decir, h , ZPD_M y ZPD_S respectivamente,
- 10
3. Método según la reivindicación 1 o 2, caracterizado porque
- geometría diferente se refiere a direcciones de vuelo diferentes y ángulos de incidencia diferentes, en el que direcciones de vuelo diferentes significa que las direcciones de vuelo diferentes difieren en al menos una décima de grado y ángulos de incidencia diferentes significa que los ángulos de incidencia difieren al menos en un grado,
- 15
- en el que ambas diferencias se definen para un sistema en la banda X y con resoluciones de acimut y de alcance por debajo del metro.
- 20
4. Método según la reivindicación 3, caracterizado porque dichas imágenes de SAR se obtienen mediante sistemas de SAR con características diferentes, en el que las diferencias en dirección de vuelo y ángulo de incidencia se ajustan a escala en consecuencia.
- 25
5. Método según la reivindicación 4, caracterizado porque las diferencias en dirección de vuelo y ángulo de incidencia se ajustan a escala de manera lineal con la resolución de acimut y de alcance respectivamente.

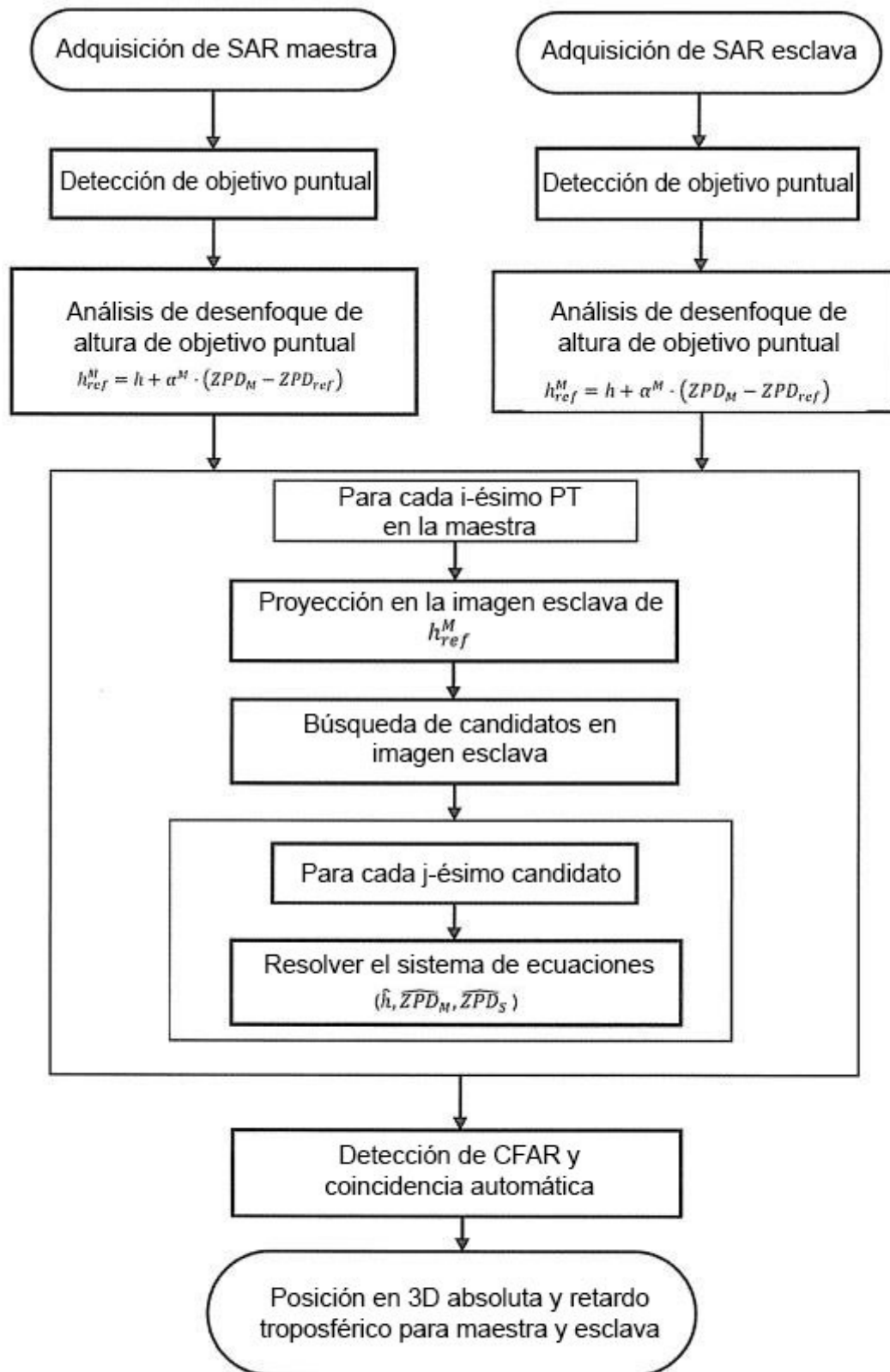


Figura 1

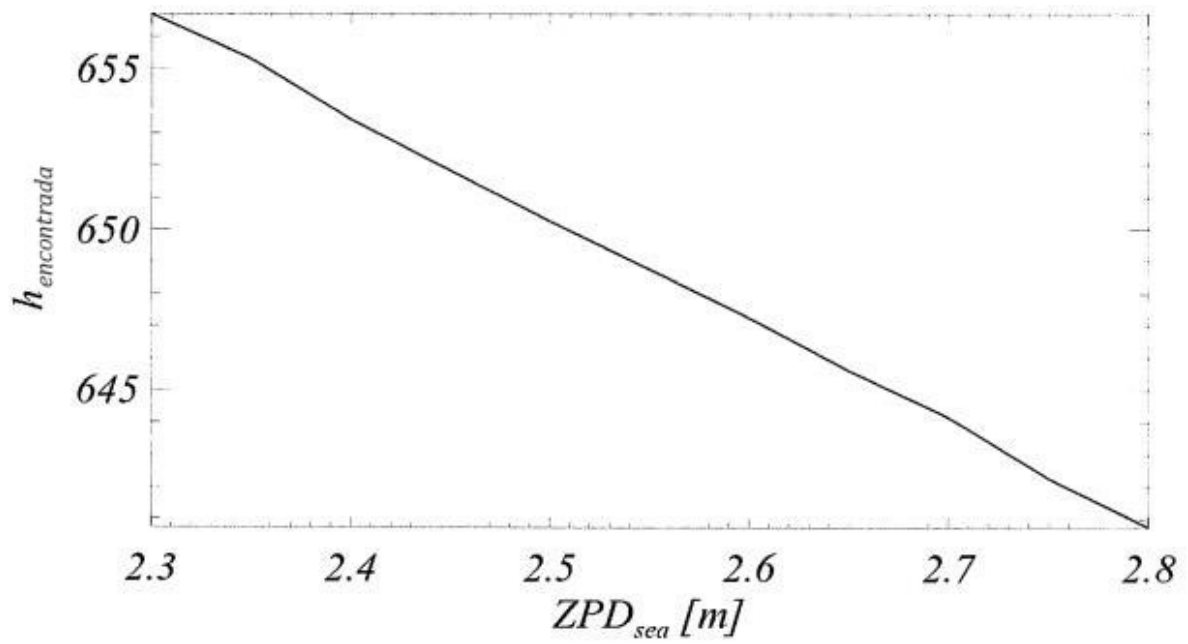


Fig. 2

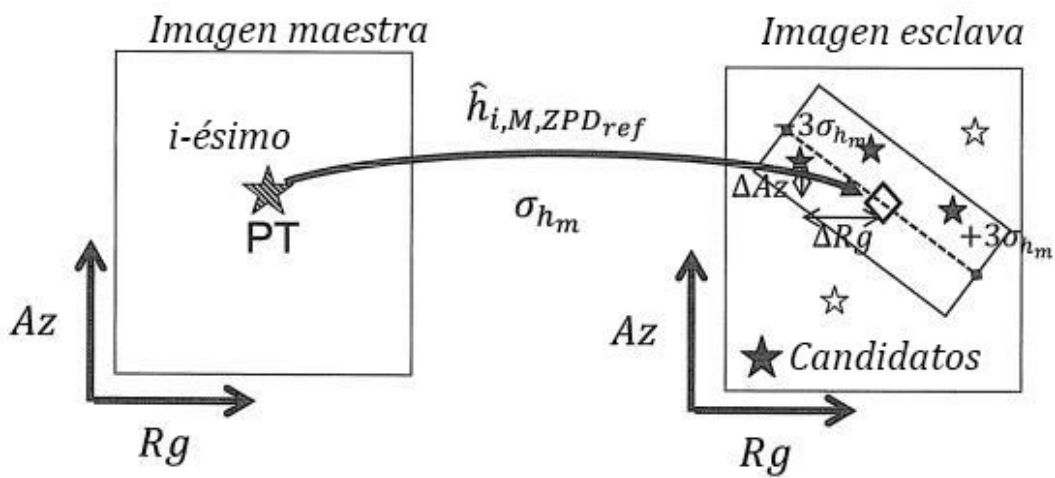


Fig. 3

Imagen maestra

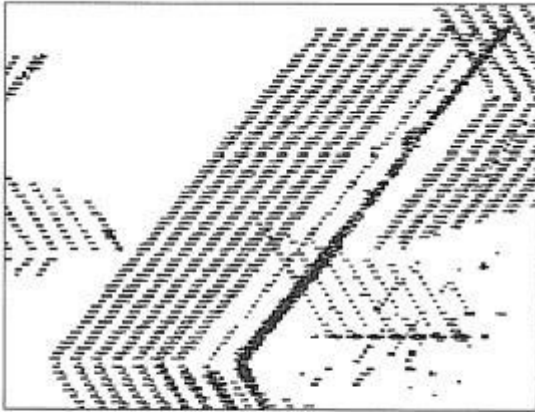


Fig. 4a

Imagen esclava

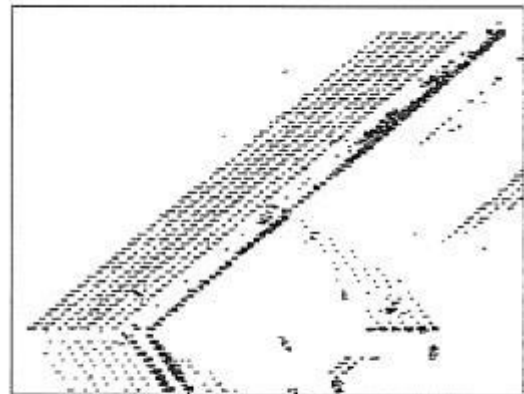


Fig. 4b

Imagen maestra

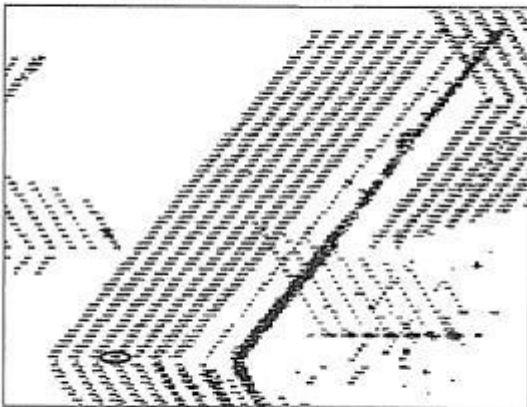


Figura 5a

Imagen esclava

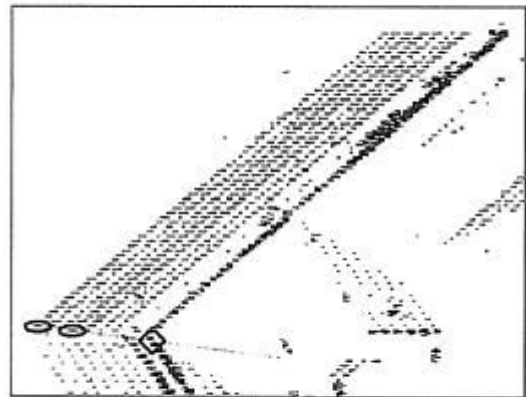


Figura 5b

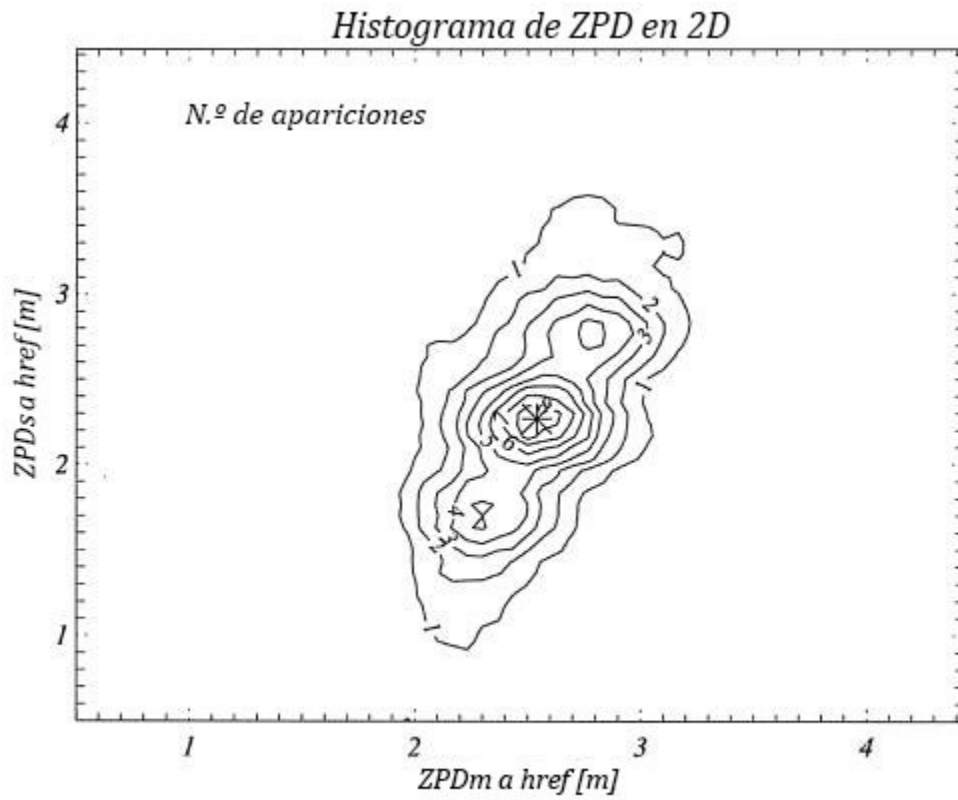


Fig. 6

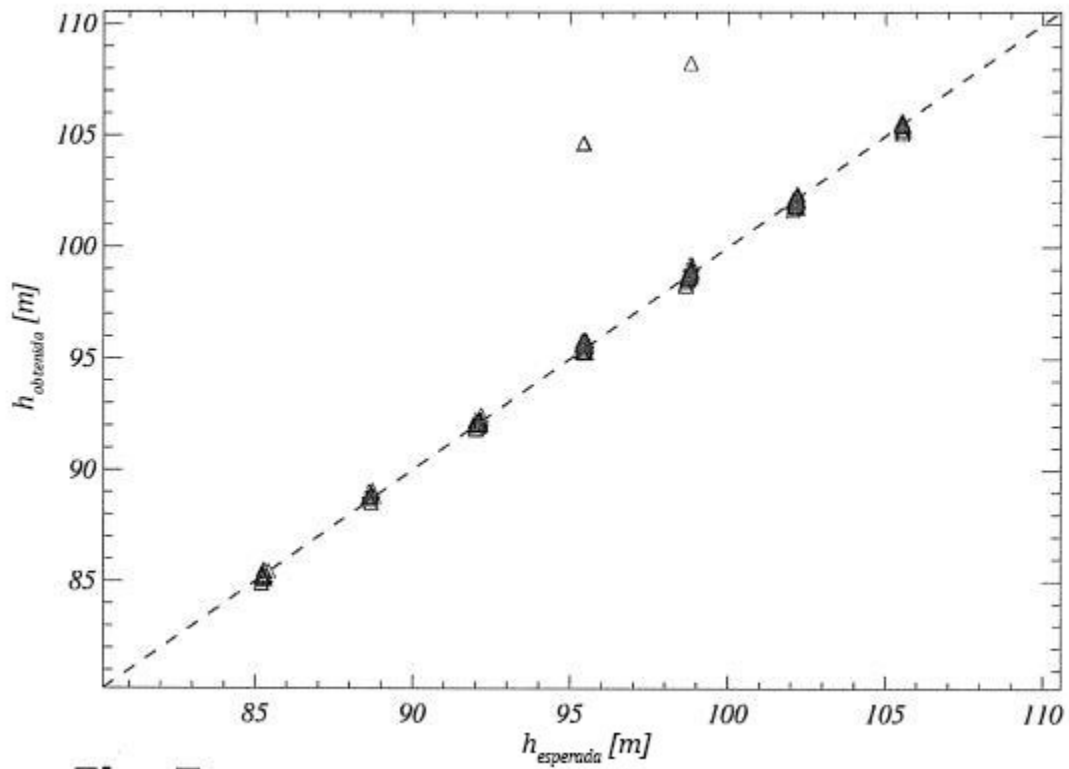


Fig. 7