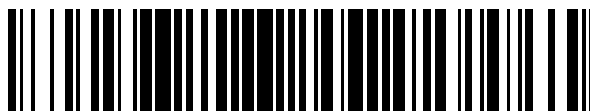


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 391 195**

51 Int. Cl.:  
**G01S 17/88** (2006.01)  
**G01N 21/35** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **06801711 .0**
- 96 Fecha de presentación: **17.08.2006**
- 97 Número de publicación de la solicitud: **1943541**
- 97 Fecha de publicación de la solicitud: **16.07.2008**

54 Título: **Un método para mejorar la exactitud del rendimiento en absorción diferencial LIDAR para detección y cuantificación en fugas de tuberías de gas y aceite**

30 Prioridad:  
**09.09.2005 US 223241**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**22.11.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**22.11.2012**

73 Titular/es:  
**EXELIS INC. (100.0%)**  
**1650 Tysons Boulevard, Suite 1700**  
**McLean, VA 22102, US**

72 Inventor/es:  
**KALAYEH, HOOSHMAND M.**

74 Agente/Representante:  
**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

ES 2 391 195 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**

Un método para mejorar la exactitud del rendimiento en absorción diferencial LIDAR para detección y cuantificación en fugas de tuberías de gas y aceite.

**CAMPO DE LA INVENCION**

5 La presente invención se refiere a un método para mejorar la exactitud de la identificación de estelas que contienen una molécula diana utilizando un sistema de absorción diferencial LIDAR (DIAL). En particular, este método puede permitir la mejora de la relación de señal a ruido para la detección de estelas.

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

10 En un sistema DIAL, la señal retrodispersada recibida es una función de: la energía de la pulsación láser transmitida; la velocidad de la luz; la anchura de la pulsación láser; el área del telescopio (campo de visión); el rango (ley del cuadrado inverso); el haz fuera de línea y el haz en línea superpuesto y el campo de visión (es decir, el factor de forma geométrico); la respuesta espectral de las ópticas del receptor; la transmisión de la estela; la transmisión atmosférica total; y el tipo de cubierta del terreno.

15 Uno de los usos de un sistema DIAL de dos líneas es estimar la longitud del trayecto de concentración (CPL, Concentration Path Length) de una estela relativa a un fluido. Por lo tanto, se selecciona preferiblemente la longitud de onda en línea, de tal manera que sólo se absorbe por la molécula diana del fluido y por ninguna otra en el trayecto óptico. La longitud de onda fuera de línea se selecciona preferiblemente de tal manera que no se absorbe por la molécula diana o por cualesquiera otras moléculas previstas que permite el trayecto óptico. Más preferiblemente, las longitudes de onda en línea y fuera de línea se seleccionan de tal manera que la relación del factor de forma geométrico, la respuesta espectral de las ópticas del receptor y la reflectividad superficial correspondiente a las longitudes de onda en línea y fuera de línea son aproximadamente las mismas. Como puede verse en la Ecuación 1, cuando se cumple esta condición, estos parámetros se pueden anular, simplificando el cálculo de la CPL.

$$CPL = \frac{\ln \left( \frac{E(\lambda_{Off}, R) E_1(\lambda_{On}) \xi(R_{On}) \xi(\lambda_{On}) \rho(\lambda_{On})}{E(\lambda_{On}, R) E_1(\lambda_{Off}) \xi(R_{Off}) \xi(\lambda_{Off}) \rho(\lambda_{Off})} \right) - 2 \int_0^R (k(\lambda_{On}, r) - k(\lambda_{Off}, r)) dr}{2(\sigma(\lambda_{On}) - \sigma(\lambda_{Off}))} - RC_{t-bag} \quad \text{Ec. (1)}$$

25 donde  $\lambda_{On/Off}$  es la longitud de onda máxima en línea (On) (o fuera de línea (Off)),  $\sigma(\lambda_{On/Off})$  es la sección transversal en línea (o fuera de línea),  $E_1(\lambda_{On/Off})$  es la energía de la pulsación láser transmitida en línea (o fuera de línea), R es el rango/altitud/distancia del sensor a la diana,  $E(\lambda_{On/Off}, R)$  es la energía de la pulsación láser recibida en línea (o fuera de línea),  $\xi(R_{On/Off})$  es el factor de forma geométrico para la longitud de onda máxima en línea (o fuera de línea),  $\xi(\lambda_{On/Off})$  es la respuesta espectral de las ópticas del receptor para la longitud de onda máxima en línea (o fuera de línea),  $\rho(\lambda_{On/Off})$  es la reflexión superficial de fondo para la longitud de onda máxima en línea (o fuera de línea),  $k(\lambda_{On/Off}, r)$  es el coeficiente de atenuación atmosférica para la longitud de onda máxima en línea (o fuera de línea) y  $C_{t-bag}$  es la concentración de la molécula diana en la atmósfera.

35 En muchos casos, el factor dominante en el rendimiento del sistema DIAL es la baja señal relativa al ruido, o baja Relación Señal/Ruido (SNR, Signal to Noise Ratio) y no el ruido eléctrico en el sistema. Este problema puede ser especialmente grave cuando la SNR varía. En tales situaciones la ecuación DIAL debe corregirse para tener en cuenta variaciones no uniformes y error (sesgo). La principal fuente de estos errores o variaciones no uniformes de las señales resintonizadas en línea y fuera de línea son variaciones de reflectividad espectral del tipo de cubierta superficial y/o la desalineación de los haces en línea y fuera de línea (haces parcialmente solapados). Los haces parcialmente solapados pueden llevar también a variaciones de la reflectividad espectral superficial en las señales resintonizadas en línea y fuera de línea. Las longitudes de onda en línea y fuera de línea preferiblemente no varían durante el funcionamiento del sistema DIAL. Por lo tanto, las longitudes de onda son típicamente bloqueadas electrónicamente a longitudes de onda preseleccionadas. Sin embargo, en la práctica, estas longitudes de onda pueden variar ligeramente y estas variaciones pueden llevar a picos en la sección transversal y a otros efectos de absorción de interferencias no deseados. Además, puede no ser práctica la estimación de la función de densidad de probabilidad de los puntos de estela asociados con una fuga de gas.

45 Las aplicaciones de baja reflectividad del tipo de cubierta superficial resultan en señales en línea y fuera de línea de retorno bajas y las aplicaciones de alta reflectividad del tipo de cubierta superficial resultan en señales en línea y fuera de línea de retorno altas. Cuando la señal retornada es baja relativa al ruido entonces domina el ruido eléctrico y esto lleva a una baja Relación Señal/Ruido (SNR) y a una alta Varianza de la Longitud del Trayecto de Concentración (CPL), pero lo contrario también es cierto. Cuando las señales retornadas son altas relativas al ruido, entonces la señal domina y esto lleva a una alta SNR y a una baja Varianza de la CPL. Por lo tanto, ya que la reflectividad superficial varía de un punto a otro y de una región a otra, también lo hacen las señales resintonizadas y la SNR.

Sin embargo, en la práctica los sistemas DIAL pueden calibrarse en consecuencia. Desafortunadamente, corregir las variaciones de la reflectividad debidas al tipo de cubierta superficial del terreno puede ser difícil en muchas situaciones. Si estas variaciones de la reflectividad del tipo de cubierta de la superficie del terreno no se corrigen adecuadamente, pueden resultar errores significativos en las CPL estimadas de la molécula diana, llevando a la identificación errónea de estelas (o a la falta de estelas).

El documento WO/02/27297 describe un sistema LIDAR de absorción diferencial que escanea una diana utilizando un haz láser en línea y un haz láser fuera de línea. Se mide un haz de retorno mediante el sistema para proporcionar una relación de concentración del gas en la trayectoria del haz de retorno.

La presente invención supone un método para mejorar la exactitud del rendimiento en el DIAL al utilizar información espacial y espectral. Los métodos mejorados de la presente invención pueden aumentar la certeza (probabilidad) de detección de las estelas que contiene la molécula diana. Por ejemplo, estos métodos mejorados pueden utilizarse en la identificación de las estelas generadas por fugas en tuberías o tanques de almacenamiento, estelas causadas por derrames y otra contaminación y las estelas que ocurren naturalmente tales como los gases emitidos por los volcanes.

## RESUMEN DE LA INVENCION

Un ejemplo de realización de la presente invención es un método para mejorar la relación de la señal al ruido en un sistema LIDAR (DIAL) de absorción diferencial. Se escanea un haz DIAL de tal manera que se transmite el haz DIAL a través de una multitud de puntos de medición. El haz DIAL incluye un haz láser en línea y un haz láser fuera de línea que se transmiten básicamente de forma colineal. Se miden una multitud de energías de pulsación transmitidas de los haces láser en línea y una multitud de energías de pulsación transmitidas de los haces láser fuera de línea que corresponden a la multitud de puntos de medición, igual que son una multitud las energías de pulsación recibidas de los haces láser en línea y una multitud las energías de pulsación recibidas de los haces láser fuera de línea que corresponden a la multitud de puntos de medición. Se selecciona un punto de medición. Se selecciona a su vez un subconjunto de puntos de medición de una región de interés (ROI) dentro de una ROI alrededor de un punto de medición seleccionado. Para el punto de medición seleccionado se calculan una serie de promedios, que incluyen: un promedio de la energía de pulsación en línea transmitida a partir de las energías de pulsación transmitidas de los haces láser en línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición; un promedio de la energía de pulsación fuera de línea transmitida a partir de las energías de pulsación transmitidas de los haces láser fuera de línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición; un promedio de la energía de pulsación en línea recibida a partir de las energías de pulsación recibidas de los haces láser en línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición; y un promedio de la energía de pulsación fuera de línea recibida a partir de las energías de pulsación recibidas de los haces láser fuera de línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición. Se calcula una longitud del trayecto de concentración (CPL) del haz DIAL para el punto de medición seleccionado utilizando la energía de pulsación en línea transmitida promedio, la energía de pulsación fuera de línea transmitida promedio, la energía de pulsación en línea recibida promedio y la energía de pulsación fuera de línea recibida promedio.

Un ejemplo de realización adicional de la presente invención es un método mejorado para determinar si un punto de medición, medido utilizando un sistema LIDAR (DIAL) de absorción diferencial, representa un punto de estela o un punto sin estela. Se determinan las longitudes del trayecto de concentración (CPL's) para una multitud de puntos de medición. Se proporciona un promedio de CPL sin estela,  $\overline{CPL}$ . Para cada punto de medición se calcula una desviación estándar,  $CPL_{sd}$ , basada en la propagación del error de primer orden. Para cada punto de medición, se calcula el valor de la probabilidad de la CPL,

$$CPL_{LL} = -\frac{1}{2} \ln(2\pi) - \ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2} \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2$$

, donde cpl es la correspondiente CPL del punto de medición. Para cada punto de medición, se determina que el punto de medición representa un punto sin estela si el valor de la probabilidad de la CPL es menor que un nivel umbral de la CPL,

$$CPL_{LL_{threshold}} = -\frac{1}{2} \ln(2\pi) - \ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2} (T)^2$$

, donde T es un nivel de desviación estándar umbral (threshold).

Otro ejemplo de realización de la presente invención es un método mejorado para determinar si un punto de medición, medido utilizando un sistema LIDAR (DIAL) de absorción diferencial, representa un punto de estela o un punto sin estela. Se determinan las longitudes del trayecto de concentración (CPL's) para una multitud de puntos de medición. Se proporciona un promedio de CPL sin estela,  $\overline{CPL}$ . Para cada punto de medición se calcula una desviación estándar,  $CPL_{sd}$ , basada en la propagación del error de primer orden y se determina que un punto de

medición representa un punto sin estela cuando se satisface el criterio de decisión de Hooshmand (HDR). El HDR viene dado por,

$$\left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2 > (T)^2$$

, donde  $cpl$  es la correspondiente CPL del punto de medición que se prueba y  $T$  es un nivel de desviación estándar umbral.

- 5 Un ejemplo de realización más de la presente invención es un método mejorado para descubrir puntos de estela falsos identificados utilizando un sistema LIDAR (DIAL) de absorción diferencial. Se determina la longitud del trayecto de concentración (CPL) para una multitud de puntos de medición. Para cada punto de medición, se determina si el punto de medición representa un punto de estela o un punto sin estela utilizando la correspondiente CPL. Se selecciona un punto de medición  $j$ -ésimo de un subconjunto vecino más cercano de los puntos de medición de uno de los puntos de estela. El subconjunto vecino más cercano de los puntos de medición incluye el punto de estela y un número predeterminado,  $K-1$ , de puntos de medición vecinos más cercanos. Se calcula un promedio de la CPL,  $\overline{CPL}_j$ , de las CPL's de un subconjunto local de puntos de medición alrededor del punto de medición  $j$ -ésimo. Se calcula una desviación estándar,  $(CPL_{sd})_j$ , de cada punto de medición en el subconjunto local basado en la propagación del error de primer orden. Estos cálculos se llevan a cabo para  $j= 1$  hasta  $K$ . Se calcula el valor de la probabilidad de la CPL del punto de estela,

$$(CPL_{LL}) = -\sum_{j=1}^K \ln(CPL_{sd})_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^K \left[ \frac{cpl_j - \overline{CPL}_j}{(CPL_{sd})_j} \right]^2$$

, donde  $cpl_j$  es la correspondiente CPL del punto de medición  $j$ -ésimo. Si el valor de la probabilidad de la CPL del punto de estela es menor que un nivel umbral ( $T$  threshold) de la CPL del punto de estela,

$$(CPL_{LL})_{Threshold} = -\sum_{j=1}^K \ln(CPL_{sd})_j - \frac{1}{2} KT^2$$

- 20 entonces está determinado que el punto de estela representa un punto de estela falso. El proceso se repite para cada punto de estela.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

- 25 La invención se comprende mejor a partir de la descripción detallada siguiente cuando se lea en relación con los dibujos que se acompañan. Se hace hincapié en que, según la práctica común, las diversas características de los dibujos no están a escala. Por el contrario, las dimensiones de las diversas características se han ampliado o reducido arbitrariamente para mayor claridad. Incluidas en el dibujo están las siguientes figuras:

La FIG. 1 es un diagrama de bloques esquemático que ilustra un ejemplo de sistema LIDAR (DIAL) de absorción diferencial según la presente invención.

30 La FIG. 2 es un mapa de flujo que ilustra un ejemplo de un método para determinar una longitud del trayecto de concentración según la presente invención.

La Figura 3A es un diagrama esquemático que ilustra un ejemplo de subconjunto de puntos de medición de una región de interés para puntos de medición distribuidos uniformemente de un ejemplo de patrón de escaneo lineal según la presente invención.

35 La Figura 3B es un diagrama esquemático que ilustra dos ejemplos de subconjuntos de puntos de medición de una región de interés para puntos de medición distribuidos variablemente de otro ejemplo de patrón de escaneo lineal según la presente invención.

La Figura 3C es un diagrama esquemático que ilustra puntos de medición distribuidos variablemente de un ejemplo de patrón de escaneo circular según la presente invención.

40 La Figura 4 es un mapa de flujo que ilustra dos ejemplos alternativos de métodos para determinar si un punto de medición representa un punto de estela o un punto de no estela según la presente invención.

La Figura 5 es un mapa de flujo que ilustra un ejemplo del método para identificar puntos de estela erróneos según la presente invención.

La Figura 6 es un mapa de flujo que ilustra un ejemplo de método para identificar estelas utilizando un sistema DIAL según la presente invención.

La Figura 7 es un mapa de flujo que ilustra otro ejemplo de método para identificar estelas utilizando un sistema DIAL según la presente invención.

La Figura 8 es un mapa de flujo que ilustra un ejemplo más de método para identificar estelas utilizando un sistema DIAL según la presente invención.

## 5 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Los ejemplos de realizaciones de la presente invención utilizan una densidad de probabilidad espectral y una densidad de probabilidad conjunta espacial de la longitud del trayecto de concentración (CPL) de puntos de no estela locales, en un sistema de detección remota láser LIDAR (DIAL) de Absorción Diferencial, para detectar y cuantificar óptimamente la CPL de puntos-estela asociados con una fuga de gas. Los parámetros de distribución de no estelas locales (media y varianza) se estiman adaptativamente. La CPL\_MEAN (CPL\_MEDIA) se estima basada en la CPL computada de las no estelas locales y la CPL\_VARIANCE (CPL\_VARIANZA) se estima adaptativamente para cada SNR devuelta.

Un ejemplo de realización de la presente invención es un ejemplo de sistema DIAL, como se ilustra en la Figura 1. Este ejemplo de sistema incluye dos fuentes de láser pulsado, una fuente de láser pulsada en línea 100 y una fuente de láser pulsado fuera de línea 102 para generar el haz DIAL. Se observa que la selección de una fuente de láser pulsado en línea y una fuente de láser pulsado fuera de línea en el ejemplo de realización de la Figura 1 es para simplificar la ilustración y no se pretende que sea limitativa. La discusión de los ejemplos de los sistemas DIAL posteriores se centra principalmente sobre el ejemplo de realización de la Figura 1, pero se contempla que un experto en la técnica puede entender que se pueden incluir fuentes de láser pulsado fuera de línea adicionales en un ejemplo de sistema DIAL según la presente invención.

La fuente de láser pulsado en línea 100 genera un haz láser en línea que incluye una serie de pulsaciones de láser. Estas pulsaciones del haz láser en línea tienen una longitud de onda máxima,  $\lambda_{On}$ , que está dentro de una banda de absorción óptica de la molécula diana. Así, la longitud del trayecto de concentración de la molécula diana dentro de un punto de medición puede determinarse utilizando la atenuación resultante de la energía de pulsación del haz láser en línea al propagarse las pulsaciones láser a través del punto de medición.

La energía de pulsación transmitida del haz láser en línea,  $E_1(\lambda_{On})$ , puede determinarse preferiblemente a partir de una pequeña parte de cada pulsación dirigida al sensor óptico 112. Este sensor óptico forma parte de una matriz de sensores ópticos que también incluye el sensor óptico 114 que puede utilizarse para detectar las energías de pulsación transmitidas de los haces láser en línea y fuera de línea. La pequeña parte del haz láser en línea detectada por el sensor óptico 112 puede separarse utilizando un divisor de haz 106, como se muestra en la Figura 1.

La fuente del láser pulsado fuera de línea 102 genera un haz láser fuera de línea de pulsaciones láser que tiene una longitud de onda máxima fuera de línea,  $\lambda_{Off}$ . Esta longitud de onda máxima fuera de línea se selecciona para estar fuera de la banda de absorción óptica de la molécula diana de tal manera que la energía de pulsación de la pulsación láser fuera de línea no está significativamente afectada por la existencia, o no existencia, de la molécula diana a lo largo del trayecto del haz del haz láser fuera de línea a través del punto de medición.

Igual que con el haz láser en línea, la energía de pulsación transmitida del haz láser fuera de línea,  $E_1(\lambda_{Off})$ , puede determinarse preferiblemente a partir de una pequeña parte de cada pulsación dirigida a los sensores ópticos 114. La pequeña parte del haz láser fuera de línea puede separarse utilizando un divisor de haz dicróico 108, que preferiblemente refleja básicamente toda la luz con una longitud de onda  $\lambda_{Off}$  y transmite básicamente toda la luz con una longitud de onda  $\lambda_{On}$ , como se muestra en la Figura 1.

Las matrices de sensores ópticos 112 y 114 se acoplan para proporcionar señales proporcionales a las energías de pulsación transmitidas de los dos haces láser al procesador de datos 128 del DIAL para utilizarlos en calcular la CPL de la molécula diana en el punto de medición.

El divisor de haz 106 y el espejo dicróico 108 también pueden funcionar como ópticas de transmisión para alinear el haz láser en línea y el haz láser fuera de línea de tal manera que los haces láser se puedan transmitir básicamente colineales a una serie de puntos de medición sobre la superficie 120. De esta manera, el haz láser en línea y cada uno de los haces láser fuera de línea pueden muestrear aproximadamente el mismo trayecto del haz para cada punto de medición. Son preferibles tales trayectorias de haces similares para reducir las diferencias en las condiciones experimentadas por los haces de láser, distintas de las causadas por las longitudes de onda diferentes de los dos haces láser, por ejemplo, absorción del haz láser en línea por moléculas diana en la estela 118. También, es preferible la similitud de los trayectos del haz de tal manera que ambos haces láser básicamente puedan ser reflejados de puntos de medición de la superficies no homogénea 120.

Aunque en el ejemplo de realización de la Figura 1 se muestra que el divisor de haz 106 y el espejo dicróico 108 actúan ambos para separar las partes de cada haz para monitorizarse median las matrices de sensores ópticos 112 y 114 y para alinear los haces láser básicamente colineales, se contempla que puedan incluirse componentes ópticos adicionales, tales como espejos, rejillas y lentes, para llevar a cabo estas tareas. Se observa que también

puede ser preferible para los dos haces láser estar básicamente colimados para reducir la difusión de los haces a lo largo de la trayectoria del haz desde el ejemplo del sistema DIAL a la superficie no homogénea 120 y viceversa. También pueden incluirse ópticas adicionales y/o etapas mecánicas (no mostradas) para permitir escanear el haz DIAL a través de una serie de puntos de medición sobre la superficie 120.

5 En muchas aplicaciones prácticas, la superficie no homogénea 120 puede ser una sección de terreno, que puede tener una diversidad de diferentes formas de cubierta dispuesta sobre ella, por ejemplo, arbustos, árboles, hierba, pavimento, etc. Como se muestra en la Figura 1, la superficie no homogénea 120 y la diversidad de cubiertas sobre ella pueden aparecer rugosas. Por lo tanto, gran parte de la energía de pulsación de cada uno de los haces láser puede dispersarse y solo una pequeña cantidad de cada pulsación puede hacerlo de nuevo hacia el sistema DIAL para ser medida.

La señal óptica reducida causada por la reflexión de los haces láser hacia fuera (dispersión) de una superficie rugosa puede afectar adversamente a la sensibilidad de la detección de la CPL por reducir la relación señal/ruido del ejemplo de sistema DIAL. Además, las variaciones en la cubierta del terreno pueden llevar a diferencias en la reflectividad de la superficie no homogénea 120 desde una posición de medición a otra.

15 El ejemplo de realización de la Figura 1 incluye un segundo conjunto de ópticas, un espejo dicróico 109 y un espejo 107, para recoger, separar por longitudes de onda máxima, y dirigir las partes reflejadas del haz láser fuera de línea y del haz láser en línea recibidos por el ejemplo de sistema DIAL hacia una segunda matriz de sensores ópticos 122 y 124. Preferiblemente, el espejo dicróico 109 puede tener propiedades similares al espejo dicróico 108. Se observa que este segundo conjunto de ópticas de recepción puede incluir elementos ópticos adicionales (no mostrados) como se describió anteriormente para el conjunto de ópticas de transmisión.

La matriz secundaria de sensores ópticos 122 y 124 detectan las energías de pulsación recibidas de las partes reflejadas del haz láser en línea,  $E(\lambda_{on}, R)$  y del haz láser fuera de línea,  $E(\lambda_{off}, R)$ , respectivamente. Esta matriz de sensores ópticos se acopla al procesador de datos 128 del DIAL para facilitar señales proporcionales a las energías de pulsación transmitidas de los haces láser al procesador de datos 128 del DIAL, para utilizarlas en calcular la longitud del trayecto de concentración (CPL) de la molécula diana.

El procesador de datos 128 del DIAL utiliza las señales de energía de pulsación fuera de línea y en línea transmitidas desde los sensores ópticos 112 y 114 y las señales de energía de pulsación fuera de línea y en línea recibidas desde los sensores ópticos 122 y 124 medidas en un número de diferentes puntos de medición para determinar un promedio del conjunto de energías de pulsación fuera de línea y en línea transmitidas y energías de pulsación fuera de línea y en línea recibidas asociadas a cada punto de medición. Preferiblemente, estos valores de la energía de pulsación de cada punto de medición pueden calibrarse utilizando los coeficientes de transmisión y reflexión conocidos de los espejos 112 y 122 y de los espejos dicróicos 108 y 109, así como los factores de conversión conocidos para los sensores ópticos 112, 114, 122 y 124.

El procesador de datos del DIAL puede entonces calcular la CPL para cada punto de medición utilizando las energías de pulsación promedio correspondientes. Este cálculo se puede realizar utilizando la Ecuación 1.

El procesador de datos del DIAL puede incluir uno o más de: sistema de circuitos de propósito específico; un circuito integrado de aplicación específica (ASIC, Application Specific Integrated Circuit); or un ordenador de propósito general programado. Cada uno de estos elementos potenciales puede utilizarse para realizar al menos una de las funciones de cálculo, estimación y determinación del procesador de datos del DIAL.

40 Un uso típico de un sistema DIAL puede ser para identificar estelas que incluyen una molécula diana que resulta de la fuga o el derrame de una tubería o tanque de almacenamiento o de una fuente natural tal como un volcán o un respiradero geotérmico. Además de la baja SNR, otros factores pueden afectar la capacidad de un sistema DIAL para distinguir puntos de estela frente a puntos de no estela. Por ejemplo, la distribución espacial de la CPL de una estela de la fuga puede ser una función del tamaño de la fuga, de la rugosidad de la región más cercana a la fuga, del tiempo, de la temperatura y de la velocidad del viento.

El tamaño medido de una estela es la intersección de la estela con el trayecto del haz del DIAL. Una estela perfecta en el aire se ve con la forma de una llama de una vela y la CPL del centro es mayor que el entorno del área de la estela (espacialmente ~ distribuido normalmente). El tamaño de la estela está relacionado con la tasa de fuga. En una atmósfera calmada, cuanto más cerca de una región está la fuga mayor es la CPL y cuanto más cerca está el punto de medición del centro de la estela mayor es la CPL, pero si hay movimiento significativo de aire o agua, la estela puede estar bailando alrededor y, por lo tanto, es difícil de precisar. Por lo tanto, la caracterización de la distribución espacial de estelas diferentes puede resultar difícil, dando lugar a un deseo de incrementar la precisión en la determinación de la CPL.

La Figura 6 ilustra una visión general de los ejemplos de los métodos de la presente invención. Estos ejemplos de métodos pueden realizarse utilizando un sistema DIAL, tal como el ejemplo de sistema DIAL de la Figura 1. El sistema DIAL se escanea a través de un número de puntos de medición y se almacena la señal n-dimensional, etapa 600. A partir de esta señal n-dimensional, se encuentran y calculan las pulsaciones en línea y fuera de línea,

las potencias y las secciones transversales, etapa 602. El ruido del tipo sal y pimienta se puede filtrar para mejorar la calidad de los datos del DIAL, etapa 604.

5 Pueden generarse datos espaciales en dos dimensiones a partir de las señales DIAL, etapa 606, donde cada punto de medición se representa mediante un vector n-dimensional. Se selecciona una región de interés circular (ROI) alrededor de cada punto de medición, etapa 608. Cada ROI circular contiene, preferiblemente, m puntos de medición.

10 Se calcula un promedio de datos asociados con los puntos de medición en cada ROI circular, etapa 610. Estos promedios pueden ser uniformes sobre sus respectivas ROI's circulares o se pueden ponderar los puntos de medición sobre cada ROI circular, por ejemplo, por medio de la distancia de cada punto de medición desde el centro de la ROI.

Se puede entonces calcular una CPL para cada punto de medición, etapa 612, utilizando los datos promediados de la etapa 610. Como puede comprenderse por un experto en la técnica, es preferible calibrar el sistema DIAL antes de utilizar las señales almacenadas en la etapa 600 para computar la CPL.

15 La Figura 2 ilustra, con gran detalle, un ejemplo de método para mejorar la exactitud de los cálculos de la CPL para un sistema DIAL en un punto de medición dado mediante valores de la energía de pulsación medida en promedio sobre una ROI alrededor de un punto de medición, según la presente invención.

20 El haz del DIAL se escanea de tal manera que se transmite a través de una serie de puntos de medición, etapa 200. Como se describió anteriormente con referencia a la Figura 1, el haz del DIAL incluye un haz láser en línea y un haz láser fuera de línea que se transmiten básicamente colineales. Los puntos de medición escaneados mediante el haz del DIAL se pueden distribuir uniforme o no uniformemente. La Figura 3A ilustra los puntos de medición 302 dispuestos en un ejemplo de patrón de escaneo lineal uniforme 300 y la Figura 3B ilustra los puntos de medición 302 dispuestos en un ejemplo de patrón de escaneo lineal no uniforme 310. Estos patrones de escaneo son meramente ilustrativos y no pretenden ser una limitación. En particular, se pueden utilizar patrones lineales rectangulares en contraposición a los patrones lineales hexagonales mostrados en las Figuras 3A y 3B, como se pueden utilizar también patrones de escaneo con puntos de medición osculadores o incluso solapando. Se contempla también que se puedan utilizar patrones de escaneo que varían irregularmente, dependiendo de las condiciones superficiales u otras situaciones particulares de una aplicación DIAL dada.

30 La Figura 3C ilustra el patrón de escaneo circular 324. En este ejemplo de patrón de escaneo, los puntos de medición 302 se toman en círculos como el sistema DIAL en movimiento a lo largo de la trayectoria de vuelo 326. Como puede verse a partir de este ejemplo, los puntos de medición en patrones de escaneo circulares 324 se agrupan cerca de los bordes de patrón del escaneo y en muchos casos se pueden solapar ampliamente.

35 Se miden las energías de pulsación transmitidas de los haces láser en línea y de los haces láser fuera de línea que corresponden a la multitud de puntos de medición, etapa 202. Estas energías de pulsación transmitidas se almacenan preferiblemente para utilizarse en los cálculos de promedio. También se mide un conjunto correspondiente de las energías de pulsación fuera de línea y en línea recibidas, etapa 204. Puede utilizarse un filtro de mediana u otro tipo deseado sobre estas energías de pulsación medidas para eliminar en los datos el ruido de sal-pimienta (pico) o para preprocesar los datos de otra manera. Se pueden realizar también correcciones de calibración basadas en las propiedades del sistema conocidas para poner preferiblemente a escala los datos medidos.

40 Los puntos de medición se seleccionan entonces uno cada vez para los cálculos de promedio para mejorar preferiblemente la SNR de los datos de la energía de pulsación, etapa 206. Se selecciona un subconjunto de puntos de medición dentro de una ROI alrededor del punto de medición seleccionado, etapa 208. Las Figuras 3A y 3B ilustran ejemplos de ROI's para tres ejemplos de puntos de medición. En la Figura 3A, con puntos de medición distribuidos uniformemente 302, la ROI 304 se muestra alrededor del punto de medición seleccionado 306, mostrado en negro. El subconjunto de puntos de medición en la ROI 304 incluye el punto seleccionado 306 y 36 puntos vecinos más cercanos 306, mostrados en gris para mayor claridad. La Figura 3B ilustra dos ROI's 312 y 318 alrededor de los puntos de medición seleccionados 314 y 320, respectivamente, cada uno incluyendo 36 puntos vecinos más cercanos 316 y 322. Como se muestra en la Figura 3B, la ROI 318 es mayor que la ROI 312 y los puntos vecinos más cercanos 322 están dispuestos de forma ligeramente diferente debido a la distribución variable de los puntos de medición 302 en la dirección X del patrón de escaneo 310. En este ejemplo, el tamaño de la ROI se varía de tal manera que el número de puntos vecinos más cercanos permanece constante. Se contempla que, de forma alternativa, la ROI podría permanecer constante y el número del número de puntos vecinos más cercanos incluidos en el subconjunto podría variar en su lugar cuando se utiliza un patrón de escaneo no uniforme.

55 Se observa que, aunque las ROI's que incluyen 36 puntos vecinos más cercanos son las que se muestran en los ejemplos de realizaciones de las Figuras 3A y 3B, se pueden utilizar ROI's que incluyen otros números de puntos vecinos más cercanos. Por ejemplo, en un ejemplo de patrón de escaneo lineal con puntos de medición que osculan, una ROI con un radio aproximadamente cinco veces un radio del haz del DIAL, convenientemente puede encerrar sobre 25 puntos de medición, el punto seleccionado y en torno a 24 puntos vecinos más cercanos. El radio

deseado de la ROI en diversos patrones de escaneo puede extraerse a partir de los parámetros del sistema DIAL y almacenado en una tabla de consulta basada en la densidad de los puntos de un círculo ROI inicial fijo o puede determinarse adaptativamente a partir de los datos DIAL.

- 5 Utilizando los subconjuntos ROI de puntos de medición se calculan los valores promedio de las diversas energías de pulsación, etapa 212. La energía promedio de la pulsación en línea transmitida se calcula a partir de las energías de pulsación transmitidas del haz láser en línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición. La energía promedio de la pulsación fuera de línea transmitida se calcula a partir de las energías de pulsación transmitidas del haz láser fuera de línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición. La energía promedio de la pulsación en línea recibida se calcula a partir de las energías de pulsación recibidas del haz láser en línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición. Y la energía promedio de la pulsación fuera de línea recibida se calcula a partir de las energías de pulsación recibidas del haz láser fuera de línea del subconjunto ROI seleccionado de los puntos de medición. Se puede utilizar un promedio uniforme, no ponderado o ponderado en estas energías de pulsación para mejorar la SNR o los datos de DIAL. Esta operación también puede interpretarse como una convolución entre un filtro pasa bajas y una señal, una imagen o datos espaciales generales.
- 10
- 15 El promedio uniforme significa que todos los n puntos Vecinos más Cercanos (NN, Nearest Neighboring) que rodean el punto de interés están igualmente ponderados para calcular el promedio:

$$\frac{1}{(n+1)} \sum_{k=0}^n E_{i_k} \quad \text{Ec. (2)}$$

donde  $E_{i_k}$  es un valor de la energía de pulsación medida para el  $K$ -ésimo punto del subconjunto de la ROI alrededor del punto  $i$  seleccionado y  $E_{i_0}$  es el valor de la energía de pulsación medida del punto de medición seleccionado.

- 20 El promedio ponderada significa que el peso del filtro o los NN no son uniformes, por ejemplo, la ponderación podría basarse en la distancia entre el punto seleccionado y un punto NN. Un núcleo Gaussiano es un ejemplo de tal función de ponderación. Si se utiliza un escáner circular en el sistema DIAL para recoger los datos de la energía de pulsación, puede ser recomendable la utilización del núcleo Gaussiano. En esta situación el muestreo de la densidad de puntos de medición puede no ser uniforme en toda la zona escaneada o en la ROI y el núcleo Gaussiano permite estrechar los puntos NN para tener más efecto en el promedio.
- 25

Una vez se determinan los puntos de medición en el subconjunto ROI para un punto de medición dado, las energías de pulsación correspondientes pueden convolucionarse con un núcleo Gaussiano circular para calcular la media ponderada:

$$\exp\left(-\left[\frac{(X_{i_k} - X_{i_0})^2 + (Y_{i_k} - Y_{i_0})^2}{2\sigma^2}\right]\right) \quad \text{, comienza con } \sigma = 1, \quad \text{Ec. (3)}$$

- 30 o en caso de escalado diferente en las dimensiones X e Y:

$$\exp\left(-\left[\frac{(X_{i_k} - X_{i_0})^2}{2\sigma_x^2}\right]\right) \exp\left(-\left[\frac{(Y_{i_k} - Y_{i_0})^2}{2\sigma_y^2}\right]\right) \quad \text{Ec. (3a)}$$

donde el índice  $i_0$  representa el punto de medición seleccionado e  $i_k$  representa uno de los puntos n-NN en el subconjunto de la ROI. Por lo tanto el peso del punto  $i_0$  es 1. Se observa que la convolución está preferiblemente normalizada para llevar a cabo el promedio espacial.

- 35 Por ejemplo, sea  $E_{i_k}^{an-r}$  la energía recibida en línea del punto  $K$ -ésimo en el subconjunto de la ROI. El promedio espacial ponderado Gaussiano sobre los puntos n-NN se puede calcular entonces mediante:

$$\frac{1}{\sum_{K=0}^n \exp\left(-\left[\frac{(X_{i_k} - X_{i_0})^2 + (Y_{i_k} - Y_{i_0})^2}{2\sigma^2}\right]\right)} \left\{ \sum_{K=0}^n E_{i_k}^{an-r} * \exp\left(-\left[\frac{(X_{i_k} - X_{i_0})^2 + (Y_{i_k} - Y_{i_0})^2}{2\sigma^2}\right]\right) \right\} \quad \text{Ec. (4)}$$



Estos valores de la energía de pulsación promedio del punto seleccionado (la energía de pulsación en línea promedio transmitida, la energía de pulsación fuera de línea promedio transmitida, la energía de pulsación en línea promedio recibida y la energía de pulsación fuera de línea promedio recibida) se utilizan para calcular una longitud del trayecto de concentración (CPL) del haz DIAL para uno de los puntos de medición seleccionados, etapa 214. Este cálculo se puede realizar utilizando la ecuación DIAL, Ecuación 1.

Se puede seleccionar el siguiente punto de medición y se pueden repetir las etapas 208, 212 y 214 hasta que se hayan calculado las CPL's para todos los puntos de medición. Se observa que las etapas 208, 212 y 214 se pueden realizar en paralelo para diferentes puntos de medición, pero se describe cómo se realizan estas etapas en el ejemplo de método de la Figura 2 para diferentes puntos de medición en serie con propósitos ilustrativos.

Volviendo a la Figura 6, una vez que se calcula la CPL de un punto de medición, la siguiente etapa es determinar si el punto de medición representa un punto de estela o un punto de no estela. Para ayudar a superar las bajas SNR's de las señales DIAL, puede utilizarse un enfoque probabilístico para determinar si el punto de medición representa un punto de estela o un punto de no estela.

Puede calcularse una varianza de la CPL en cada punto de medición, etapa 614, basada en la propagación del error de primer orden. Puede calcularse un umbral de probabilidad de la CPL para cada punto de medición, etapa 616, utilizando una distribución local de la no estela. Los métodos de determinación de esta distribución local de no estela se describen más adelante con referencia a la Figura 4. También puede calcularse una probabilidad de la CPL para cada punto de medición, etapa 618, utilizando la ROI.

Los puntos de medición pueden clasificarse entonces como puntos de estela o no estela, etapa 620, basados en una comparación de la probabilidad de la CPL de cada punto de medición con el correspondiente umbral de probabilidad de la CPL.

La Figura 4 ilustra, con detalle, dos de tales ejemplos de métodos para determinar si el punto de medición representa un punto de estela o un punto de no estela basados en la CPL del punto de medición, según la presente invención.

Sean  $P(\omega_1), P(\omega_2), p(X|\omega_1), p(X|\omega_2)$  la probabilidad a priori y la función de densidad de probabilidad de clase 1 (fondo: no estela) y de clase 2 (diana: estela) respectivamente.

La Regla de Bayes para hacer una determinación puede enunciarse como: Si  $p(X|\omega_1)P(\omega_1) > p(X|\omega_2)P(\omega_2)$ , entonces X se clasifica de clase 1, de lo contrario X se clasifica de clase 2.

Esta regla de Bayes puede reescribirse como sigue: Si

$\ln[p(X|\omega_1)P(\omega_1)] > \ln[p(X|\omega_2)P(\omega_2)] \Rightarrow \ln\left[\frac{P(\omega_1)}{P(\omega_2)}\right] + \ln\left[\frac{p(X|\omega_1)}{p(X|\omega_2)}\right] > 0$ , entonces X se clasifica de clase 1 y de lo contrario de clase 2.

Esta regla se llama Regla de la Máxima Verosimilitud (MLR, Maximun Likelihood Rule). Si se supone que las funciones de densidad de probabilidad para las clases 1 y 2 están distribuidas normalmente, entonces la MLR puede escribirse como:

$$\ln\left[\frac{P(\omega_1)}{P(\omega_2)}\right] + \ln\left[\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right] - \frac{1}{2}\left(\frac{X - \bar{X}_1}{\sigma_1}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{X - \bar{X}_2}{\sigma_2}\right)^2 > 0 \Rightarrow X \rightarrow \omega_1 \quad \text{Ec. (5)}$$

donde los parámetros  $(\bar{X}_1, \sigma_1)$  y  $(\bar{X}_2, \sigma_2)$  son la media y la desviación estándar de clases 1 y 2, respectivamente.

Entre los ejemplos de realizaciones de la presente invención están los métodos para detectar una fuga de gas utilizando una imagen generada a partir de un conjunto de datos de señales DIAL. Dos de tales ejemplos de estos métodos se muestran en la Figura 4. En estos métodos, se determinan las CPL's de una multitud de puntos de medición, etapa 400. Puede hacerse esta determinación utilizando el ejemplo del método de la Figura 2 o puede hacerse utilizando los datos de la energía de pulsación medidos.

Si se asume que las CPL's recogidas incluyen tanto distribuciones de estela (plume) como de no estela (nonplume) y además, se asume que los valores de la CPL se distribuyen normalmente y que la media y la desviación estándar de estas dos distribuciones se conocen, entonces la MLR puede escribirse como:

$$\ln \left[ \frac{P(\text{nonplume})}{P(\text{plume})} \right] + \ln \left[ \frac{CPL_{sd\_plume}}{CPL_{sd\_nonplume}} \right] - \frac{1}{2} \left( \frac{cpl - \overline{CPL}_{nonplume}}{CPL_{sd\_nonplume}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{cpl - \overline{CPL}_{plume}}{CPL_{sd\_plume}} \right)^2 > 0 \Rightarrow$$

$cpl \rightarrow \text{nonplume}$  Ec. (6)

Puede ser muy caro y difícil recoger y caracterizar los puntos de muestreo de la CPL de estela (diana) para estimar ( $CPL_{plume}, CPL_{sd\_plume}$ ). Sin embargo, puede ser relativamente fácil recoger los puntos de muestreo de la no estela (CPL de fondo) para estimar principalmente la CPL ( $CPL_{nonplume}$ ) de fondo promedio local. Por ejemplo, un conjunto de puntos de muestreo de no estela puede medirse en un área cercana, de la que se sabe que no tiene ninguna estela. Alternativamente, sin duda puede identificarse un conjunto de puntos de no estela dentro de los puntos de medición. Pueden promediarse entonces estas distribuciones locales de no estela.

El promedio de la CPL para no estelas es alrededor de unas veces el ámbito (altura) de la concentración del gas diana de fondo. En la práctica, sin embargo, la reflectividad del tipo de cubierta superficial, la baja SNR y otros ruidos de fuentes de interferencia pueden hacer más grande la variabilidad (desorden) de la CPL de fondo.

Suponer una distribución normal de la no estela sugiere que puede ser preferible utilizar las siguientes probabilidades (Probability) o verosimilitudes (Likelihood) equivalentes:

$$CPL\_PR\_1 = \text{Probability} \left[ \left( \overline{cpl} - cpl_{sigma} \right) < cpl < \left( \overline{cpl} + cpl_{sigma} \right) \right] = 0.683 ;$$

Ec. (7)

$$CPL\_LL\_1 = \ln(CPL\_PR\_1) = -0.3813 ;$$

Ec. (8)

$$CPL\_PR = \text{Probability} \left[ \left( \overline{cpl} - 2 * cpl_{sigma} \right) < cpl < \left( \overline{cpl} + 2 * cpl_{sigma} \right) \right] = 0.954 ;$$

Ec. (9)

$$CPL\_LL\_2 = \ln(CPL\_PR\_2) = -0.0471 ;$$

Ec. (10)

$$CPL\_PR = \text{Probability} \left[ \left( \overline{cpl} - 3 * cpl_{sigma} \right) < cpl < \left( \overline{cpl} + 3 * cpl_{sigma} \right) \right] = 0.997 ;$$

y Ec. (11)

$$CPL\_LL\_3 = \ln(CPL\_PR\_3) = -0.0030 ;$$

Ec. (12)

Así, por ejemplo, si la probabilidad de la Longitud del Trayecto de Concentración estimada es menor que 0.997 o el valor de verosimilitud de la CPL es menor que -0,0030, entonces puede, preferentemente, determinarse que la CPL estimada es de una no estela.

Se observa que  $cpl_{sigma} = cpl_{sd}$ , sin embargo, en las situaciones en las que:

$$\text{Pr ob.} \left[ cpl > \left( \overline{cpl} + n * cpl_{sigma} \right) \right] < \frac{\left\{ 1 - \text{Pr ob.} \left[ cpl < \left( \overline{cpl} - n * cpl_{sigma} \right) \right] cpl < \left( \overline{cpl} + n * cpl_{sigma} \right) \right\}}{2} ;$$

Ec. (13)

$$\text{Pr obability} \left[ cpl > \left( \overline{cpl} + n * cpl_{sigma} \right) \right] < \frac{1}{2} - \left\{ \text{Pr obability} \left[ cpl < cpl < \left( \overline{cpl} + n * cpl_{sigma} \right) \right] \right\}$$

o Ec. (14)

$$CPL\_LL\_n > \ln \left\{ \text{Pr obability} \left[ cpl < cpl > \left( \overline{cpl} + n * cpl_{sigma} \right) \right] \right\}$$

Ec. (15)

la  $cpl$  estimada puede determinarse que representa una distribución de estela.

Además, ya que el error en la estimación de la CPL es mayor cuando la SNR es baja, es decir, cuando las señales de retorno son bajas, y el error es bajo cuando la SNR es alta, es decir, las señales de retorno son altas, la media de CPL puede estimarse basada en las muestras de la CPL de no estela locales y la desviación estándar de la CPL puede estimarse adaptativamente para cada muestra. Por lo tanto, puede crearse un criterio de decisión basado en las Ecuaciones 13-15 y utilizando los valores de la CPL promedio local y la desviación estándar.

Se identifica un subconjunto local de puntos de medición alrededor de cada punto de medición para utilizarse para generar un promedio local de la CPL para cada punto de medición. Este subconjunto local se selecciona de forma similar al subconjunto de la ROI descrito anteriormente con referencia a las Figuras 3A y 3B. Si el ejemplo de

método de la Figura 2 se utiliza para determinar las CPL's de los puntos de medición, el subconjunto local puede ser el mismo que el subconjunto de la ROI utilizados en estos cálculos, pero esto no es necesario.

Se calcula un promedio de la CPL de cada subconjunto local, etapa 402. Se puede calcular la desviación estándar de la CPL de cada subconjunto local, etapa 404, basado en la propagación del error de primer orden. Se describe un ejemplo del método de cálculo de estas desviaciones estándar de la CPL más adelante con referencia a las Ecs. 29-33a.

Estos valores del subconjunto local se pueden utilizar en el siguiente criterio de decisión para calcular un valor de verosimilitud, etapa 408, para etiquetar cada punto de medición en el conjunto de datos del DIAL como un punto de estela o uno de no estela solo basado en la distribución de no estela (nonplume) local. Estos valores de verosimilitud, CPL\_LL, pueden determinarse utilizando:

$$CPL\_LL = \ln[p(cpl | nonplume)] = -\frac{1}{2} \ln(2\pi) - \ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2} \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2 \quad \text{Ec. (16)}$$

Los valores de verosimilitud de los diferentes puntos de medición pueden compararse entonces a un nivel umbral (threshold) de la CPL:

$$CPL\_LL_{threshold} = \ln[p(\overline{CPL} + T * CPL_{sd} | nonplume)] = -\frac{1}{2} \ln(2\pi) - \ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2} (T)^2 \quad \text{Ec. (17)}$$

donde T es un nivel umbral de la desviación estándar.

Si el valor de verosimilitud de la CPL para un punto de medición es menor que el nivel umbral de la CPL para este punto, entonces se determina que el punto de medición es un punto de no estela, etapa 410. Este criterio, conocido como criterio de decisión de Hooshmand (HDR), puede escribirse como:

$$CPL\_LL < CPL\_LL_{umbral} \Rightarrow cpl \rightarrow \text{estela} \quad \text{Ec. (18)}$$

Restando los términos constantes idénticos de CPL\_LL y CPL\_LL\_umbraI se llega a lo siguiente:

$$CPL\_LL = -\ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2} \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2 \quad \text{y} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$CPL\_LL_{threshold} = -\ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2} T^2 \quad \text{Ec. (20)}$$

Eliminando los primeros términos comunes en las Ecuaciones 19 y 20 y sustituyendo los términos restantes en la Ecuación (18) se llega a:

$$-\frac{1}{2} \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2 < -\frac{1}{2} (T)^2 \quad \text{Ec. (21)}$$

y entonces multiplicando ambos miembros por -2 se proporciona una versión simplificada de cálculo inmediato de la HDR:

$$\text{Si } \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2 > (T)^2 \Rightarrow \text{estela} \quad \text{Ec. (22)}$$

*En otro caso*  $\Rightarrow$  *No estela*

o equivalentemente:

$$\text{Si } \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right) > T \Rightarrow \text{estela} \quad \text{Ec. (22a)}$$

*En otro caso*  $\Rightarrow$  *No estela*

donde la  $\overline{CPL}$  se estima a partir de las muestras de ensayo de no estela recogidas previamente o sobre la base de la estimación adaptativa de la media móvil de los puntos clasificados altamente probables de no estela y la ( $CPL_{sd}$ ) se estima sobre la base de las Ecs. 33 y 33a.

5 Esta versión simplificada de cálculo inmediato de la HDR puede utilizarse para determinar si un punto de medición representa un punto de estela o un punto de no estela, etapa 406, sin calcular primero el valor de la verosimilitud de la CPL completo y el nivel umbral de la CPL de cada punto de medición.

10 Volviendo a la Figura 6, otra cuestión que puede surgir cuando se clasifican los puntos de medición para ser puntos de estela o de no estela sobre la base de los datos DIAL con una SNR baja es que la clasificación puede estar equivocada. Para puntos de medición erróneamente clasificados como puntos de no estela, la clasificación errónea no plantea un problema significativo, particularmente si varios puntos de medición cercanos se clasifican correctamente como puntos de estela, lo que puede suceder a menudo. Para puntos de medición clasificados erróneamente como puntos de estela, sin embargo, la clasificación errónea puede plantear un problema significativo. Esto es debido a que tales falsas alarmas pueden llevar a la paralización de una tubería u otras medidas cautelares o reparadoras.

15 El potencial de falsas alarmas siempre existe cuando los puntos de medición se clasifican sobre la base de un criterio probabilístico, tal como el HDR descrito anteriormente. Por lo tanto, puede ser preferible utilizar información espacial para reducir las imprecisiones de etiquetado potenciales, es decir, el número de falsas alarmas.

20 Para lograr este objetivo, se puede calcular la verosimilitud conjunta para cada punto de estela previamente identificado en su ROI circular, etapa 622. Los puntos de estela previamente identificados pueden entonces reclasificarse, etapa 624, sobre la base de una comparación de su verosimilitud conjunta con el umbral de verosimilitud de la CPL.

25 La Figura 5 ilustra, con detalle, un ejemplo de un método para reducir el número de falsas alarmas, según la presente invención. En este ejemplo de un método, se determinan las CPL's de una multitud de puntos de medición, etapa 500. Como en los ejemplos de los métodos de la Figura 4, esta determinación puede hacerse utilizando el ejemplo de método de la Figura 2 o se puede hacer utilizando los datos de la energía de pulsación medida. Se hace una determinación preliminar de si cada punto de medición representa un punto de estela o de no estela, etapa 502. Se observa que puede determinarse que los puntos de medición están demasiado cerca para etiquetarlos en esta etapa del ejemplo de método. Tales puntos pueden identificarse como puntos etiquetados dudosos. La clasificación para cada punto de medición puede hacerse preferiblemente utilizando un ejemplo de los métodos de la Figura 4, pero también pueden utilizarse otros métodos para determinar si los puntos de medición representan puntos de estela o puntos de no estela.

35 Se selecciona uno de los puntos de medición identificados como un punto de estela o un punto etiquetado dudoso, el punto de medición  $i$ -ésimo, etapa 504, y se identifica un subconjunto de puntos de medición de vecinos más cercanos alrededor del punto de medición  $i$ -ésimo. El subconjunto de puntos de medición de vecinos más cercanos incluye  $K$  puntos de medición, por lo que, si se utilizan los ejemplos de los métodos de cualquiera entre la Figura 2 o la Figura 4, puede ser el mismo  $K$  de puntos de medición para uno o para ambos de los subconjuntos utilizados en los ejemplos de los métodos de la Figura 2 y/o la Figura 4, pero esto no es necesario. Se observa que el ejemplo de método de la Figura 5 puede utilizarse para clasificar puntos etiquetados dudosos, en cuyo caso solo se seleccionan los puntos etiquetados dudosos en la etapa 504, o para probar puntos de estela erróneo, en cuyo caso solo se seleccionan puntos de estela en esta etapa 504, o el ejemplo de método de la Figura 5 puede utilizarse tanto para clasificar puntos etiquetados dudosos como para probar puntos de estela erróneos, en cuyo caso se seleccionan tanto puntos etiquetados dudosos como puntos de estela en la etapa 504.

Sean  $\{cpl_{ij}, j=1,2,..K\}$  las CPL's del subconjunto de vecinos más cercanos espacial K-NN de puntos de medición alrededor del punto de medición  $i$ -ésimo. Por lo tanto:

45 
$$(CPL\_LL)_i = p(cpl_{i1}, cpl_{i2}, \dots, cpl_{iK} | nonplume)$$
 Ec. (23)

Si se supone que la función de probabilidad conjunta del subconjunto de vecinos más cercanos del punto de medición es independiente y normalmente distribuida, entonces la Ecuación 23 puede reescribirse como:

$$(CPL\_LL)_i = \prod_{j=1}^K p(cpl_{ij} | nonplume)$$
 ; Ec. (24)

$$(CPL\_LL)_i = \ln \left[ \prod_{j=1}^K p(cpl_{ij} | nonplume) \right] = \sum_{j=1}^K p(cpl_{ij} | nonplume)$$
 ; o Ec. (25)

$$(CPL\_LL)_i = -\sum_{j=1}^K \ln(CPL_{sd})_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^K \left[ \frac{cpl_{ij} - \overline{CPL}}{(CPL_{sd})_j} \right]^2 \quad \text{Ec. (26)}$$

De forma similar, se puede calcular un nivel umbral (Threshold) correspondiente a la CPL mediante:

$$(CPL\_LL)_{Threshold} = -\sum_{j=1}^K \ln(CPL_{sd})_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^K T^2 = -\sum_{j=1}^K \ln(CPL_{sd})_j - \frac{1}{2} KT^2 \quad \text{Ec. (27)}$$

5 Una vez más mediante la eliminación de los primeros términos comunes en las ecuaciones 26 y 27 se llega a la HDR:

$$\text{Si } \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left[ \frac{cpl_{ij} - \overline{CPL}}{(CPL_{sd})_j} \right]^2 > T^2 \quad \Rightarrow \text{estela} \quad \text{Ec. (28)}$$

En otro caso  $\Rightarrow$  No estela

o equivalentemente:

$$\text{Si } \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left[ \frac{cpl_{ij} - \overline{CPL}}{(CPL_{sd})_j} \right]^2} > T \quad \Rightarrow \text{estela} \quad \text{Ec. (28a)}$$

10 En otro caso  $\Rightarrow$  No estela

donde la  $\overline{CPL}$  se estima a partir de las muestras de prueba de no estela recogida previamente o se basa en una estimación adaptativa sobre la base del promedio móvil de los puntos clasificados de no estela con alta probabilidad y la  $(CPL_{sd})$  se estima sobre la base de las Ecs. 33 y 33a.

15 Para utilizar las Ecuaciones 26 y 27, se selecciona uno de los puntos vecinos más cercanos, el j-ésimo punto de medición, del subconjunto de vecinos más cercanos, etapa 506. Se calcula adaptativamente un promedio móvil de la CPL,  $\overline{CPL}_{ij}$ , de entre las CPL's de un subconjunto local de los puntos de medición clasificados de no estela con alta probabilidad alrededor del punto de medición j-ésimo, etapa 508, y se calcula una desviación estándar,  $(CPL_{sd})_j$ , de las CPL's de cada punto de medición en el subconjunto de los vecinos más cercanos sobre la base de las Ecs. 33 y 33a, etapa 510. Este subconjunto local de puntos de medición puede tener el mismo tamaño que el subconjunto de los vecinos más cercanos, pero esto no es necesario. Por ejemplo, se pueden filtrar algunos de los puntos en el conjunto del vecindario más cercano.

20 Se determina entonces si se han calculado la  $CPL_{ij}$  y la  $(CPL_{sd})_j$  para todos los puntos de medición en el subconjunto local, etapa 512. Si no es así, se repiten las etapas 506, 508, 510 y 512. Si es así, el valor de la verosimilitud conjunta de la CPL para el punto de estela seleccionado puede calcularse utilizando la Ecuación 26, etapa 514.

25 El valor de la verosimilitud conjunta de la CPL del punto de estela seleccionada se compara con el correspondiente nivel umbral de la CPL, como anteriormente en la HDR, para determinar si el punto seleccionado es un punto de estela o de no estela, etapa 516. Si el punto seleccionado se determina que es un punto de no estela, entonces se etiqueta como un punto de no estela, y si se determina que es un punto de estela, entonces se etiqueta como un punto de estela.

30 Entonces se determina si han sido probados todos los puntos de no estela y/o los puntos etiquetados dudosos, etapa 518. Si no han sido probados todos los puntos deseados, entonces se selecciona otro punto, etapa 504, y se repite el proceso. Si se han probado todos los puntos deseados, entonces todos los puntos restantes se consideran puntos de estela verdaderos y se completa el ejemplo de método, etapa 520.

35 Volviendo a la Figura 6, una vez se han determinado los puntos de estela reclasificados, estos puntos pueden combinarse con los puntos de estela vecinos para formar grupos de estela vecinos, etapa 626. Cada uno de estos grupos de estela vecinos puede etiquetarse, etapa 628, de tal manera que diversos grupos de estela vecinos pueden identificarse mediante la etiqueta. Se observa que los puntos de estela que no tienen ningunos puntos de estela vecinos pueden ser sospechosos y puede preferirse un escrutinio adicional de tales puntos de estela solitarios para verificar que no son puntos de estela erróneos.

40 Entonces pueden mostrarse los grupos de la CPL de estela utilizando los datos espaciales asociados, etapa 630, para indicar visualmente la extensión y localización de cada estela.

Sobre la base de una propagación del error de primer orden, puede calcularse una varianza de la CPL mediante:

$$CPL_{var} = \left[ \frac{1}{2\Delta C_{\sigma}} \right]^2 \left\{ \left[ \frac{\sigma_{noise}^2}{(E_{off}^r)^2} \right] + \left[ \frac{\sigma_{noise}^2}{(E_{on}^r)^2} \right] + \left[ \frac{\sigma_{noise}^2}{(E_{off}^t)^2} \right] + \left[ \frac{\sigma_{noise}^2}{(E_{on}^t)^2} \right] + COVARIANCE\_TERMS \right\}, \quad Ec. (29)$$

o de forma equivalente:

$$CPL_{var} = \left[ \frac{1}{2\Delta C_{\sigma}} \right]^2 \left\{ \left[ \frac{1}{SNR_{off}^r} \right]^2 + \left[ \frac{1}{SNR_{on}^r} \right]^2 + \left[ \frac{1}{SNR_{off}^t} \right]^2 + \left[ \frac{1}{SNR_{on}^t} \right]^2 + COVARIANCE\_TERMS' \right\}, \quad Ec. (29a)$$

5 en donde noise significa ruido.

Debido a que  $\left[ \frac{1}{SNR_{off}^r} \right]^2$ ,  $\left[ \frac{1}{SNR_{on}^r} \right]^2$  y los TÉRMINOS\_COVARIANZA (COVARIANCE\_TERMS) son relativamente muy pequeños, se estima entonces la varianza de la CPL en cada punto mediante:

$$CPL_{var} = \left[ \frac{1}{2\Delta C_{\sigma}} \right]^2 \left\{ \left[ \frac{1}{SNR_{off}^r} \right]^2 + \left[ \frac{1}{SNR_{on}^r} \right]^2 \right\}, \quad Ec. (30)$$

y se estima la desviación estándar de la CPL,  $CPL_{sd}$ , mediante:

$$(CPL_{sd}) = \sqrt{CPL_{var}} = \left[ \frac{1}{2\Delta C_{\sigma}} \right] \sqrt{\left\{ \left[ \frac{1}{SNR_{off}^r} \right]^2 + \left[ \frac{1}{SNR_{on}^r} \right]^2 \right\}} \quad Ec. (31)$$

10 En la práctica la  $CPL_{sd}$  puede estimarse a partir de la energía o la potencia promedio de la pulsación láser en línea y fuera de línea transmitida, la energía o la potencia promedio fuera de línea de retorno, la sección transversal promedio y la filtrada y la CPL promedio sobre la base de las siguientes derivaciones (Se observa que, por el bien de la brevedad en las siguientes ecuaciones, los subíndices f y o se utilizan para indicar la referencia a las mediciones fuera de línea y en línea, respectivamente y los superíndices t y r se utilizan para indicar la referencia a las mediciones transmitidas y recibidas, respectivamente.):

$$cpl = \frac{1}{2[\Delta C_{\sigma}]} \left[ \ln \frac{\frac{E_f^r}{E_f^t}}{\frac{E_o^r}{E_o^t}} \right] = \frac{1}{2[\Delta C_{\sigma}]} \left[ \ln \frac{E_f^r E_o^t}{E_o^r E_f^t} \right]$$

Nota:

$$\Delta C_{\sigma} = \sigma(\lambda_o) - \sigma(\lambda_f)$$

Suponiendo:

$$\sigma(\lambda_f) \sim 0 \Rightarrow \Delta C_{\sigma} = \sigma(\lambda_o) \Rightarrow$$

$$\frac{E_f^r}{E_o^r} = \frac{E_f^t}{E_o^t} \exp[2\sigma(\lambda_o)cpl]$$

$$\left[ \frac{E_f^r}{E_o^r} \right]^2 = \left[ \frac{E_f^t}{E_o^t} \right]^2 \exp[4\sigma(\lambda_o)cpl]$$

Ec. (32)

Por lo tanto, la Ec. 31 puede reescribirse como:

$$CPL_{sd} = \frac{Noise_{sd}}{2\sigma(\lambda_o)} \sqrt{\left[ \frac{1}{(E_f^r)^2} + \frac{1}{(E_o^r)^2} \right]} = \frac{Noise_{sd}}{2\sigma(\lambda_o)E_f^r} \sqrt{\left[ 1 + \left[ \frac{E_f^r}{E_o^r} \right]^2 \exp[4\sigma(\lambda_o)cpl] \right]} \quad \text{Ec. (33)}$$

o como:

$$CPL_{sd} = \frac{1}{2\sigma(\lambda_o)SNR_f^r} \sqrt{\left[ 1 + \left[ \frac{E_f^r}{E_o^r} \right]^2 \exp[4\sigma(\lambda_o)cpl] \right]} \quad \text{Ec. (33a)}$$

en donde Noise significa Ruido.

5 Esto puede llevar a las siguientes observaciones:

$$\frac{E_f^r}{E_f^i}, \frac{E_o^r}{E_o^i}, \frac{E_f^r}{E_o^r} * \frac{E_f^i}{E_o^i}$$

1. Cuando la SNR es alta, pueden utilizarse preferiblemente las distribuciones de sus distribuciones de registro para detectar sus puntos de estela o de no estela. Desafortunadamente, en la práctica, el desorden variable de fondo puede reducir significativamente la SNR y, por lo tanto, hacer la clasificación precisa de los puntos de medición un problema difícil de resolver.
- 10 2. En las Ecs. 33 y 33a, puede utilizarse preferiblemente el promedio de una  $\sigma(\lambda_o)$  filtrada en un subconjunto del vecindario más cercano como una estimación mejorada local de la sección transversal.
3. En las Ecs. 33 y 33a, puede utilizarse el promedio de las CPL's de no estela altamente probables en un subconjunto del vecindario más cercano como una estimación mejorada local del promedio de la CPL de no estela.
- 15 4. Las Ecs. 33 y 33a indican que cuanto más baja se convierte la reflectividad superficial, más baja se convierte la  $E_f^r$  y más alta se convierte en la  $CPL_{sd}$ . El opuesto también es cierto. (Es decir, cuanto más alta se convierte la reflectividad superficial, más alta se convierte la  $E_f^r$  y más baja se convierte en la  $CPL_{sd}$ .)
- 20 5. Se observa que la unidad de la CPL es la inversa de la unidad de la sección transversal. En las Ecs. 33 y 33a la unidad de la sección transversal es el  $m^2/molécula$ . Por lo tanto la unidad de la CPL es la  $molécula/m^2$ . Sin embargo, en las ecuaciones anteriores, esta unidad puede convertirse a ppm-m mediante la sustitución de  $\sigma(\lambda_o)$  con  $\sigma(\lambda_o) \frac{N_a}{10^6}$ , donde  $N_a$  es la densidad del aire.
- 25 6. Idealmente, la CPL de la no estela debería ser  $\sim 0$ , pero debido a las variaciones de la reflectividad del tipo de cubierta superficial, como se ha observado previamente, la  $E_f^r$  varía en consecuencia y esta variación lleva a valores no nulos de la CPL de la no estela.
- 30 7. Puede calibrarse un ejemplo de sistema DIAL para cada gas diana sobre la base de los valores de los puntos de estela conocidos disponibles que tienen seleccionados los valores de la reflectividad superficial de fondo conocidos. Estos valores pueden utilizarse para estimar coeficientes de calibración aditivos y multiplicativos. Sin embargo, se observa que el factor de calibración aditivo no puede permitir la corrección para el tipo de cubierta superficial relativa al sesgo de la CPL modulada variable.
8. Además, se observa que, en lugar del punto simple basado en las reglas de verosimilitud obtenidas de las Ecs. 22 y 22a y de la regla de verosimilitud conjunta obtenida de las Ecs. 28 y 28a, puede utilizarse también una prueba T o prueba ANNOVA para etiquetar si una CPL estimada viene de una distribución de la familia de la no estela o de una distribución de la familia de la estela.
- 35 9. La media de la muestra de la CPL local puede también utilizarse en una prueba T o prueba ANNOVA para etiquetar si la media de la muestra de la CPL local estimada, en un subconjunto del vecindario más cercano, viene de una distribución de la familia de la no estela o de una distribución de la familia de la estela.

40 Como se observó anteriormente, en las Ecs. 33 y 33a, la unidad de la  $CPL_{sd}$  es el  $m^2/molécula$ . Las Ecs. 34 y 35 pueden utilizarse para calcular la CPL y la  $CPL_{sd}$  en unidades de ppm-m.

$$cpl = \frac{1}{2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o)]} \left[ \ln \frac{E_f' E_o'}{E_o' E_f'} \right] \quad \text{Ec. (34)}$$

$$CPL_{sd} = \frac{1}{2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o)] SNR_f'} \sqrt{1 + \left[ \frac{E_f'}{E_o'} \right]^2 \exp\{4[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) cpl]\}} \quad \text{Ec. (35)}$$

Se obtiene posteriormente una aproximación de primer orden de la Ec. 35 para proporcionar una mejor comprensión

del criterio de decisión. Esta aproximación comienza por asumir que  $\left[ \frac{E_f'}{E_o'} \right] \sim 1$ . En este límite:

$$\sqrt{1 + \left[ \frac{E_f'}{E_o'} \right]^2 \exp\{4[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) CPL]\}} \approx \exp\{2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) cpl]\} \quad \text{, y}$$

$$\exp\{2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) CPL]\} \approx 1 + 2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) cpl] + \dots \quad \text{(aproximación por series de Taylor). Ec. (36)}$$

Continuar esta aproximación para el caso en que  $2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) cpl] \gg 1$ , arroja:

$$1 + 2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) cpl] \approx 2[10^{-6} N_a \sigma(\lambda_o) cpl]. \quad \text{Ec. (37)}$$

Sobre la base de la aproximación de la Ec. 37, la Ec. 35 puede reducirse a la Ec. 38:

$$CPL_{sd} = \frac{cpl}{SNR_f'} \quad \text{Ec. (38)}$$

Sobre la base de esta aproximación, la  $CPL_{sd}$  para la base del punto único y los Vecinos más Cercanos (NN, Nearest Neighbor) o el criterio de decisión conjunto puede darse por:

$$\text{Si } SNR_f' \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{cpl} \right) > T \Rightarrow \text{Estela}, \quad \text{Ec. (39)}$$

$$\text{En otro caso} \Rightarrow \text{No estela}$$

15 o:

$$\text{Si } \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{cpl} \right) > \frac{T}{SNR_f'} \Rightarrow \text{Estela.} \quad \text{Ec. (39a)}$$

$$\text{En otro caso} \Rightarrow \text{No estela}$$

De forma similar, la NN basada en el criterio de decisión puede darse por:

$$\text{Si } \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left\{ [SNR_f']_{ij} \left[ \frac{cpl_{ij} - \overline{CPL}}{cpl_{ij}} \right] \right\}^2} > T \Rightarrow \text{Estela}, \quad \text{Ec. (40)}$$

$$\text{En otro caso} \Rightarrow \text{No estela.}$$

La presente invención incluye ejemplos de métodos para mejorar la SNR de los datos en ejemplos de sistemas DIAL. Estos ejemplos de métodos permiten incrementar la exactitud en la identificación de los puntos de estela



mediante los ejemplos de sistemas DIAL. Tales técnicas pueden utilizarse en numerosas tecnologías, tales como teledetección de fugas químicas y contaminación. Aunque la invención se ilustra y describe aquí en relación a realizaciones específicas, la invención no pretende estar limitada a los detalles mostrados. Más bien, pueden hacerse diversas modificaciones en los detalles dentro del alcance y ámbito de las equivalencias de las reivindicaciones y sin apartarse de la invención.

5

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para mejorar la relación de la señal al ruido en un sistema LIDAR (DIAL) de absorción diferencial, comprendiendo el método las etapas de:
  - 5 a) escanear (200) un haz DIAL de tal manera que el haz DIAL se transmita a través de una multitud de puntos de medición, incluyendo el haz DIAL un haz láser en línea (100) que tiene una longitud de onda máxima que está dentro de la banda de absorción óptica de una molécula diana y un haz láser fuera de línea (102) que tiene una longitud de onda máxima seleccionada para estar fuera de la banda de absorción óptica de la molécula diana, siendo transmitidos el haz láser en línea y el haz láser fuera de línea básicamente colineales;
  - 10 b) medir (202) una multitud de energías de pulsación transmitidas del haz láser en línea y una multitud de energías de pulsación transmitidas del haz láser fuera de línea correspondientes a la multitud de puntos de medición;
  - 15 c) medir (204) una multitud de energías de pulsación recibidas del haz láser en línea y una multitud de energías de pulsación recibidas del haz láser fuera de línea correspondientes a la multitud de puntos de medición;
  - d) seleccionar (206) un punto de medición;
  - e) seleccionar (208) un subconjunto de puntos de medición de región de interés (ROI) dentro de una ROI alrededor del punto de medición seleccionado;
  - f) calcular (212, para el punto de medición seleccionado:
    - 20 una energía promedio de la pulsación en línea transmitida a partir de las energías de pulsación transmitidas del haz láser en línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición;
    - 25 una energía promedio de la pulsación fuera de línea transmitida a partir de las energías de pulsación transmitidas del haz láser fuera de línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición;
    - una energía promedio de la pulsación en línea recibida a partir de las energías de pulsación recibidas del haz láser en línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición; y
    - 30 una energía promedio de la pulsación fuera de línea recibida a partir de las energías de pulsación recibidas del haz láser fuera de línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición; y
  - 35 g) calcular (214) un longitud del trayecto de concentración (CPL) del haz DIAL para el punto de medición seleccionado utilizando la energía promedio de pulsación en línea transmitida, la energía promedio de pulsación fuera de línea transmitida, la energía promedio de pulsación en línea recibida, y la energía promedio de pulsación fuera de línea recibida.
2. El método según la reivindicación 1, en el que la etapa a) incluye escanear el haz DIAL de tal manera que la multitud de puntos de medición a través del que se transmite el haz DIAL están uniformemente distribuidos.
3. El método según la reivindicación 2, en el que la ROI alrededor de un punto de medición seleccionado es un círculo centrado en el punto de medición seleccionado y tiene un radio predeterminado.
- 40 4. El método según la reivindicación 3, en el que:
  - la multitud de puntos de medición son básicamente osciladores; y
  - el radio predeterminado de la ROI es aproximadamente cinco veces un radio del haz del haz DIAL.
5. El método según la reivindicación 1, en el que la etapa a) incluye escanear el haz DIAL de tal manera que varía una densidad de la multitud de puntos de medición a través de los cuales se transmite el haz DIAL.
- 45 6. El método según la reivindicación 5, en el que:
  - la ROI alrededor de un punto de medición seleccionado es un círculo centrado en el punto de medición seleccionado; y
  - se selecciona un radio del círculo de tal manera que la ROI incluye un número predeterminado de puntos de medición.

7. El método según la reivindicación 6, en el que el número predeterminado de puntos de medición es aproximadamente de 25.
8. El método según la reivindicación 1, en el que la etapa (f) incluye las etapas de:
- 5 f1) calcular la energía promedio de la pulsación en línea transmitida para ser un promedio no ponderado de las energías de pulsación transmitidas del haz láser en línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición;
- f2) calcular la energía promedio de la pulsación fuera de línea transmitida para ser un promedio no ponderado de las energías de pulsación transmitidas del haz láser fuera de línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición;
- 10 f3) calcular la energía promedio de la pulsación en línea recibida para ser un promedio no ponderado de las energías de pulsación recibidas del haz láser en línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición; y
- f4) calcular la energía promedio de la pulsación fuera de línea recibida para ser un promedio no ponderado de las energías de pulsación recibidas del haz láser fuera de línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición.
- 15
9. El método según la reivindicación 1, en el que la etapa (f) incluye las etapas de:
- f1) calcular la energía promedio de la pulsación en línea transmitida para ser un promedio ponderado de las energías de pulsación transmitidas del haz láser en línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición;
- 20 f2) calcular la energía promedio de la pulsación fuera de línea transmitida para ser un promedio ponderado de las energías de pulsación transmitidas del haz láser fuera de línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición;
- f3) calcular la energía promedio de la pulsación en línea recibida para ser un promedio ponderado de las energías de pulsación recibidas del haz láser en línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición; y
- 25 f4) calcular la energía promedio de la pulsación fuera de línea recibida para ser un promedio ponderado de las energías de pulsación recibidas del haz láser fuera de línea del subconjunto de la ROI seleccionado de los puntos de medición.
- 30
10. El método según la reivindicación 9, en el que los promedios ponderados de las etapas (f1), (f2), (f3) y (f4) se calculan según una función de ponderación de núcleo Gaussiano circular.
11. El método según la reivindicación 1, que comprende además la etapa de:
- h) repetir las etapas (d), (e), (f), (g) y (h) hasta que se han seleccionado todos los puntos de medición en la etapa (d).
12. El método según la reivindicación 11, que comprende además la etapa de:
- 35 i) para cada punto de medición, determinar si el punto de medición representa un punto de estela o un punto de no estela utilizando la correspondiente CPL calculada en la etapa (g).
13. El método según la reivindicación 12, en el que la etapa (i) incluye, para cada punto de medición, las etapas de:
- i1) proporcionar un promedio de la CPL de no estela,  $\overline{CPL}$  ;
- 40 i2) calcular una desviación estándar,  $CPL_{sd}$  , de cada punto de medición sobre la base de la propagación del error de primer orden;
- i3) calcular el valor de la verosimilitud de la CPL para cada punto de medición,

$$CPL_{LL} = -\frac{1}{2} \ln(2\pi) - \ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2} \left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2,$$

donde  $cpl$  es la correspondiente CPL del punto de medición calculado en la etapa (g); y

- i4) determinar que el punto de medición representa un punto de no estela si el valor de la verosimilitud de la CPL es menor que un nivel umbral (threshold) de la CPL,

$$CPL\_LL_{threshold} = -\frac{1}{2} \ln(2\Pi) - \ln(CPL_{sd}) - \frac{1}{2}(T)^2$$

donde  $T$  es un nivel umbral de la desviación estándar.

- 5 14. El método según la reivindicación 12, en el que la etapa (i) incluye, para cada punto de medición, las etapas de:

- i1) proporcionar un promedio de la CPL de no estela,  $\overline{CPL}$  ;  
 i2) calcular una desviación estándar,  $CPL_{sd}$  , de cada punto de medición sobre la base de la propagación del error de primer orden; y  
 10 i3) determinar que el punto de medición representa un punto de no estela cuando se encuentra un criterio de decisión de Hooshmand (HDR), siendo el HDR:

$$\left( \frac{cpl - \overline{CPL}}{CPL_{sd}} \right)^2 > (T)^2$$

donde  $cpl$  es la correspondiente CPL del punto de medición calculado en la etapa (g) y  $T$  es un nivel umbral de la desviación estándar.

- 15 15. El método según la reivindicación 12, que comprende además la etapa de:

- j) para cada punto de estela determinado en la etapa (i), determinar si el punto de estela es un punto de estela erróneo utilizando las CPL's calculadas en la etapa (g).

16. El método según la reivindicación 15, en el que la etapa (j), para un punto de estela  $i$ -ésimo de los puntos de estela determinados en la etapa (i), incluye las etapas de:

- 20 j1) seleccionar un punto de medición  $j$ -ésimo del conjunto de vecinos más cercanos de los puntos de medición del  $i$ -ésimo punto de estela, incluyendo el subconjunto de vecinos más cercanos de los puntos de medición el punto de estela y un número predeterminado,  $K-1$ , de puntos de medición de los vecinos más cercanos;  
 j2) calcular un promedio de la CPL,  $\overline{CPL}_{ij}$  , de las CPL's de un subconjunto local de los puntos de  
 25 medición alrededor del  $j$ -ésimo punto de medición;  
 j3) calcular una desviación estándar,  $(CPL_{sd})_j$ , de cada punto de medición en el subconjunto local sobre la base de la propagación del error de primer orden;  
 j4) repetir las etapas (j1), (j2) y (j3) desde  $j=1$  hasta  $K$ ;  
 j5) calcular el valor de la verosimilitud de la CPL del  $i$ -ésimo punto de estela,

$$(CPL\_LL)_i = -\sum_{j=1}^K \ln(CPL_{sd})_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^K \left[ \frac{cpl_{ij} - \overline{CPL}_j}{(CPL_{sd})_j} \right]^2$$

donde  $cpl_{ij}$  es la correspondiente CPL del  $j$ -ésimo punto de medición calculado en la etapa (g); y

- j6) determinar que el  $i$ -ésimo punto de estela representa un punto de estela falso si el valor de la verosimilitud de la CPL del  $i$ -ésimo punto de estela es menor que un nivel umbral ( $Threshold$ ) de la CPL del  $i$ -ésimo punto de estela,

$$(CPL\_LL)_{Threshold} = -\sum_{j=1}^K \ln(CPL_{sd})_j - \frac{1}{2}KT^2$$

donde  $T$  es un nivel umbral de la desviación estándar.

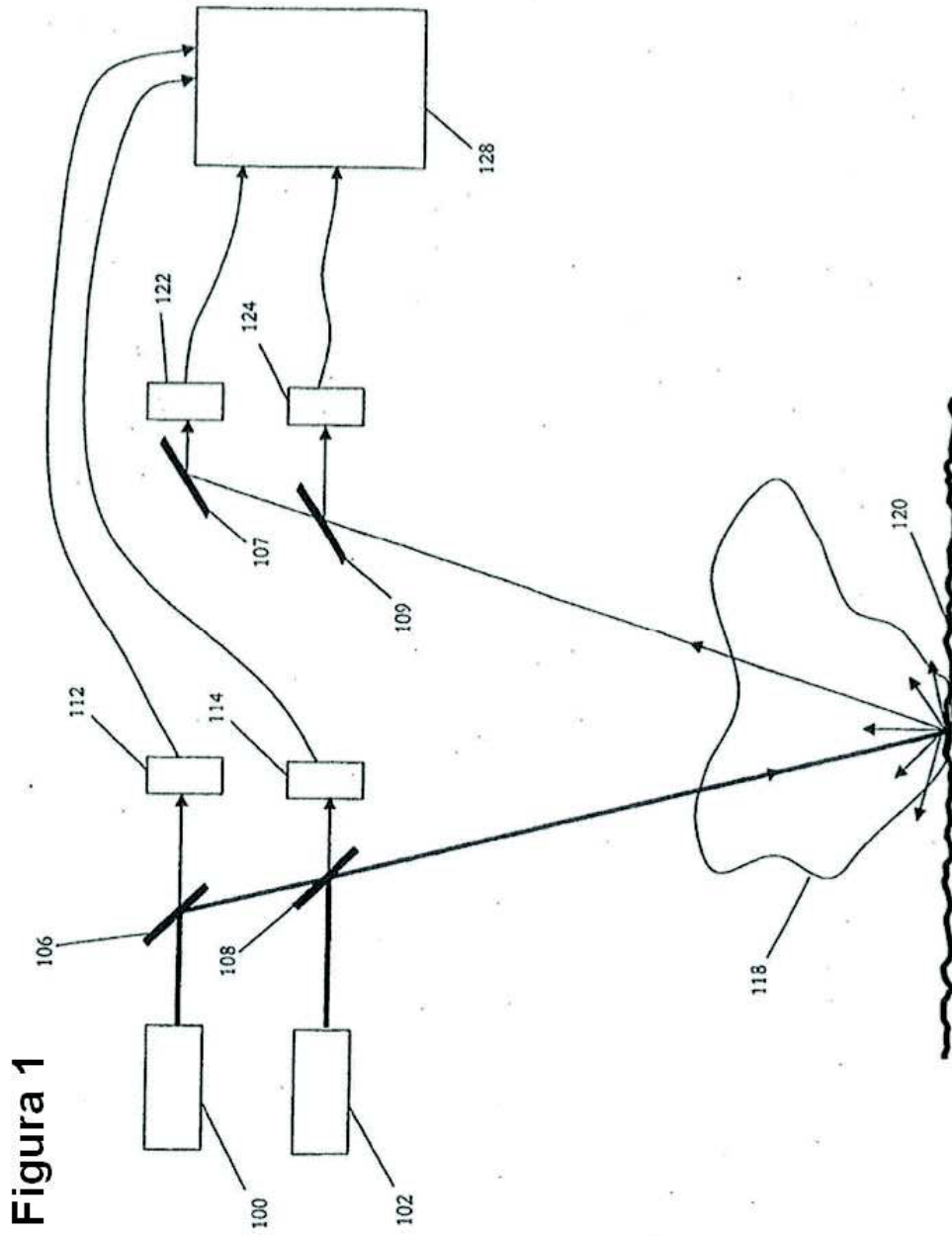


Figure 1

Figura 2

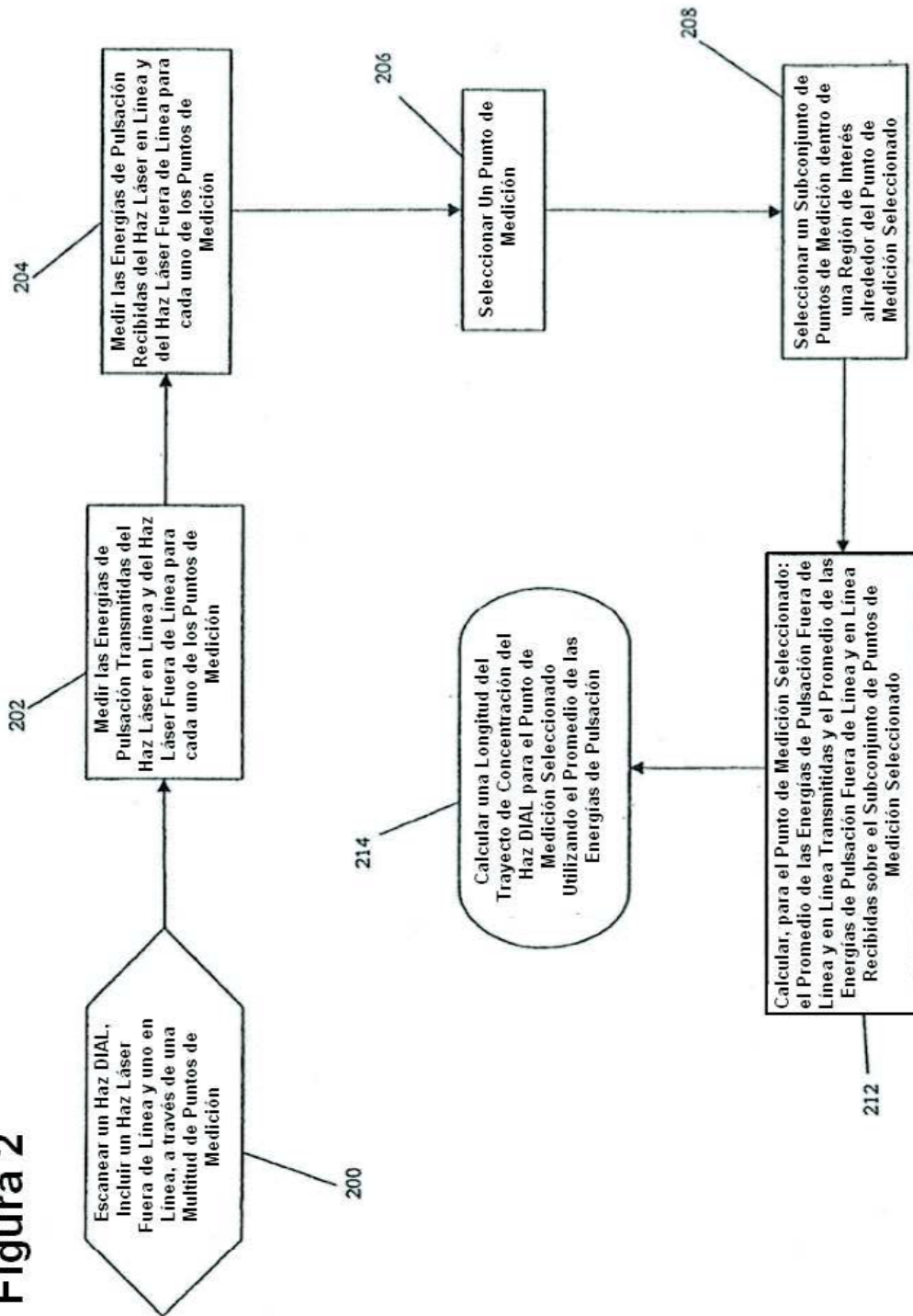




Figura 3A

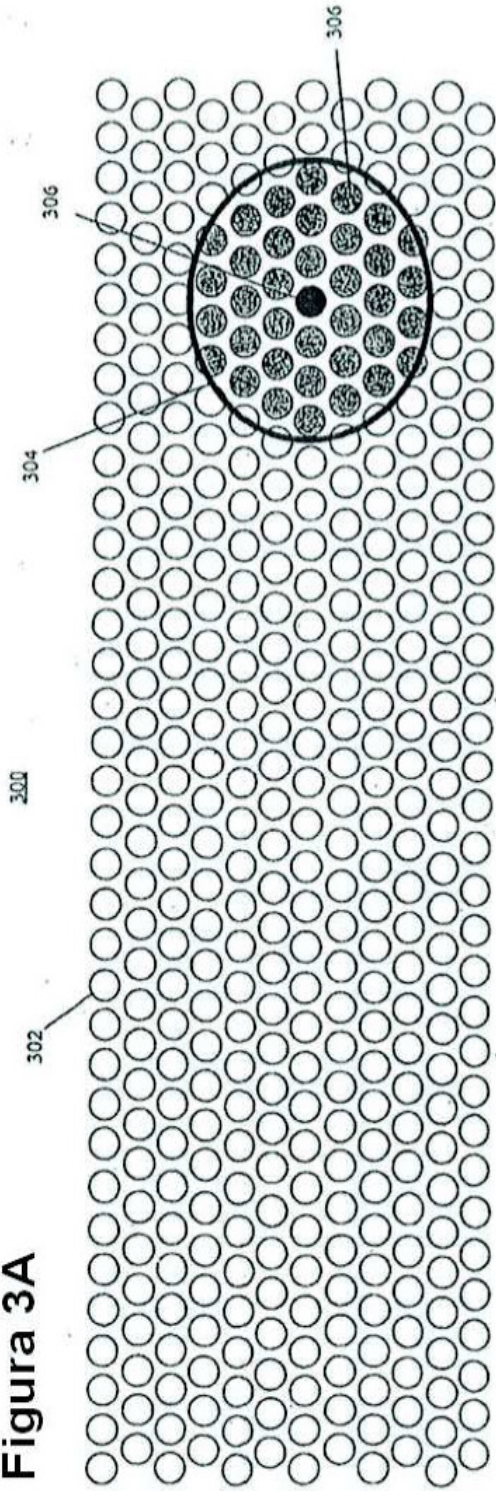
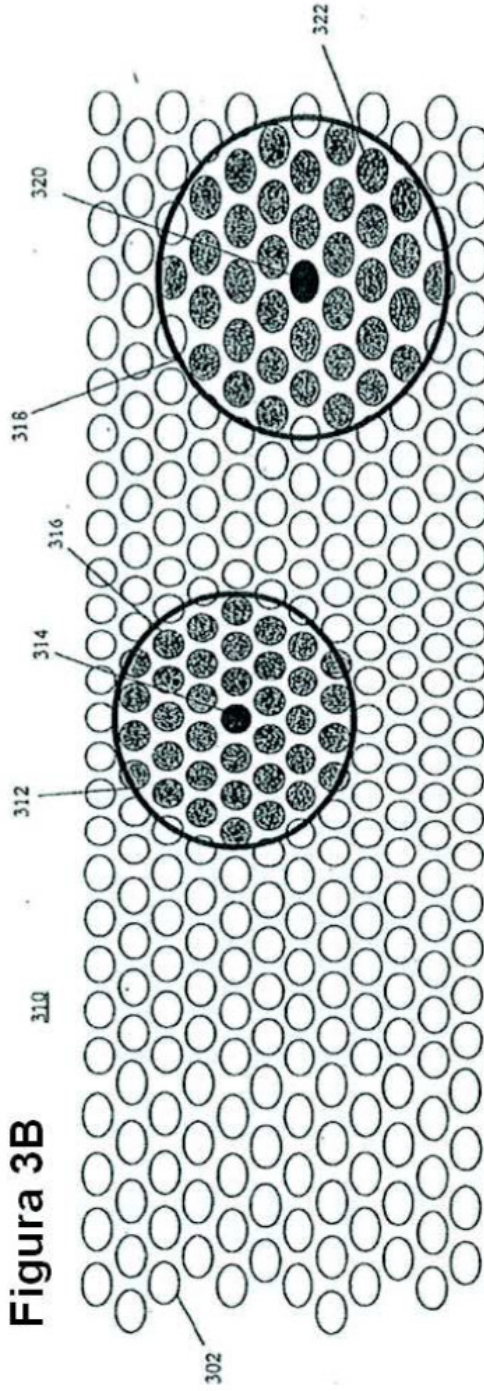


Figura 3B



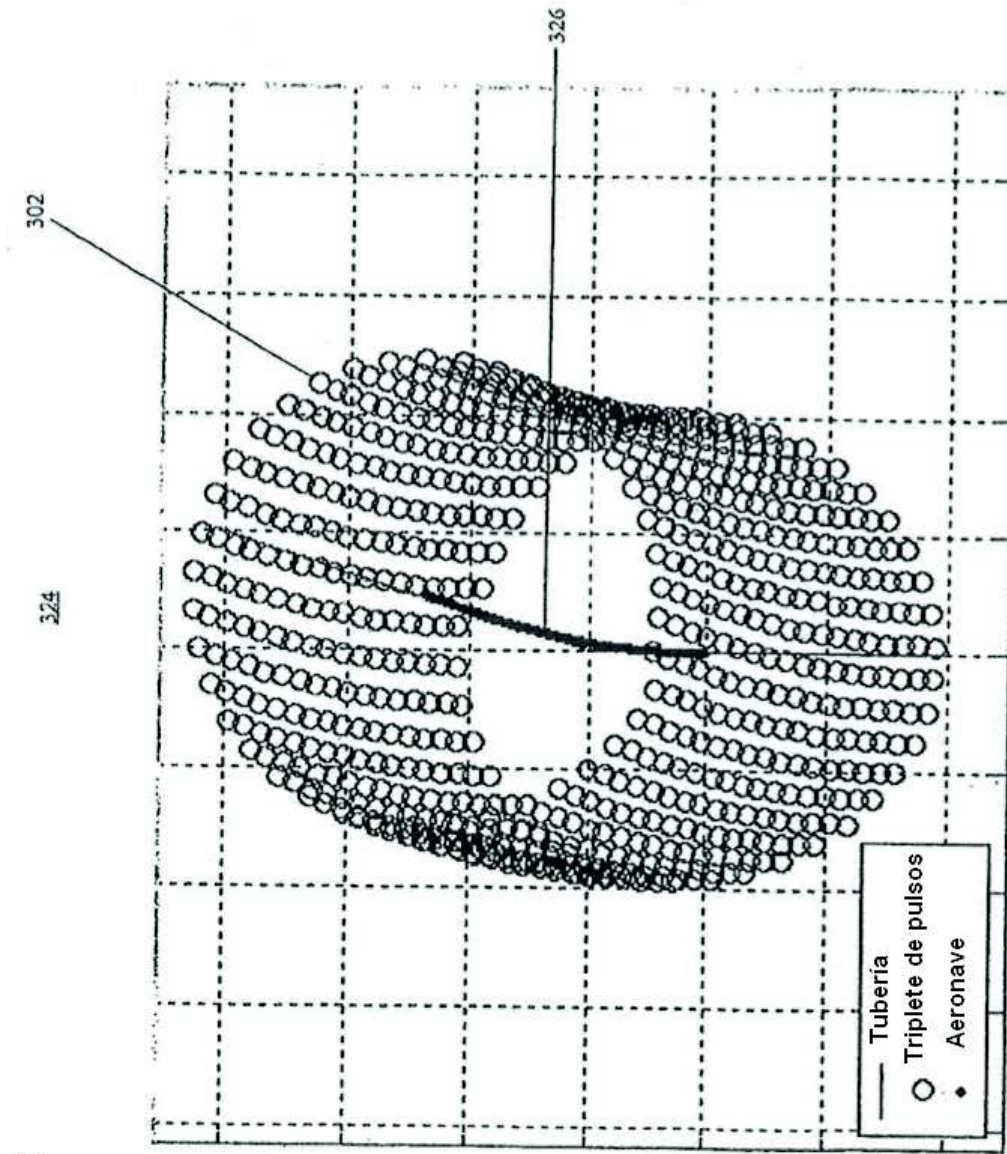


Figura 3C



Figura 4

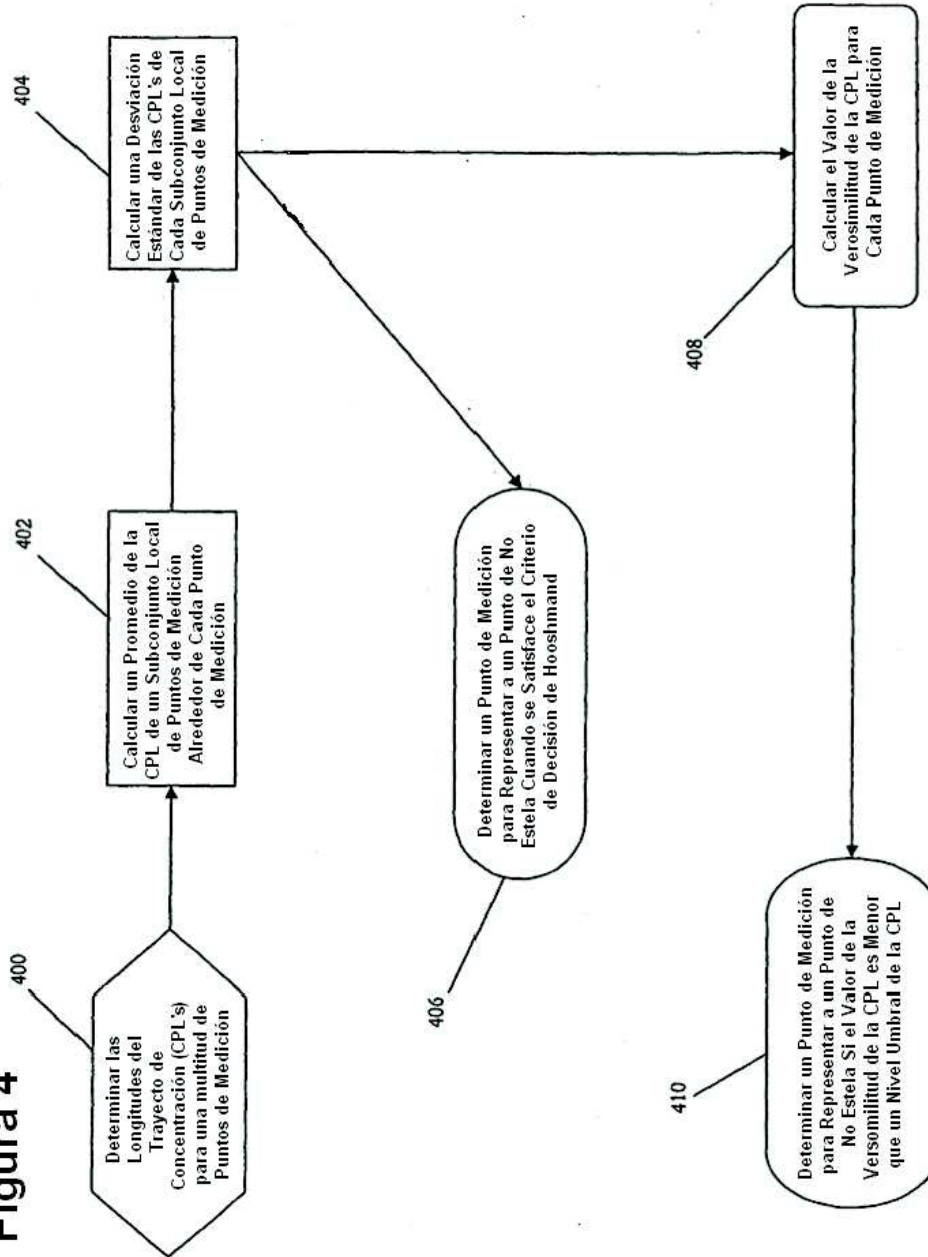


Figura 5

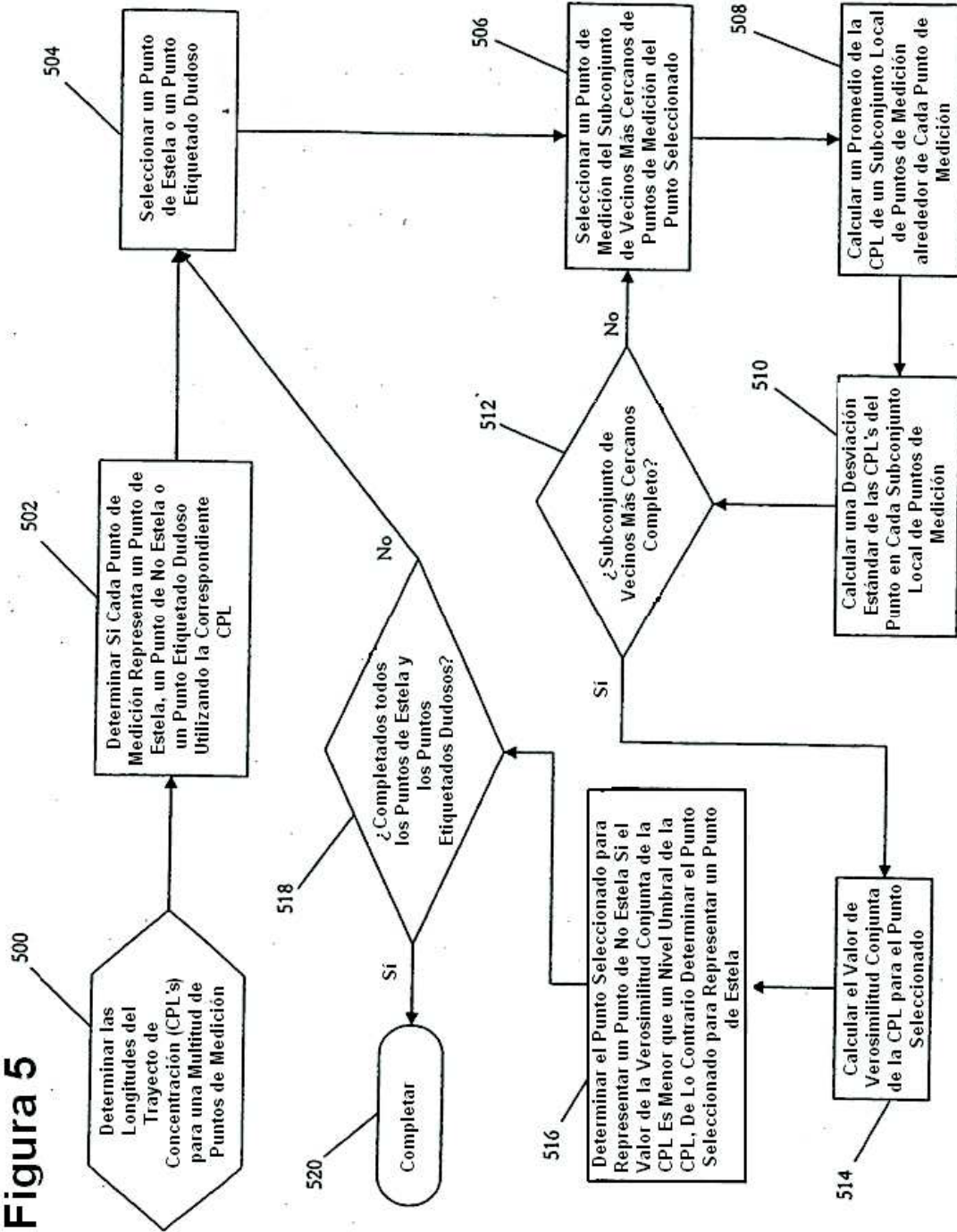


Figura 6

