

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 665 046**

51 Int. Cl.:

G01N 33/24 (2006.01)

G06F 19/00 (2008.01)

G06Q 10/06 (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.06.2011 PCT/AU2011/000702**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.12.2011 WO11150472**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.06.2011 E 11788990 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.01.2018 EP 2577293**

54 Título: **Un método para cuantificar carbono en el suelo**

30 Prioridad:

04.06.2010 AU 2010902472

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

24.04.2018

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY OF SYDNEY (100.0%)
Parramatta Road
Sydney, NSW 2006, AU**

72 Inventor/es:

**MCBRATNEY, ALEX;
MINASNY, BUDIMAN;
DE GRUIJTER, JAAP y
MULVEY, PHILIP, JAMES**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 665 046 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 cuantificar carbono en el suelo

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere en general a un método para cuantificar carbono en el suelo, y particularmente a un método para cuantificar carbono en el suelo basado en una estrategia de muestreo.

Antecedentes de la invención

10 En el contexto de los esquemas de comercialización de compensaciones de emisiones de carbono, existe la necesidad de un método estadísticamente y económicamente viable para auditar la variación del carbono en el suelo a lo largo de un período de tiempo establecido, para una unidad de terreno. Esto facilita la transparencia en los contratos emisor-secuestrador y brinda confianza al mercado, al público en general y al gobierno. Un método sugerido por el NSW Department of Environment, Climate Change and Water (DECCW) (Departamento de medio ambiente, cambio climático y agua de Nueva Gales del Sur) para obtener dicha estimación es el método de cuadrantes. Para una unidad de terreno dada, se elige una subzona de 25 m por 25 m y se divide en 10 por 10 cuadrantes de igual tamaño. De estos 100 cuadrantes se eligen al azar diez muestras y se calcula la concentración de carbono y la densidad aparente del suelo a una profundidad fija de, habitualmente, 50 cm. En una fecha posterior, se repite el proceso en la misma subzona. Se calcula la diferencia en contenido de carbono.

15 El método de cuadrantes tiene dos inconvenientes. En primer lugar, se conoce la zona de muestreo (es decir, la subzona), lo que puede conducir a prácticas fraudulentas en las que se puede secuestrar deliberadamente carbono en la zona de muestreo conocida. Más importante aún, la extrapolación del contenido medio de carbono desde la subzona más pequeña hacia la unidad de terreno más grande comprendida en la gestión del secuestro conduce a una gran varianza muestral que da como resultado una estimación insegura del cambio en el contenido de carbono.

20 Australian Journal of Soil Research vol. 48, 6 de mayo de 2010, páginas 248-257, XP008169636, ISSN 0004-9573, Miklos M *et al.*: "Mapping and comparing the distribution of soil carbon under cropping and grazing management practices in Narrabri north-west New South Wales" (Cartografía y comparación de la distribución de carbono en el suelo bajo las prácticas de gestión del cultivo y el pastoreo en Narrabri, al noroeste de Nueva Gales del Sur), propone una nueva metodología para evaluar la distribución del carbono total, orgánico e inorgánico con alta resolución espacial. Se crearon mapas de carbono edáfico basal utilizando datos de sensores proximales, georreferenciados y de resolución fina. Asociándolos con un modelo de elevación digital y atributos secundarios del terreno, se combinaron todas las capas de datos mediante agrupación de medias k con el fin de desarrollar un esquema de muestreo aleatorio estratificado del suelo para la zona del estudio. Se escanearon las muestras de suelo con un espectrómetro de infrarrojo medio, que se había calibrado utilizando una parte de las muestras, analizadas en laboratorio en cuanto a contenido de carbono total y de carbono inorgánico.

25 Geoderma, vol. 133, n.º 3-4, 15 de septiembre de 2005, páginas 345-262, XP028066991, ISSN 0016-7061, Simbahan GC *et al.*: "Sampling optimization based on secondary information and its utilization in soil carbon mapping" (Optimización de muestreo basada en información secundaria y su uso en la cartografía de carbono en el suelo), propone un método para optimizar el muestreo destinado a la cartografía digital del suelo en los casos en los que no se dispone de información previa medida directamente de la variable primaria de interés. Se asumió que diversas variables auxiliares (series de suelos, elevación relativa, pendiente, conductividad eléctrica y reflectancia de la superficie del suelo) proporcionan información indirecta sobre la distribución espacial de las existencias de carbono en el suelo. Se utilizó la información secundaria para estratificar cada campo en agrupaciones espaciales contiguas. Utilizando esta estratificación, se asignaron esquemas iniciales de muestreo aleatorio estratificado y se optimizaron adicionalmente mediante "recocido" simulado espacial restringido.

30 Geoderma, vol. 132, n.º 3-4, 15 de septiembre de 2005, páginas 471-489, XP028067022, ISSN 0016-7061, Simbahan GC *et al.*: "Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data" (Cartografiado con resolución fina del carbono orgánico en el suelo basado en datos secundarios multivariantes", recomienda el uso de información secundaria medida y multivariante en aproximaciones mediante krigeaje por regresión para cartografiar el carbono orgánico en el suelo. Las variables auxiliares que se supone proporcionan información indirecta acerca de los patrones espaciales de las existencias de carbono incluyen mapas de series de suelos, reflectancia superficial derivada de imágenes de satélite, elevación relativa y conductividad eléctrica del suelo.

Compendio de la invención

35 La presente invención se refiere a un método para cuantificar carbono en el suelo en una unidad de terreno, según la reivindicación 1. En las reivindicaciones dependientes se describen realizaciones preferidas.

40 Preferiblemente, el paso de obtener una distribución espacial del contenido de carbono incluye el paso de obtener una predicción regional de la distribución espacial del contenido de carbono. Como alternativa, o adicionalmente, el paso de obtener una distribución espacial estimada del contenido de carbono incluye el paso de obtener una

- distribución espacial estimada del contenido de carbono basándose, al menos parcialmente, en información asociada con la unidad de terreno. Como otra alternativa, o más adicionalmente, el paso de obtener una distribución espacial estimada del contenido de carbono incluye el paso de obtener una distribución espacial estimada del contenido de carbono basada, al menos parcialmente, en una cualquiera o varias de información del terreno, información radiométrica gamma, información climática, información geológica, información regolítica, información de la clasificación de uso de la tierra e información conocida sobre el carbono en el suelo asociada con la unidad de terreno.
- 5
- Preferiblemente, el método comprende además el paso de reducir la escala de la información asociada con la unidad de terreno.
- 10
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de medir el contenido de carbono de la muestra como contenido medido de carbono de la muestra. Más preferiblemente, el paso de medir el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de medir el contenido de carbono de la muestra por combustión del suelo en las una o varias ubicaciones. Como alternativa, el paso de medir el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de medir el contenido de carbono de la muestra mediante análisis por espectroscopía de infrarrojo cercano del suelo en las una o varias ubicaciones.
- 15
- Preferiblemente, el paso de medir el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de corregir el contenido medido de carbono de la muestra teniendo en cuenta el carbono inorgánico en el suelo.
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra en una o varias capas de masa medida de suelo sobre una zona determinada de la unidad de terreno. Más preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de ajustar por interpolación segmentaria (en inglés, "spline fitting") el contenido medido de carbono de la muestra en tres o más capas de masa medida de suelo. Como alternativa, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye determinar el contenido de carbono de la muestra basándose en el máximo contenido medido de carbono de la muestra.
- 20
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido combinado de carbono a partir de dos o más de dichas ubicaciones. Como alternativa, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido no combinado de carbono en cada una de dichas ubicaciones. Más preferiblemente, el paso de determinar el contenido combinado de carbono a partir de dos o más de dichas ubicaciones incluye el paso de combinar dos o más capas respectivas de igual masa de suelo procedentes de las dos o más de dichas ubicaciones.
- 25
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra mediante el peso o masa absoluto, en porcentaje o fraccionario, de carbono.
- 30
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar uno cualquiera o varios de la media, la varianza y el error estándar del contenido de carbono de la muestra sobre las una o varias ubicaciones, para cada uno de la pluralidad de estratos o estratos reestratificados.
- 35
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar uno cualquiera o varios del diámetro de la zapata de corte, la profundidad de empuje, la longitud del testigo extraído y la profundidad del orificio, asociados con la masa medida de suelo.
- 40
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido total de carbono incluye el paso de determinar el contenido total de carbono en una masa predeterminada de suelo por unidad de superficie de la unidad de terreno. Más preferiblemente, el paso de determinar el contenido total de carbono incluye el paso de determinar el contenido total de carbono en 1.500 kilogramos de suelo por metro cuadrado de la unidad de terreno.
- 45
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido total de carbono incluye el paso de determinar el contenido total de carbono en una masa predeterminada de suelo por unidad de superficie de la unidad de terreno basándose, al menos parcialmente, en la masa medida y la superficie determinada.
- Preferiblemente, el paso de determinar el contenido total de carbono incluye el paso de determinar una cualquiera o varias de la varianza, error estándar, un intervalo de confianza, una diferencia detectable mínima del contenido total de carbono en la unidad de terreno.
- 50
- Preferiblemente, el paso de determinar una cantidad de carbono secuestrado incluye el paso de determinar una diferencia entre el primer contenido total de carbono y el segundo contenido total de carbono.
- 55
- Preferiblemente, el método comprende además el paso de determinar una varianza, error estándar o intervalo de confianza del carbono secuestrado. Más preferiblemente, el paso de determinar una varianza, error estándar o intervalo de confianza del carbono secuestrado incluye el paso de determinar una varianza, error estándar o intervalo de confianza del carbono secuestrado basándose, al menos parcialmente, en la varianza o error estándar del primer contenido de carbono de la muestra y/o la varianza o error estándar del segundo contenido de carbono de

la muestra.

Preferiblemente, el primer tiempo y el segundo tiempo están separados por un período basado, al menos parcialmente, en un contrato de secuestro de carbono.

Preferiblemente, el primer tiempo y el segundo tiempo están separados por un período de aproximadamente 5 años.

- 5 Preferiblemente, el primer tiempo y el segundo tiempo están separados por un período basado, al menos parcialmente, en la diferencia mínima detectable del primer contenido total de carbono en la unidad de terreno

Preferiblemente, el paso de estratificar la unidad de terreno en una pluralidad de estratos incluye el paso de estratificar la unidad de terreno en un número establecido de estratos. Más preferiblemente, el número establecido de estratos se basa, al menos parcialmente, en uno cualquiera o varios de diversidad del paisaje, tipo de uso de la tierra, superficie total e incertidumbre permisible en la cuantificación del primer contenido total de carbono.

- 10

Preferiblemente, el paso de reestratificar la unidad de terreno en una pluralidad de estratos reestratificados incluye el paso de reestratificar la unidad de terreno en un número establecido de estratos reestratificados. Más preferiblemente, el número establecido de estratos reestratificados se basa, al menos parcialmente, en uno cualquiera o varios de diversidad del paisaje, tipo de uso de la tierra, superficie total e incertidumbre permisible en la cuantificación del segundo contenido total de carbono.

- 15

Preferiblemente, el número establecido de estratos y/o el número establecido de estratos reestratificados se sitúan en el intervalo de cinco a siete.

Preferiblemente, el paso de estratificar la unidad de terreno en una pluralidad de estratos incluye el paso de determinar uno o varios límites de estrato entre el número establecido de estratos. Más preferiblemente, el paso de determinar el uno o varios límites de estrato incluye el paso de determinar el uno o varios límites de estrato basándose, al menos parcialmente, en la distribución espacial del contenido de carbono. Aún más preferiblemente, el paso de determinar el uno o varios límites de estrato incluye el paso de determinar los límites de estrato basándose, al menos parcialmente, en una función acumulativa de la raíz cuadrada de las frecuencias de presencia de carbono derivadas de la distribución espacial del contenido de carbono.

- 20

Preferiblemente, el paso de reestratificar la unidad de terreno en una pluralidad de estratos reestratificados incluye el paso de determinar uno o varios límites de estrato reestratificado entre el número establecido de estratos reestratificados. Más preferiblemente, el paso de determinar el uno o varios límites de estrato reestratificado incluye el paso de determinar el uno o varios límites de estrato reestratificado basándose, al menos parcialmente, en el primer contenido de carbono de la muestra. Aún más preferiblemente, el paso de determinar el uno o varios límites de estrato reestratificado incluye el paso de determinar los límites de estrato reestratificado basándose, al menos parcialmente, en una función acumulativa de la raíz cuadrada de las frecuencias de presencia de carbono derivada del primer contenido de carbono de la muestra.

- 25

- 30

Preferiblemente, el paso de determinar uno o varios límites de estrato incluye el paso de determinar uno o varios límites óptimos de estrato con asignación de Neyman.

- 35

Preferiblemente, el paso de seleccionar una o varias ubicaciones incluye el paso de determinar un número establecido de ubicaciones. Más preferiblemente, el paso de determinar un número establecido de ubicaciones incluye el paso de determinar un número establecido de ubicaciones basándose, al menos parcialmente, en el número establecido de estratos o estratos reestratificados. Aún más preferiblemente, el paso de determinar un número establecido de ubicaciones incluye el paso de determinar un número establecido de ubicaciones que es uno más que el número establecido de estratos o estratos reestratificados. Aún más preferiblemente, el paso de determinar un número establecido de ubicaciones incluye el paso de determinar un número establecido de ubicaciones que es dos más que el número establecido de estratos o estratos reestratificados.

- 40

Preferiblemente, el paso de seleccionar una o varias ubicaciones incluye el paso de seleccionar una o varias ubicaciones mediante muestreo aleatorio.

- 45

Preferiblemente, el paso de seleccionar una o varias ubicaciones incluye el paso de seleccionar una o varias ubicaciones de una cuadrícula de muestreo de ubicaciones que están separadas por una distancia de aproximadamente 5 metros.

- 50 Preferiblemente, el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra a una profundidad de muestreo de aproximadamente 1 metro.

Preferiblemente, la unidad de terreno incluye una zona agrícola o una zona de captación.

Preferiblemente, la unidad de terreno incluye una unidad de terreno con un tamaño entre aproximadamente 400 y aproximadamente 3.000 hectáreas.

Preferiblemente, el carbono incluye cualquiera de los dos, o ambos, de carbono orgánico y carbono inorgánico.

Preferiblemente, el carbono incluye uno cualquiera o varios de carbono elemental, óxidos de carbono y carbonatos.

5 Preferiblemente, el suelo incluye suelo secado al aire y/o suelo secado en estufa.

Breve descripción de los dibujos adjuntos

- Figura 1 Diagrama de flujo que ilustra una realización del método según la presente invención.
- Figura 2A Ejemplos de variables de paisaje a partir de radiometría gamma (las dos columnas más a la izquierda) y atributos derivados de un modelo de elevación (las dos columnas más a la derecha).
- 10 Figura 2B Una distribución espacial ilustrativa del porcentaje de carbono orgánico en la capa superior del suelo en Australia.
- Figura 2C Ejemplos de divisiones primarias en la clasificación del uso de la tierra en cuanto a respuesta de carbono en el suelo.
- Figura 2D Detalles de las divisiones primarias que se muestran en la Figura 2C.
- 15 Figura 2E Un ejemplo de una unidad de terreno que está dividida en las divisiones primarias que se muestran en la Figura 2C.
- Figura 2F Un ejemplo de observaciones de carbono en el suelo anteriores o conocidas, para construir la función de predicción de carbono orgánico en el suelo.
- 20 Figura 2G Un ejemplo de distribución espacial estimada o predicha de carbono orgánico en el suelo ($\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$) en la unidad de terreno que se muestra en la Figura 2E.
- Figura 3 Un ejemplo de estratificación (izquierda) de la unidad de terreno que se muestra en la Fig. 2E y de ubicaciones seleccionadas (derecha) en la misma, basado en la distribución estimada o predicha de carbono en el suelo que se muestra en la Figura 2G.
- Figuras 4A-C Una tabla que muestra un listado de variables utilizadas en los ejemplos de cálculo.
- 25 Figura 5A Una tabla que muestra datos procesados del testigo con referencia identificativa "2i" calculados en el Ejemplo 1.
- Figura 5B Un gráfico que representa la masa de suelo acumulada frente al contenido de carbono acumulado en el Ejemplo 1.
- Figura 5C Una tabla que muestra datos procesados de dos estratos calculados en el Ejemplo 1.
- 30 Figura 5D Una tabla que muestra datos procesados de la unidad de terreno calculados en el Ejemplo 1.
- Figura 6A Una tabla que muestra datos procesados de testigos combinados con referencias identificativas "2a" y "2i" calculados en el Ejemplo 2.
- Figura 6B Un gráfico que representa la masa de suelo acumulada frente al contenido de carbono acumulado en el Ejemplo 2.
- 35 Figura 6C Una tabla que muestra datos procesados de dos estratos calculados en el Ejemplo 2.
- Figura 6D Una tabla que muestra datos procesados de la unidad de terreno calculados en el Ejemplo 2.
- Figura 7A Una tabla que muestra datos procesados del testigo con referencia identificativa "2i" calculados en el Ejemplo 3.
- 40 Figura 7B Un gráfico que representa la profundidad del suelo acumulada frente al contenido acumulado de carbono en el Ejemplo 3.
- Figura 7C Una tabla que muestra datos procesados de dos estratos calculados en el Ejemplo 3.
- Figura 7D Una tabla que muestra datos procesados de la unidad de terreno calculados en el Ejemplo 3.
- Figura 8A Una tabla que muestra datos procesados calculados en el Ejemplo 4.

Figura 8B Una tabla que muestra datos procesados de dos estratos calculados en el Ejemplo 4.

Figura 8C Una tabla que muestra datos procesados de la unidad de terreno calculados en el Ejemplo 4.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

5 La presente invención se refiere en general a un método para cuantificar carbono en el suelo, particularmente carbono orgánico en el suelo (SOC, por sus siglas en inglés), en una unidad de terreno. El método puede ser adecuado para una zona agrícola o paisaje similar de aproximadamente 400 a aproximadamente 3.000 hectáreas. El método puede ser aplicable a zonas de menor y de mayor tamaño, por ejemplo zonas de captación. El método puede ser parte de un protocolo de auditoría de carbono en el suelo, en el cual se pueden determinar cambios en el carbono en el suelo a lo largo de un período de tiempo cuantificando el carbono en el suelo al comienzo (tiempo t_1) y al final (tiempo t_2) de ese período. Las variaciones del carbono en el suelo se pueden determinar como la diferencia entre el carbono en el suelo en t_1 y el carbono en el suelo en t_2 , y se pueden atribuir a la cantidad de carbono secuestrado en la unidad de terreno durante ese período. El protocolo de auditoría de carbono en el suelo se puede utilizar, por ejemplo, para verificar un contrato de secuestro de carbono. Este protocolo de auditoría de carbono en el suelo tiene por objeto permitir la atribución de créditos de carbono al cuerpo edáfico dentro de una zona definida y durante un período definido. Va implícito dentro de este estilo de protocolo de auditoría el que dependa del tiempo y sea posterior al suceso. Es decir, se puede verificar durante un período determinado el COS secuestrado y comercializarlo sobre la base del valor acordado para la atmósfera en ese período. Un sistema de validación de este tipo no ofrece, en sí mismo, validación del secuestro permanente o perpetuo, ya que la variable objetivo es el carbono total o el carbono orgánico total, y no una fracción indefinida de carbono de larga vida.

20 Tal como se muestra en la Figura 1, el método para cuantificar carbono en el suelo comprende generalmente los pasos de (i) obtener una distribución espacial del contenido de carbono en la unidad de terreno, (ii) estratificar la unidad de terreno en una pluralidad de estratos basándose, al menos parcialmente, en la distribución espacial de contenido de carbono, (iii) seleccionar una o varias primeras ubicaciones de cada uno de uno o varios de la pluralidad de estratos, (iv) determinar en un primer tiempo el primer contenido de carbono de la muestra asociado con la una o varias primeras ubicaciones y (v) determinar el primer contenido total de carbono en la unidad de terreno basándose, al menos parcialmente, en el primer contenido de carbono de la muestra. Las primeras ubicaciones deben seleccionarse con aleatoriedad, por ejemplo, mediante muestreo al azar u otras técnicas de muestreo con estocasticidad, a fin de evitar prácticas fraudulentas tales como el secuestro deliberado de carbono en ubicaciones conocidas o predeterminadas.

30 Los pasos (i) a (v) precedentes se refieren a la cuantificación del carbono en el suelo en el tiempo t_1 para determinar, por ejemplo, el contenido basal de carbono. Para cuantificar el carbono en el suelo en el tiempo t_2 y, por tanto, determinar las variaciones del carbono en el suelo durante el período entre t_2 y t_1 , el método puede comprender además los pasos de (vi) seleccionar una o varias segundas ubicaciones de cada uno de uno o varios de la pluralidad de estratos, (vii) determinar en un segundo tiempo el segundo contenido de carbono de la muestra asociado con las una o varias segundas ubicaciones y (viii) determinar el segundo contenido total de carbono en la unidad de terreno basándose, al menos parcialmente, en el segundo contenido de carbono de la muestra.

Al igual que las primeras ubicaciones, se pueden seleccionar las segundas ubicaciones con aleatoriedad. Además, se pueden seleccionar independientemente de las primeras ubicaciones (por ejemplo, sin repetir las primeras ubicaciones seleccionadas al azar como segundas ubicaciones), a fin de evitar prácticas fraudulentas.

40 El segundo tiempo puede estar separado del primer tiempo por un período determinado por el contrato de secuestro de carbono, por ejemplo 5 años. También se puede determinar el período de separación basándose en la diferencia mínima detectable asociada con el primer contenido de carbono de la muestra. Por ejemplo, si la varianza o el error estándar del primer contenido de carbono de la muestra son grandes, un período de separación más largo puede ser más sensible, ya que el carbono secuestrado en un período corto puede situarse muy por debajo de la diferencia mínima detectable.

50 La estratificación para la cuantificación del carbono en el suelo en el tiempo t_2 se puede basar en el contenido de carbono cuantificado en t_1 , en vez de en la distribución espacial del contenido de carbono obtenida antes o inmediatamente antes de la cuantificación del carbono en el suelo en el tiempo t_1 . Por tanto, se pueden sustituir los pasos (vi) a (viii) precedentes por los pasos de (vi) reestratificar la unidad de terreno en una pluralidad de estratos reestratificados basándose, al menos parcialmente, en el primer contenido de carbono de la muestra, (vii) seleccionar (con aleatoriedad) una o varias segundas ubicaciones de cada uno de uno o varios de la pluralidad de estratos reestratificados, (viii) determinar en un segundo tiempo el segundo contenido de carbono de la muestra asociado con las una o varias segundas ubicaciones y (vi) determinar el segundo contenido total de carbono en la unidad de terreno basándose, al menos parcialmente, en el segundo contenido de carbono de la muestra.

55 Obtención de una distribución espacial de contenido de carbono

Para construir la estratificación inicial para el tiempo t_1 , se puede obtener la distribución espacial o mapa del carbono en el suelo de la unidad de terreno prediciendo o estimando la distribución espacial basándose, al menos parcialmente, en información asociada con la unidad de terreno. La predicción o estimación se pueden construir

mediante regresión por pasos u otros modelos tales como aproximaciones en red, a partir de entradas tales como:

- atributos de terreno comunes derivados de un DEM (modelo de elevación digital, por sus siglas en inglés);
- radiometría gamma;
- una clasificación específica de uso de la tierra en términos de comportamiento de SOC;
- 5 • diversas capas climáticas, de textura y regolíticas regionales (resolución de 250 - 1.000 m);
- predicciones de SOC regional a gran escala (resolución de 250 - 1.000 m); y
- SOC previo o conocido, o SOC total estudiado en otros lugares.

10 La generación de una predicción de carbono en el suelo para la unidad de terreno pretende incorporar la correlación de todas las variables disponibles con la distribución de carbono en el suelo en una sola variable de estratificación –en este caso la propia función de predicción de carbono en el suelo. El razonamiento primario que subyace a este enfoque es que evita el problemático inconveniente de las divisiones "monotéticas" jerárquicas tradicionales (es decir, cuando cada división se realiza en términos de una única variable, comenzando desde la que presenta correlación más alta a la más baja, lo que lleva rápidamente a estratos excesivos e inconexos).

15 En consecuencia, los autores de la presente invención utilizan una única variable de estratificación: el contenido de carbono predicho por un modelo apropiado que se pueda aplicar a la clase de explotaciones agrícolas para la auditoría del carbono, lo que da como resultado una división "politética". El razonamiento que subyace a este enfoque es que dicho predictor puede capturar todo el conocimiento previo disponible, no solamente acerca de la variación espacial de las variables de entrada, sino también de su relación con el contenido de carbono. Para llevar a cabo este procedimiento se adopta típicamente un modelo de regresión lineal por pasos. Una observación importante en este punto es que se puede cambiar la variable objetivo para la predicción dependiendo de la naturaleza y el alcance de los datos de carbono conocidos disponibles dentro de una ubicación particular, es decir, construiría para densidad total de carbono orgánico, % total de carbono, % total de carbono orgánico, para una diversidad de coordenadas espaciales o máscas.

25 Las variables de entrada típicas disponibles públicamente para las principales regiones agrícolas australianas incluyen el modelo de elevación digital global ASTER Global Digital Elevation Model V001 conjunto de METI y NASA, y sus atributos de terreno derivados (con resolución de 30 m) y el mapa radiométrico Radiometric Map of Australia (con resolución de 100 m); de los cuales están representados ejemplos en la Figura 2A. Además, también pueden ser útiles otras fuentes de información, tales como la estimación del % de SOC de la capa superior del suelo y el subsuelo (Figura 2B) así como capas climáticas del conjunto de datos del sistema de información de recursos del suelo Australian Soil Resource Information System (ASRIS) (con una resolución que varía de 250 a 1.000 m) *dado que se utiliza una amplia gama espacial* de observaciones de carbono para generar el mapa de predicción de carbono.

35 También se ha desarrollado una aproximación a la clasificación del uso de la tierra en términos del comportamiento de SOC, con divisiones de clases de uso de la tierra basadas en una combinación de efectos conocidos de la gestión sobre los niveles de carbono en el suelo y el conocimiento experto. Las divisiones primarias empleadas son: tierras excluidas; tierras irrigadas; plantas anuales de secano; plantas perennes con aportaciones y plantas perennes con aportaciones irregulares. En la Figura 2C se muestra un resumen de las divisiones primarias utilizadas en este sistema, y en la Figura 2D se ofrecen ejemplos de estas divisiones. En la Figura 2E se representa una aplicación espacial de esta clasificación. Una observación importante en este punto es que dentro de las divisiones primarias es posible crear subdivisiones para acoger usos de la tierra tales como sistemas de perennes con dominio arbóreo o con dominio de pastos, o labranza total frente a sistemas anuales de secano sin labranza, de forma que el sistema puede evolucionar a medida que crece la información del uso de la tierra y la complejidad general del sistema. Sin embargo, este proceso solo incrementará la eficacia hasta el punto tras el cual las divisiones se vuelvan demasiado finas y su utilidad como predictor disminuya. En la práctica, este nivel se determina caso por caso y se basa en gran medida en el conocimiento experto.

45 Para construir un mapa de predicción de carbono en el suelo se puede necesitar información de carbono en el suelo previa o conocida, con el fin de dibujar el mapa de la "mejor conjetura" acerca de la distribución del carbono edáfico dentro de la unidad de terreno. En la Figura 2F se ofrece un ejemplo de esta información previa. Después se pueden extraer de cada capa variable las variables relevantes para cada observación de carbono, basándose en la proximidad espacial, con el fin de desarrollar la función de predicción de carbono en el suelo, que se ha realizado en este caso mediante regresión por pasos. Esta función particular de predicción espacial se basa en las relaciones entre un índice de acumulación de agua en el paisaje, el tipo de uso de la tierra y la proporción de uranio a torio dentro del suelo o regolito. Esta relación se utiliza después para predecir la distribución de carbono en el suelo sobre la unidad de terreno, tal como se muestra en la Figura 2G. En este punto resulta importante señalar que dicha función de predicción solo tiene que representar la "mejor predicción disponible" de la distribución espacial de carbono en el suelo a partir de los datos disponibles, ya que el procedimiento consiste en combinar información previa en una sola variable con el fin de establecer una división polítética como base para la estratificación.

Además, las informaciones de entrada precedentes están frecuentemente disponibles con una resolución gruesa. Se prevé que el uso de un proceso de reducción de escala mediante, por ejemplo, funciones mecánicas o empíricas, puede trasladar las entradas o los datos a una resolución más fina y, de este modo, proporcionar una predicción o estimación más finamente cuadrículada o representativa del carbono en el suelo. En una realización, el proceso de reducción de escala utiliza una predicción regional de la distribución de carbono en el suelo (nominalmente con resolución de 250 m) y un algoritmo informático para desagregar las predicciones regionales de carbono utilizando covariables a escala más fina (nominalmente con resolución de 30 m) y conservar al mismo tiempo la estimación de carbono en el suelo hecha a nivel regional sobre el área objetivo. El algoritmo informático emplea iterativamente modelos aditivos generalizados (GAM, por sus siglas en inglés) ponderados para redistribuir la estimación de carbono en el suelo sobre covariables a escala más fina disponibles que tengan cierta relación con la distribución de carbono en el suelo. Un algoritmo iterativo de ajuste y adaptación mediante GAM intenta optimizar la reducción de escala con el fin de garantizar que el valor de la variable objetivo proporcionado para cada celda de la cuadrícula gruesa sea igual a la media de todos los valores de la variable objetivo en la escala fina, en cada celda de la cuadrícula gruesa. Además, se puede suponer que existe un elemento de incertidumbre (precedente de una diversidad de fuentes diferentes) en los datos que se están reduciendo de escala. Para gestionar esta incertidumbre durante el proceso de reducción de escala, se puede dar a la información que sea más precisa mayor peso que a la información que sea menos precisa. El resultado del proceso de reducción de escala puede proporcionar información acerca del carbono en el suelo a una escala más fina, necesaria para el procedimiento de estratificación conforme a esta invención.

5
10
15
20

Estratificación

Se puede utilizar la distribución predicha de carbono orgánico en el suelo para estratificar la unidad de terreno con el fin de, por ejemplo, desarrollar una muestra aleatoria simple estratificada. El propósito de esta estratificación es distribuir la variación conocida de la distribución de carbono en el suelo dentro del diseño de muestreo –un enfoque al que se denomina enfoque de muestreo basado en diseño, por contraposición al enfoque de muestreo basado en modelo. El uso de un enfoque basado en diseño (por contraposición al basado en modelo) para el diseño de muestreo implica que los valores reales se consideran espacialmente fijos y los puntos de muestreo son aleatorios (los enfoques basados en modelo invierten estos supuestos). Esto garantiza que el muestreo repetido (en el tiempo) es independiente, y por lo tanto se puede utilizar como sistema de control, y a la vez proporciona simultáneamente verificación del almacenamiento de SOC a lo largo del tiempo.

25
30
35

Generalmente, el número de estratos se determina o se establece dentro del intervalo de 5 a 7, ya que puede ocurrir que el modelo de predicción de carbono no sea muy preciso (es decir, $R^2 < 0,9$). El número de estratos se puede establecer en función de la diversidad del paisaje, los tipos de uso de la tierra, la superficie total y el nivel de inversión dirigido a reducir la incertidumbre en la determinación del contenido total de carbono o el carbono secuestrado. Cuando el objetivo son fincas grandes (es decir, > 2.000 ha) o se puede acceder a datos previos de mayor calidad, o se dispone de fondos adicionales para aumentar la confianza en las estimaciones, es posible aumentar el número de estratos utilizados.

Una vez que se ha determinado o establecido el número de estratos, se pueden determinar los límites de estrato entre los estratos utilizando la regla de " \sqrt{f} acumulada". Mediante el uso de la distribución espacial predicha del contenido de carbono en el suelo para la unidad de terreno se pueden optimizar los niveles de corte de la estratificación (que determinan después los límites del estrato) para un número dado de estratos aplicando la regla de " \sqrt{f} acumulada". Esta consiste en la función acumulativa de la raíz cuadrada de las frecuencias de presencia de carbono derivadas de la distribución espacial predicha. Se puede dividir nominalmente la distribución espacial en aproximadamente 100 lotes, que luego se dividen por igual en función del número de estratos. Después se convierten de nuevo los límites internos a unidades de carbono originales y se utilizan como puntos de separación del estrato subsiguiente. La estratificación mediante la regla de " \sqrt{f} acumulada" es casi óptima para la asignación de Neyman. La Figura 3 (izquierda) representa un ejemplo de estratificación de una unidad de terreno en seis estratos, basada en la distribución espacial predicha que se muestra en la Figura 2G.

40
45
50
55

En caso necesario, la reestratificación de la unidad de terreno en el tiempo t_2 puede seguir los mismos pasos de estratificación que en lo que antecede. El número de estratos reestratificados se puede determinar o establecer en función del contenido de carbono de la muestra determinado en el tiempo t_1 . Análogamente, los límites del estrato reestratificado se pueden determinar mediante la regla de " \sqrt{f} acumulada" aplicada al contenido de carbono de la muestra determinado en el tiempo t_1 , en vez de la distribución espacial predicha del contenido de carbono. En una realización, después de obtener información de escala local en la ronda de muestreo inicial, se puede añadir la información de escala local a la información que se ha estratificar a través de diversos enfoques, entre ellos el de elegir las covariables correlacionadas localmente más altas, actualizar el modelo regional y/o construir predicciones locales, así como postular tasas de secuestro probables según el uso de la tierra.

Selección de ubicaciones para determinar el contenido de carbono de la muestra

Se puede tomar o seleccionar al azar una muestra (con reemplazo) en, como mínimo, un punto de muestreo y preferiblemente dos puntos de muestreo (es decir, ubicaciones o combinaciones), como mínimo, del interior de cada estrato. También se pueden establecer puntos de muestreo adicionales en calidad de reservas, para decisiones

60

sobre el terreno relacionadas con cuestiones tales como la falta de acceso y ubicaciones inapropiadas, tales como represas, árboles o carreteras, que están por debajo de la resolución práctica de la clasificación de uso de la tierra. El establecimiento de puntos de muestreo de la manera espacialmente más aleatoria posible requiere la creación de una resolución espacial más fina de cada estrato, que más o menos puede ser equivalente a la precisión de posición de los equipos de GPS comúnmente disponibles (es decir, una resolución de 30 m, remuestreada a una resolución de 5 m antes de seleccionar la muestra aleatoria de cada estrato).

Típicamente, los puntos de muestreo se asignan de manera equitativa entre estratos, estando determinado el número mínimo de puntos de muestreo por la necesidad de > 2 muestras compuestas por estrato. Más allá de este nivel, los puntos de muestra adicionales suelen estar determinados por el nivel de inversión disponible, y los niveles óptimos variarán con el paisaje y el uso de la tierra. Por regla general, el número de puntos de muestreo dentro de cada estrato se establecen o define como uno, y preferiblemente dos, más que el número total de estratos. Por ejemplo, se puede seleccionar una muestra de 48 puntos de muestreo para 6 estratos, con 8 puntos de muestreo por estrato.

Una vez decidido el número total de unidades de muestreo y asignado de manera equitativa entre los estratos, se seleccionan mediante muestreo aleatorio los puntos reales de muestreo con reemplazo. Se utiliza ahora como base para seleccionar puntos una cuadrícula regular de coordenadas espaciales con una resolución de 5 m, ya que es comparable al error de las unidades de GPS portátiles corrientes, y a la vez se obtiene un conjunto de datos de tamaño razonable que permite una mayor facilidad de tratamiento (es decir, una cuadrícula con resolución de 1 m contiene 25 veces la información contenida en una cuadrícula con resolución de 5 m). Por ejemplo, la función de predicción para el carbono en el suelo solo puede tener una resolución tan fina como su predictor más fino (en este caso, el modelo de elevación de 30 m).

La Figura 3 (derecha) representa 8 ubicaciones seleccionadas al azar (con reemplazo) dentro de cada estrato. Las muestras de suelo se recogen a la máxima profundidad práctica de muestreo (nominalmente 1 m) dentro de cada estrato. Se anotan el diámetro de la zapata de corte (para determinar el área del testigo), la profundidad de empuje, la longitud del testigo extraído y la profundidad del orificio (después de la extracción) para efectuar correcciones de compresión/expansión si se desea información de densidad de carbono (contrariamente a masa por superficie).

Se pueden combinar físicamente las muestras de suelo de testigo completo dentro de los estratos para reducir los costes del análisis. Si se van a combinar las muestras de suelo, el proceso de agrupamiento se puede realizar dentro de los estratos y producir un mínimo de 2 muestras compuestas, registrándose el peso secado al aire y el volumen individuales antes de mezclarlas, o bien mantenerlas separadas, con el fin de proporcionar información *in situ* para refinar la predicción de SOC y la estratificación en el siguiente proceso de cuantificación de carbono en el suelo. Además, el proceso de agrupamiento, ya sea para un sistema de coordenadas máxicas o para un sistema de coordenadas espaciales, puede requerir que las unidades agrupadas sean nominalmente iguales en espesor de capa o masa. Por ejemplo, se puede formar una muestra compuesta combinando una capa de 20 cm de una muestra de testigo de suelo con una capa de 20 cm de otra muestra de testigo de suelo del mismo estrato. En otro ejemplo, se puede formar una muestra compuesta combinando 200 g de suelo de una muestra de testigo de suelo con 200 g de suelo de otra muestra de testigo de suelo del mismo estrato. Los testigos se pueden emparejar aleatoriamente.

A medida que avanzan las rondas de auditoría, se espera que el agrupamiento de muestras se convierta en la práctica por defecto, debido a las ventajas decrecientes de la reestratificación y los beneficios económicos de un inferior número de análisis. Sin embargo, la reestratificación requiere una cuidadosa consideración de la manera elegida para expresar el resultado (densidad de carbono o masa por unidad de superficie (para una masa estándar) y el registro de las variables individuales requeridas del testigo). Es probable que cambios significativos en el uso de la tierra requieran una reestratificación (mediante el procesamiento de muestras separadas) para reflejar los patrones de paisaje alterados y los ajustes del nuevo sistema antes de volver al agrupamiento de muestras.

Determinación del contenido de carbono de la muestra y total

Se analizan las muestras de suelo (ya sean compuestas, individuales o subindividuales) en cuanto a contenido de carbono de la muestra utilizando metodologías de combustión corrientes para determinar el contenido total de carbono en la unidad de terreno. El contenido de carbono de la muestra se puede determinar utilizando un analizador CNS Vario Max para 53 µm, que puede medir el contenido de carbono por combustión de las muestras de suelo o mediante el análisis por espectroscopía de infrarrojo cercano de las muestras de suelo en el campo. La medición del contenido de carbono puede implicar la corrección relativa al carbono inorgánico, de modo que se pueda determinar el contenido de carbono orgánico. El contenido medido de carbono de la muestra puede expresarse como peso o masa absolutos, en porcentaje o fraccionarios, de carbono, y puede incluir cualquier compuesto de carbono tal como carbono elemental, óxidos de carbono y carbonatos.

Existen dos sistemas de coordenadas para expresar el contenido total de carbono: (1) el sistema de coordenadas máxicas o materiales y (2) el sistema de coordenadas volumétricas o espaciales. El sistema de coordenadas máxicas o materiales expresa el contenido total de carbono en una masa de suelo predeterminada o estándar por

unidad de superficie (por ejemplo, 1.500 kg m⁻² de suelo secado al aire) de la unidad de terreno, mientras que el sistema de coordenadas volumétricas o espaciales expresa el contenido total de carbono en una profundidad de suelo predeterminada o estándar (por ejemplo, 100 cm) por unidad de superficie de la unidad de terreno.

5 El sistema de coordenadas volumétricas o espaciales se considera menos ventajoso debido a la mayor variabilidad introducida por la determinación de la densidad, es decir, es muy improbable muestrear consistentemente a 1 m de profundidad, evitando al mismo tiempo la compactación o la expansión, y asumir una densidad aparente del suelo uniforme en el espacio. Por lo tanto, los cambios en el contenido de carbono en el suelo se pueden atribuir a cualquier cambio de la concentración, pero también, por ejemplo, a una masa muestreada mayor para un volumen dado.

10 Las ventajas del sistema de coordenadas máscas o materiales con respecto a los sistemas de coordenadas volumétricas o espaciales comprenden:

- los efectos estacionales o de gestión sobre la densidad aparente no interfieren con las variaciones en el almacenamiento de SOC, lo que incrementa la precisión de las estimaciones;
- una masa de expresión estándar establecida permite una mayor precisión en la determinación de variaciones en el almacenamiento de SOC entre eventos de auditoría discretos; y
- el seguimiento del SOC es más simple, requiere menos correcciones y, por lo tanto, presenta menos incertidumbres.

20 En el caso de una profundidad de suelo insuficiente para obtener masa de material suficiente para llegar a la masa o profundidad predeterminadas, se puede suponer que cualquier masa/profundidad adicional añadida en el proceso de cálculo no contiene carbono adicional.

Ejemplos de cálculo de contenido total de carbono

Se ofrecen a continuación, a título ilustrativo, ejemplos para el cálculo del contenido total de carbono utilizando los dos sistemas de coordenadas. Además, también se presentan dos subvariantes de cada sistema de coordenadas, constituidas por una muestra, con y sin uso de muestras compuestas.

25 Para estos cálculos ilustrativos se ha utilizado un conjunto de datos reducido. El conjunto de datos reducido consiste en resultados hipotéticos de muestras de suelo de 2 estratos, teniendo cada uno 3 testigos (es decir, ubicaciones o puntos de muestreo seleccionados). Cada testigo se divide en tres capas de suelo y se realizan diversas observaciones (entre ellas la masa y la profundidad de la capa) en cada capa. En la Figura 4 se ofrece un resumen de las variables utilizadas en estos ejemplos. En el Apéndice A se ofrece también una descripción más detallada de la teoría estadística aplicada en estos ejemplos.

Ejemplo 1: Sistema de coordenadas máscas: testigos individuales sin muestras compuestas

Se presenta aquí, para el conjunto de datos de muestra, la aproximación mediante coordenadas máscas o materiales, que utiliza una masa estándar o predeterminada por unidad de superficie de 1.500 kg m⁻² de masa secada en estufa, sin creación de muestras compuestas.

35 La Figura 5A muestra, en una de las ubicaciones seleccionadas (con referencia identificativa del testigo "2i"), el contenido de carbono de la muestra en cada una de las tres capas, así como datos procesados que incluyen la masa acumulada de carbono (C), en función de la masa acumulada de suelo secado en estufa (OD) para un solo testigo, como se describe en las Ecuaciones 1.1 - 1.7.

$$AD_{mass} - G_w = AD_{soil} \quad (1.1)$$

$$AD_{soil} - (AD_{soil} \times \theta) = OD_{soil} \quad (1.2)$$

$$\left(\frac{(OD_{soil} + G_w)}{(\pi \times C_r^2)} \right) \times \frac{10.000}{1.000} = OD_{mass} \quad (1.3)$$

$$\left(\frac{OD_{soil}}{(\pi \times C_r^2)} \right) \times \frac{10.000}{1.000} = OD_{soil} \quad (1.4)$$

$$\left(\frac{OD_{soil}}{100} \right) \times C\% = C_{mass} \quad (1.5)$$

$$\sum_{l=1}^i OD_{mass_l} = OD_{mass_i} \quad (1.6)$$

$$\sum_{l=1}^i C_{mass_l} = C_{mass_i} \quad (1.7)$$

La Figura 5B representa una interpolación por ajuste lineal para obtener la masa de C a partir de la masa predeterminada o estándar por unidad de superficie como se describe en la Ecuación 1.8. En esta etapa también se pueden utilizar aproximaciones tales como el ajuste por interpolación segmentaria, pero ello requiere un mínimo de 3 observaciones con masa. En este ejemplo se determina que el contenido de carbono de la muestra es 9,42 kg m⁻².

$$OD_{STmass} = OD_{mass1} + (C_{STmass} - C_{mass1}) \frac{(OD_{mass2} - OD_{mass1})}{(C_{mass2} - C_{mass1})} \quad (1.8)$$

En algunos casos en donde se recupera una masa de suelo insuficiente, se prefiere no utilizar un método de extrapolación, sino tomar la máxima cantidad de C obtenida y asumir que cualquier toda la masa adicional hasta llegar al estándar no contiene carbono adicional.

Las Ecuaciones 1.9 a 1.13 y la Figura 5C ilustran la determinación del contenido de carbono medio o promedio de la muestra, su varianza y error estándar (normalizado a la masa predeterminada o estándar) en las tres ubicaciones seleccionadas en cada estrato (referencias identificativas de testigo 1e, 1f y 1g en el Estrato 1 y referencias identificativas de testigo 2k, 2a y 2i en el Estrato 2).

$$\left(\frac{1}{(v \times n)} \right) \times \left(\sum_{k=1}^m C_{STmass_k} \right) = C_{St} \quad (1.9)$$

$$\left(\frac{1}{(n-1)nv^2} \right) \times \left\{ \sum_{k=1}^m \frac{C_{STmass_k}^2}{n_k} - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^m C_{STmass_k} \right)^2 \right\} = V(C_{St}) \quad (1.10)$$

$$\sqrt{V(C_{St})} = S(C_{St}) \quad (1.11)$$

$$\frac{(C_{St} \times St_a)}{1.000} = C_{content} \quad (1.12)$$

$$V(C_{St}) \times St_a^2 = V(C_{content}) \quad (1.13)$$

Las Ecuaciones 1.15 a 1.20 y la Figura 5D ilustran cómo determinar la combinación del contenido de carbono de la muestra, de todos los estratos, para determinar el contenido total de carbono (incluyendo la media, la varianza, el error estándar, los intervalos de confianza, por ejemplo un intervalo de confianza de 95%, y la diferencia mínima detectable) en la unidad de terreno.

5

$$\sum_{i=1}^{St} C_{content_i} = FC_{content} \quad (1.14)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{St} V(C_{content}_i)}{1\,000.000} = V(FC_{content}) \quad (1.15)$$

$$\sqrt{V(FC_{content})} = S(FC_{content}) \quad (1.16)$$

$$FC_{content} \pm t_{0,95} \sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (1.17)$$

$$\sqrt{2} \times \left(\frac{\pm 95\% C.I.}{\left(\frac{FC_{content}}{100} \right)} \right) = mdd \Delta \% FC_{content} \quad (1.18)$$

$$\left(\frac{FC_{content}}{100} \right) \times \Delta \% FC_{content} = mdd \Delta FC_{content} \quad (1.19)$$

$$\frac{\left(\frac{mdd \Delta FC_{content}}{1.000} \right)}{\left(\sum_{i=1}^k St_{a_i} \right)} = mdd \Delta FC_{storage} \quad (1.20)$$

Las Ecuaciones 1.21 a 1.24 definen la variación en el contenido total de carbono (incluido el promedio, la varianza, el error estándar, los intervalos de confianza, por ejemplo un intervalo de confianza de 95%) entre el tiempo t_1 y el tiempo t_2 .

$$FC_{content_{t_1}} - FC_{content_{t_2}} = \Delta FC_{storage} \quad (1.21)$$

$$V(FC_{content_{t_1}}) + V(FC_{content_{t_2}}) - 2\rho\sqrt{V(FC_{content_{t_1}})}\sqrt{V(FC_{content_{t_2}})} = V(\Delta FC_{storage}) \quad (1.22)$$

$$\sqrt{V(\Delta FC_{storage})} = S(\Delta FC_{storage}) \quad (1.23)$$

$$FC_{content} \pm t_{0,95}\sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (1.24)$$

5 *Ejemplo 2: Sistema de coordenadas másicas –con muestras compuestas*

Se presenta aquí, para el conjunto de datos de muestra, el enfoque de coordenadas másicas o materiales, utilizando una masa predeterminada o estándar de 1500 kg m⁻² de masa secada en estufa, con creación de muestras compuestas. En este método, la creación de muestras compuestas requiere combinar cantidades iguales de masa de suelo OD por capa. Para este enfoque se requiere una aleatorización adecuada de las capas (o núcleos) que se combinan, ya que las estimaciones del contenido medio total de carbono y su varianza (en particular) pueden ser manipuladas, ya sea deliberadamente o mediante preferencias no intencionadas (es decir, por combinar testigos de textura o color similares). Esto se puede apreciar si se comparan los resultados resumidos en la Figura 5D y la Figura 6C.

La Figura 6A muestra el contenido de carbono de la muestra de una muestra compuesta de dos testigos (con referencias identificativas de testigo "2a" y "2i") de cada una de las tres capas, así como datos procesados que incluyen la masa acumulada de carbono (C), en función de la masa acumulada de suelo secado en estufa (OD), para una muestra compuesta de dos testigos, y se describe en las Ecuaciones 2.1 - 2.7.

$$AD_{mass} - G_w = AD_{soil} \quad (2.1)$$

$$AD_{soil} - (AD_{soil} \times \theta) = OD_{soil} \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{(OD_{soil} + G_w)}{(\pi \times C_r^2) \times v} \right) \times \frac{10.000}{1.000} = OD_{mass} \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{OD_{soil}}{(\pi \times C_r^2)} \right) \times \frac{10.000}{1.000} = OD_{soil} \quad (2.4)$$

$$\left(\frac{OD_{soil}}{100} \right) \times C\% = C_{mass} \quad (2.5)$$

$$\sum_{i=1}^i OD_{mass_i} = OD_{mass_i} \quad (2.6)$$

$$\sum_{i=1}^i C_{mass_i} = C_{mass_i} \quad (2.7)$$

La Figura 6B y la Ecuación 2.8 ilustran una interpolación por ajuste lineal para obtener la masa C frente a la masa estándar. También se pueden utilizar en esta etapa enfoques tales como el ajuste por interpolación segmentaria, pero ello requiere un mínimo de 3 observaciones con masa. En los casos en que se recupera una masa de suelo insuficiente, se prefiere no utilizar un método de extrapolación, sino tomar la cantidad máxima de C obtenida y asumir que toda masa adicional hasta llegar el estándar no contiene carbono adicional. En este ejemplo se determina que el contenido de carbono de la muestra de la muestra compuesta es 10,22 kg m⁻².

5

$$OD_{STmass} = OD_{mass1} + (C_{STmass} - C_{mass1}) \frac{(OD_{mass2} - OD_{mass1})}{(C_{mass2} - C_{mass1})} \quad (2.8)$$

Las Ecuaciones 2.9 a 2.13 y la Figura 6C ilustran la determinación del contenido medio de carbono, la varianza y el error estándar (para la masa predeterminada o estándar) en las tres ubicaciones seleccionadas de cada estrato (referencias identificativas de testigo 1e, 1f y 1g en el Estrato 1 y referencias identificativas de testigo 2k, 2a y 2i en el Estrato 2).

10

$$C_{STmass} \times k = C_{STmass_k} \quad (2.9)$$

$$\left(\frac{1}{(nv)} \right) \times \left(\sum_{k=1}^m C_{STmass_k} \right) = C_{St} \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{1}{(m-1)nv^2} \right) \times \left\{ \sum_{k=1}^m \frac{C_{STmass_k}^2}{n_k} - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^m C_{STmass_k} \right)^2 \right\} = V(C_{St}) \quad (2.11)$$

$$\sqrt{V(C_{St})} = S(C_{St}) \quad (2.12)$$

$$\frac{(C_{St} \times St_a)}{1.000} = C_{content} \quad (2.13)$$

$$V(C_{St}) \times St_a^2 = V(C_{content}) \quad (2.14)$$

Las Ecuaciones 2.15 a 2.21 y la Figura 6D ilustran el proceso de combinar el contenido de carbono de la muestra para obtener el contenido de carbono total (incluyendo la varianza, el error estándar, un intervalo de confianza, por ejemplo un intervalo de confianza de 95%) en la unidad de terreno.

15

$$\sum_{i=1}^{St} C_{content\ i} = FC_{content} \quad (2.15)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{St} V(C_{content\ i})}{1.000.000} = V(FC_{content}) \quad (2.16)$$

$$\sqrt{V(FC_{content})} = S(FC_{content}) \quad (2.17)$$

$$FC_{content} \pm t_{0,95} \sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (2.18)$$

$$\sqrt{2} \times \left(\frac{\pm 95\% C.I.}{\left(\frac{FC_{content}}{100} \right)} \right) = \Delta\% FC_{content} \quad (2.19)$$

$$\left(\frac{FC_{content}}{100} \right) \times \Delta\% FC_{content} = \Delta FC_{content} \quad (2.20)$$

$$\frac{\left(\frac{mdd \Delta FC_{content}}{1.000} \right)}{\left(\sum_{i=1}^k St_{a_i} \right)} = mdd \Delta FC_{storage} \quad (2.21)$$

5 Las Ecuaciones 2.22 a 2.25 definen la variación del contenido total de carbono (incluyendo el promedio, la varianza, el error estándar, los intervalos de confianza, por ejemplo un intervalo de confianza de 95%) entre el tiempo t_1 y el tiempo t_2 .

$$FC_{content\ t_1} - FC_{content\ t_2} = \Delta FC_{storage} \quad (2.22)$$

$$V(FC_{content\ t_1}) + V(FC_{content\ t_2}) - 2\rho \sqrt{V(FC_{content\ t_1})} \sqrt{V(FC_{content\ t_2})} = V(\Delta FC_{storage}) \quad (2.23)$$

$$\sqrt{V(\Delta FC_{storage})} = S(\Delta FC_{storage}) \quad (2.24)$$

$$FC_{content} \pm t_{0,95} \sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (2.25)$$

Ejemplo 3: enfoque de coordenadas espaciales: núcleos individuales sin muestras compuestas

Se presenta aquí, para el conjunto de datos de muestra, el enfoque de coordenadas volumétricas o espaciales, utilizando una profundidad de suelo estándar o predeterminada de 100 cm, sin creación de muestras compuestas,.

La Figura 7A muestra el contenido de carbono de la muestra en una de las ubicaciones seleccionadas (con referencia identificativa de testigo "2i") de cada una de las tres capas, así como datos procesados que incluyen la densidad acumulada de carbono (C) en función de la profundidad, para un solo testigo, que se describe en las Ecuaciones 3.1 - 3.9.

$$AD_{mass} - G_w = AD_{soil} \quad (3.1)$$

$$AD_{soil} - (AD_{soil} \times \theta) = OD_{soil} \quad (3.2)$$

$$(\pi \times C_r^2) \times L_l = L_v \quad (3.3)$$

$$\frac{G_w}{2.65} = G_v \quad (3.4)$$

$$L_v - G_v = SP_v \quad (3.5)$$

$$\frac{OD_{soil}}{SP_v} = SP_{BD} \quad (3.6)$$

$$\left(\frac{C\%}{100} \right) \times SP_{BD} = C_{dens} \quad (3.7)$$

5

$$\left(\frac{(C_{dens} \times 10000)}{1000} \right) \times L_l = C_{dens_i} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^l C_{dens_i} = C_{dens_i} \quad (3.9)$$

La Figura 7B representa una aproximación por ajuste lineal a la interpolación para obtener la densidad de C a la profundidad predeterminada o estándar, tal como se describe en la Ecuación 3.10. También se pueden utilizar en esta etapa enfoques tales como el ajuste por interpolación segmentaria, pero ello requiere un mínimo de 3 observaciones por profundidad. En los casos donde no se ha obtenido una profundidad suficiente, se prefiere no utilizar un método de extrapolación, sino tomar la densidad C máxima obtenida y suponer que cualquier profundidad adicional hasta llegar a la profundidad estándar no contiene carbono adicional.

10

$$L_{ST} = L_{l1} + (C_{STdens} - C_{dens1}) \frac{(L_{l2} - L_{l1})}{(C_{dens2} - C_{dens1})} \quad (3.10)$$

Las Ecuaciones 3.11 a 3.15 y la Figura 7C ilustran la determinación del contenido medio de carbono, la varianza y el error estándar (a la profundidad estándar) en las tres ubicaciones seleccionadas en cada estrato (referencias identificativas de testigo 1e, 1f y 1g en el Estrato 1 y referencias identificativas de testigo 2k, 2a y 2i en el Estrato 2).

15

$$\left(\frac{1}{(v \times n)}\right) \times \left(\sum_{k=1}^m C_{STdens_k}\right) = C_{St} \quad (3.11)$$

$$\left(\frac{1}{(n-1)nv^2}\right) \times \left\{ \sum_{k=1}^m \frac{C_{STdens_k}^2}{n_k} - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^m C_{STdens_k}\right)^2 \right\} = V(C_{St}) \quad (3.12)$$

$$\sqrt{V(C_{St})} = S(C_{St}) \quad (3.13)$$

$$\frac{(C_{St} \times St_a)}{1.000} = C_{content} \quad (3.14)$$

$$V(C_{St}) \times St_a^2 = V(C_{content}) \quad (3.15)$$

Las Ecuaciones 3.16 a 3.22 y la Figura 7D ilustran la combinación del contenido de carbono de la muestra de todos los estratos para determinar el contenido total de carbono (incluyendo la media, varianza, error estándar, intervalos de confianza, por ejemplo un intervalo de confianza de 95%, y diferencia mínima detectable) en la unidad de terreno.

5

$$\sum_{i=1}^{St} C_{content_i} = FC_{content} \quad (3.16)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{St} V(C_{content}_i)}{1.000.000} = V(FC_{content}) \quad (3.17)$$

$$\sqrt{V(FC_{content})} = S(FC_{content}) \quad (3.18)$$

$$FC_{content} \pm t_{0,95} \sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (3.19)$$

$$\sqrt{2} \times \left(\frac{\pm 95\% C.I.}{\left(\frac{FC_{content}}{100} \right)} \right) = \Delta\% FC_{content} \quad (3.20)$$

$$\left(\frac{FC_{content}}{100} \right) \times \Delta\% FC_{content} = \Delta FC_{content} \quad (3.21)$$

$$\frac{\left(\frac{mdd \Delta FC_{content}}{1.000} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{St} St_{a_i} \right)} = mdd \Delta FC_{storage} \quad (3.22)$$

Las Ecuaciones 3.23 a 3.26 definen la variación en el contenido total de carbono (incluyendo la media, varianza, error estándar, intervalos de confianza, por ejemplo un intervalo de confianza de 95%) entre el tiempo t_1 y el tiempo t_2 .

$$FC_{content_{t_1}} - FC_{content_{t_2}} = \Delta FC_{storage} \quad (3.23)$$

$$V(FC_{content_{t_1}}) + V(FC_{content_{t_2}}) - 2\rho \sqrt{V(FC_{content_{t_1}})} \sqrt{V(FC_{content_{t_2}})} = V(\Delta FC_{storage}) \quad (3.24)$$

$$\sqrt{V(\Delta FC_{storage})} = S(\Delta FC_{storage}) \quad (3.25)$$

$$FC_{content} \pm t_{0,95} \sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (3.26)$$

5

Ejemplo 4: Aproximación mediante coordenadas espaciales –con muestras compuestas

Se presenta aquí, para el conjunto de datos de muestra, la aproximación por coordenadas volumétricas o espaciales, utilizando una profundidad predeterminada o estándar de 100 cm, con creación de muestras compuestas.

- 10 La Figura 8A muestra el contenido de carbono de la muestra de una muestra compuesta de dos testigos (con referencias identificativas del testigo "2a" y "2i"), así como datos procesados que incluyen la densidad de carbono (C) acumulada en función de la profundidad para una muestra compuesta de dos testigos, que se describe en las Ecuaciones 4.1 a 4.8.

$$AD_{mass} - G_w = AD_{soil} \quad (4.1)$$

$$AD_{soil} - (AD_{soil} \times \theta) = OD_{soil} \quad (4.2)$$

$$(\pi \times C_r^2) \times k \times L_l = L_v \quad (4.3)$$

$$\frac{G_w}{2,65} = G_v \quad (4.4)$$

$$L_v - G_v = SP_v \quad (4.5)$$

$$\frac{OD_{soil}}{SP_v} = SP_{BD} \quad (4.6)$$

$$\left(\frac{C\%}{100}\right) \times SP_{BD} = C_{dens} \quad (4.7)$$

$$\left(\frac{(C_{dens} \times 10.000)}{1.000}\right) \times L_t = C_{dens_i} \quad (4.8)$$

La Ecuación 4.9 describe un ajuste o interpolación lineal para obtener la densidad C a la profundidad estándar:

$$\left(\frac{C_{dens_i}}{L_t}\right) \times 100 = C_{STdens} \quad (4.9)$$

- 5 Las Ecuaciones 4.10 a 4.14 y la Figura 8B ilustran la determinación del contenido medio de carbono, la varianza y el error estándar (a la profundidad predeterminada o estándar) en las tres ubicaciones seleccionadas de cada estrato (referencias identificativas de testigo 1e, 1f y 1g en el Estrato 1 y referencias identificativas de testigo 2k, 2a y 2i en el Estrato 2).

$$\left(\frac{1}{(v \times n)}\right) \times \left(\sum_{k=1}^m C_{STdens_k}\right) = C_{St} \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{1}{(n-1)nv^2}\right) \times \left\{ \sum_{k=1}^m \frac{C_{STdens_k}^2}{n_k} - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^m C_{STdens_k}\right)^2 \right\} = V(C_{St}) \quad (4.11)$$

$$\sqrt{V(C_{St})} = S(C_{St}) \quad (4.12)$$

$$\frac{(C_{St} \times St_a)}{1.000} = C_{content} \quad (4.13)$$

$$V(C_{St}) \times St_a^2 = V(C_{content}) \quad (4.14)$$

- 10 Las Ecuaciones 4.15 a 4.21 y la Figura 8C ilustran el proceso de combinar el contenido de carbono de la muestra para obtener el contenido total de carbono (incluyendo varianza, error estándar, un intervalo de confianza tal como un intervalo de confianza de 95% y una diferencia detectable mínima) en la unidad de terreno.

$$\sum_{i=1}^{St} C_{content_i} = FC_{content} \quad (4.15)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{St} V(C_{content}_i)}{1.000.000} = V(FC_{content}) \quad (4.16)$$

$$\sqrt{V(FC_{content})} = S(FC_{content}) \quad (4.17)$$

$$FC_{content} \pm t_{0,95} \sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (4.18)$$

$$\sqrt{2} \times \left(\frac{\pm 95\% C.I.}{\left(\frac{FC_{content}}{100} \right)} \right) = \Delta\% FC_{content} \quad (4.19)$$

$$\left(\frac{FC_{content}}{100} \right) \times \Delta\% FC_{content} = \Delta FC_{content} \quad (4.20)$$

$$\frac{\left(\frac{mdd \Delta FC_{content}}{1.000} \right)}{\left(\sum_{i=1}^k St_{a_i} \right)} = mdd \Delta FC_{storage} \quad (4.21)$$

Las Ecuaciones 4.22 a 4.25 definen la variación en el contenido total de carbono (incluyendo la media, varianza, error estándar, intervalos de confianza, por ejemplo un intervalo de confianza de 95%, y diferencia mínima detectable) entre el tiempo t_1 y el tiempo t_2 .

$$FC_{content_{t_1}} - FC_{content_{t_2}} = \Delta FC_{storage} \quad (4.22)$$

$$V(FC_{content_{t_1}}) + V(FC_{content_{t_2}}) - 2\rho \sqrt{V(FC_{content_{t_1}})} \sqrt{V(FC_{content_{t_2}})} = V(\Delta FC_{storage}) \quad (4.23)$$

$$\sqrt{V(\Delta FC_{storage})} = S(\Delta FC_{storage}) \quad (4.24)$$

5

$$FC_{content} \pm t_{0,95} \sqrt{V(FC_{content})} = \pm 95\% C.I. \quad (4.25)$$

Habiendo descrito varias realizaciones del método según la presente invención, debería ser evidente que la invención tiene las siguientes ventajas:

- Los "engaños al sistema", por ejemplo la manipulación de los resultados de la cuantificación del carbono en el suelo mediante, por ejemplo, el secuestro deliberado de carbono en ubicaciones de muestreo conocidas, se evitan al elegir puntos de muestreo de manera aleatoria.

10

- Se puede determinar un intervalo de confianza (u otras medidas estadísticas tales como la varianza) del carbono en el suelo, de manera que se puede especificar la incertidumbre en los resultados de la cuantificación del carbono en el suelo.
 - Cuando se expresa el carbono en el suelo utilizando el sistema de coordenadas másicas (es decir, se utiliza una masa de suelo predeterminada o estándar por unidad de superficie), la compactación del suelo no afecta a los resultados de cuantificación de carbono en el suelo.
 - El método no obstaculiza, ni prohíbe o penaliza los cambios en el uso de la tierra; no obstaculiza reducciones "reales" en las emisiones de carbono fósil (debido a la acreditación temporal de COS).
 - El método reduce el riesgo para el propietario de la tierra en caso de mantener el secuestro por períodos indefinidos.
 - El método proporciona un flujo de ingresos continuo (y validado) para los propietarios de tierras, lo que aumenta la probabilidad de perpetuación del SOC.
 - La verificación de un contrato de captura de carbono para carbono secuestrado se puede verificar durante el período de tiempo durante el cual se lleva a cabo la auditoría.
- Los expertos en la técnica apreciarán que se pueden realizar numerosas variaciones y/o modificaciones en la invención tal como se muestra en las realizaciones específicas sin alejarse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones. Por ejemplo, el contenido total de carbono puede expresarse o normalizarse para una masa de suelo o profundidad distinta de 1.500 kg m⁻² o 100 cm. Por lo tanto, las presentes realizaciones deben considerarse a todos los efectos como ilustrativas y no restrictivas.

20 Apéndice A: Teoría

La estimación del almacenamiento de SOC y las incertidumbres se deducen utilizando la regresión de mínimos cuadrados ponderados, de la siguiente manera. Suponemos que se han extraído n testigos del estrato, que se han utilizado para preparar m muestras compuestas ($m > 1$). Sea n_k la cantidad de testigos en la muestra compuesta k , que suman un volumen de x_k m³, con un contenido medido de carbono de c_k kg. El volumen de una muestra compuesta es igual al número de testigos de la misma multiplicado por el volumen del testigo estándar (v): $x_k = n_k \cdot v$.

La densidad media de carbono del estrato j se estima por regresión de mínimos cuadrados ponderados, con la ecuación: $\mathbf{c} = \mathbf{X} \cdot \beta + \mathbf{e}$, donde

- $\mathbf{c} = [c_1 \dots c_k \dots c_m]'$: el vector de contenido de carbono,
- $\mathbf{X} = [x_1 \dots x_k \dots x_m]'$: la matriz de diseño $m \times 1$ con volúmenes compuestos,
- β : la densidad media de carbono del estrato,
- \mathbf{e} : el vector de errores aleatorios.

La estimación por ajuste de mínimos cuadrados ponderados de β : $\hat{\beta} = (\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{c}$ en donde \mathbf{V}^{-1} es la matriz diagonal de pesos, con $1/n_1, \dots, 1/n_m$ en la diagonal, ya que la varianza muestral del contenido de carbono de una muestra compuesta es proporcional al número de testigos.

La fórmula se puede simplificar usando

$$\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1} = [1 \dots 1]v$$

$$\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X} = nv^2$$

$$\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{c} = v \sum_{k=1}^m c_k$$

lo que lleva a:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{nv} \sum_{k=1}^m c_k ,$$

$$\hat{\beta} = \frac{1}{nv} \sum_{k=1}^m c_k,$$

es decir, el contenido total de carbono dividido por el volumen total de los materiales compuestos.

La varianza de $\hat{\beta}$ es más complicada. Se puede estimar mediante:

$$\hat{V}(\hat{\beta}) = \frac{1}{m-1} \cdot \mathbf{c}'\mathbf{V}^{-1} \{ \mathbf{I} - \mathbf{X}(\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1} \} \mathbf{c}(\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X})^{-1}$$

5 que se simplifica a:

$$\hat{V}(\hat{\beta}) = \frac{1}{(m-1)nv^2} \cdot \left\{ \sum_{k=1}^m \frac{c_k^2}{n_k} - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^m c_k \right)^2 \right\}$$

Las estimaciones de varianza así obtenidas para cada uno de los estratos pueden ser introducidas en

$$\hat{V}(SOC_{farm}) = \sum_{h=1}^H a_h^2 \hat{V}(\hat{\beta}_h)$$

Donde SOC_{farm} es el almacenamiento total de SOC en la explotación agrícola, H es el número de estratos, $10a_h^2$

es el área relativa, elevada al cuadrado, de cada estrato.

El error estándar de la media estimada:

$$\hat{S}(SOC_{farm}) = \sqrt{\hat{V}(SOC_{farm})}$$

Intervalos de confianza para el almacenamiento de SOC:

$$SOC_{farm} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sqrt{\hat{V}(SOC_{farm})}$$

15

Ejemplo numérico simple para 2 muestras compuestas y 1 estrato, utilizando un enfoque volumétrico

Dados los datos de la muestra:

$$n = 3$$

$$v = 0,01 \text{ m}^3$$

20

$$m = 2$$

$$\mathbf{V} = [1, 2]'$$

$$\mathbf{X} = [0,01, 0,02]' \text{ m}^3$$

$$\mathbf{c} = [0,2, 0,5]' \text{ kg}$$

Estimaciones:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{3 \times 0,01} (0,2 + 0,5) = 23,33 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$V(\hat{\beta}) = \frac{1}{2 \times 3 \times 0,01^2} \left\{ \frac{0,2^2}{1} + \frac{0,5^2}{2} - \frac{1}{3} (0,2 + 0,5)^2 \right\} = 2,77 \text{ kg}^2.\text{m}^{-6}$$

$$S(\hat{\beta}) = \sqrt{V(\hat{\beta})} = 1,66 \text{ kg.m}^{-3}$$

Almacenamiento de SOC a través del tiempo

- 5 Tras la auditoría de referencia inicial, las auditorías de seguimiento se realizan a intervalos específicos (aproximadamente en el mismo momento dentro del ciclo anual) y sirven para vigilar los cambios en el almacenamiento de SOC. Cada auditoría sucesiva puede utilizar la estratificación precedente o una estratificación construida desde el principio, puede variar el número de estratos y unidades de muestra de cada uno, siempre que cada extracción de muestra sea aleatoria dentro de cada estrato y se cumplan los requisitos mínimos de la metodología. El hecho de tomar muestras de distintos puntos entre el tiempo 1 y el tiempo 2 permite que el muestreo sea independiente y también reduce la probabilidad de “jugar” con el sistema, una debilidad importante de los puntos de muestreo estáticos.
- 10

Una medida ponderada en el tiempo de almacenamiento de SOC:

$$SOC_{sequestered} = \frac{SOC_{farm}^{t_2} - SOC_{farm}^{t_1}}{t_2 - t_1}$$

Varianza entre el tiempo 1 y el tiempo 2 dado un muestreo independiente:

$$15 \quad V(SOC_{farm}^{t_2}) + V(SOC_{farm}^{t_1}) = V(SOC_{sequestered})$$

- Además, dado que el muestreo es independiente, se puede suponer que la varianza del tiempo 1 debe ser igual a la del tiempo 2, lo que permite estimar la diferencia mínima detectable en SOC respecto al tiempo 1, que se puede utilizar para expresar un intervalo de intervalo adecuado entre los momentos de control (es decir, si la estimación en el tiempo 1 tiene una gran varianza, entonces la diferencia mínima detectable de SOC también será grande, lo que implica que sería más rentable un período más largo entre los momentos de control).
- 20

REIVINDICACIONES

1. Un método para cuantificar carbono en el suelo en una unidad de terreno, comprendiendo el método los pasos de:
 obtener una distribución espacial estimada del contenido de carbono en la unidad de terreno que incluye
 5 i) correlacionar información asociada con la unidad de terreno con distribución de carbono en el suelo, y
 ii) introducir la información correlacionada en un modelo de predicción para predecir la distribución espacial estimada
 de contenido de carbono;
- estratificar la unidad de terreno en una pluralidad de estratos basándose, al menos parcialmente, en la distribución
 espacial estimada del contenido de carbono;
- 10 seleccionar una o varias ubicaciones de cada uno de uno o varios de la pluralidad de estratos, seleccionándose las
 una o varias ubicaciones mediante muestreo aleatorio;
- determinar el contenido de carbono de la muestra en las una o varias ubicaciones muestreadas al azar; y
- determinar el contenido total de carbono en la unidad de terreno basándose, al menos parcialmente, en el contenido
 de carbono de la muestra.
- 15 2. Un método según la reivindicación 1, en donde el paso de obtener una distribución espacial estimada del
 contenido de carbono incluye el paso de obtener una predicción regional de la distribución espacial del contenido de
 carbono.
3. Un método según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que comprende además el paso de reducir de escala la
 información asociada a la unidad de terreno.
- 20 4. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el paso de determinar el
 contenido de carbono de la muestra incluye el paso de medir el contenido de carbono de la muestra como contenido
 medido de carbono de la muestra.
5. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el paso de determinar el
 contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra en una o
 varias capas de masa medida de suelo en una zona determinada de la unidad de terreno.
- 25 6. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el paso de determinar el
 contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido de carbono combinado de dos o más
 de dichas ubicaciones.
7. Un método según la reivindicación 6, en donde el paso de determinar el contenido de carbono combinado de dos
 o más de dichas ubicaciones incluye el paso de combinar dos o más capas respectivas de igual masa de suelo de
 30 las dos o más de dichas ubicaciones.
8. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el paso de determinar el
 contenido de carbono de la muestra incluye el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra en peso o
 masa absoluto, en porcentaje o fraccionario, de carbono.
- 35 9. Un método según la reivindicación 5, en donde el paso de determinar el contenido de carbono de la muestra
 incluye el paso de determinar uno cualquiera o varios del diámetro de la zapata de corte, la profundidad de empuje,
 la longitud del testigo extraído y la profundidad del orificio, asociados con la masa medida de suelo.
10. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el paso de determinar el
 contenido total de carbono incluye el paso de determinar el contenido total de carbono en una masa predeterminada
 de suelo por unidad de superficie de la unidad de terreno.
- 40 11. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además el paso de
 determinar una cantidad de carbono secuestrado en la unidad de terreno entre una primera vez y una segunda vez
 en la que se determinan un respectivo primer contenido total de carbono y un segundo contenido total de carbono.
12. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el número de estratos está en el
 intervalo de cinco a siete.
- 45 13. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el paso de estratificar la unidad
 de terreno en una pluralidad de estratos incluye el paso de determinar uno o varios límites de estrato entre un
 número establecido de estratos.
14. Un método según la reivindicación 13, en donde el paso de determinar los uno o varios límites de estrato incluye
 el paso de determinar los uno o varios límites de estrato basándose, al menos parcialmente, en la distribución
 50 espacial estimada del contenido de carbono.

15. Un método según la reivindicación 13 o la reivindicación 14, en donde el paso de determinar uno o varios límites de estrato incluye el paso de determinar uno o varios límites óptimos de estrato con asignación de Neyman.

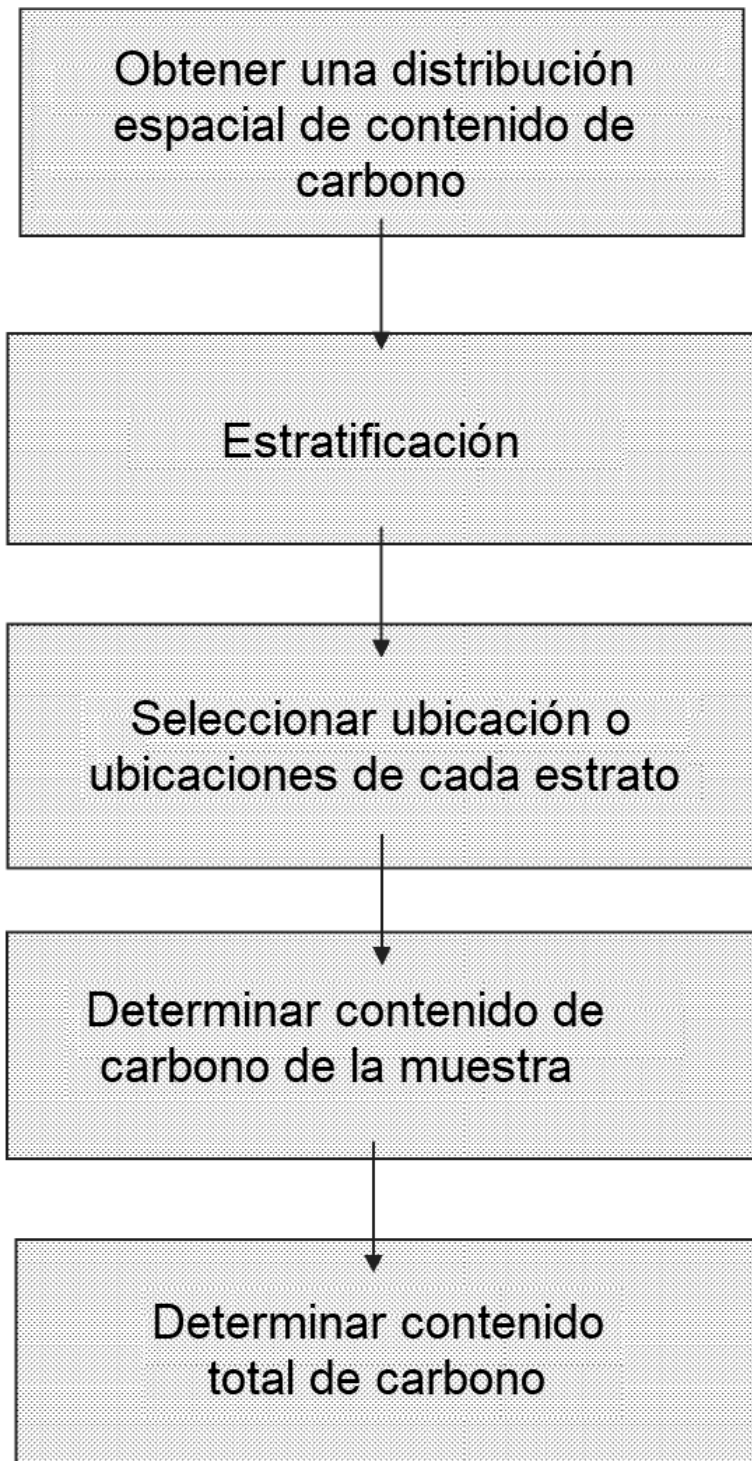


Fig. 1

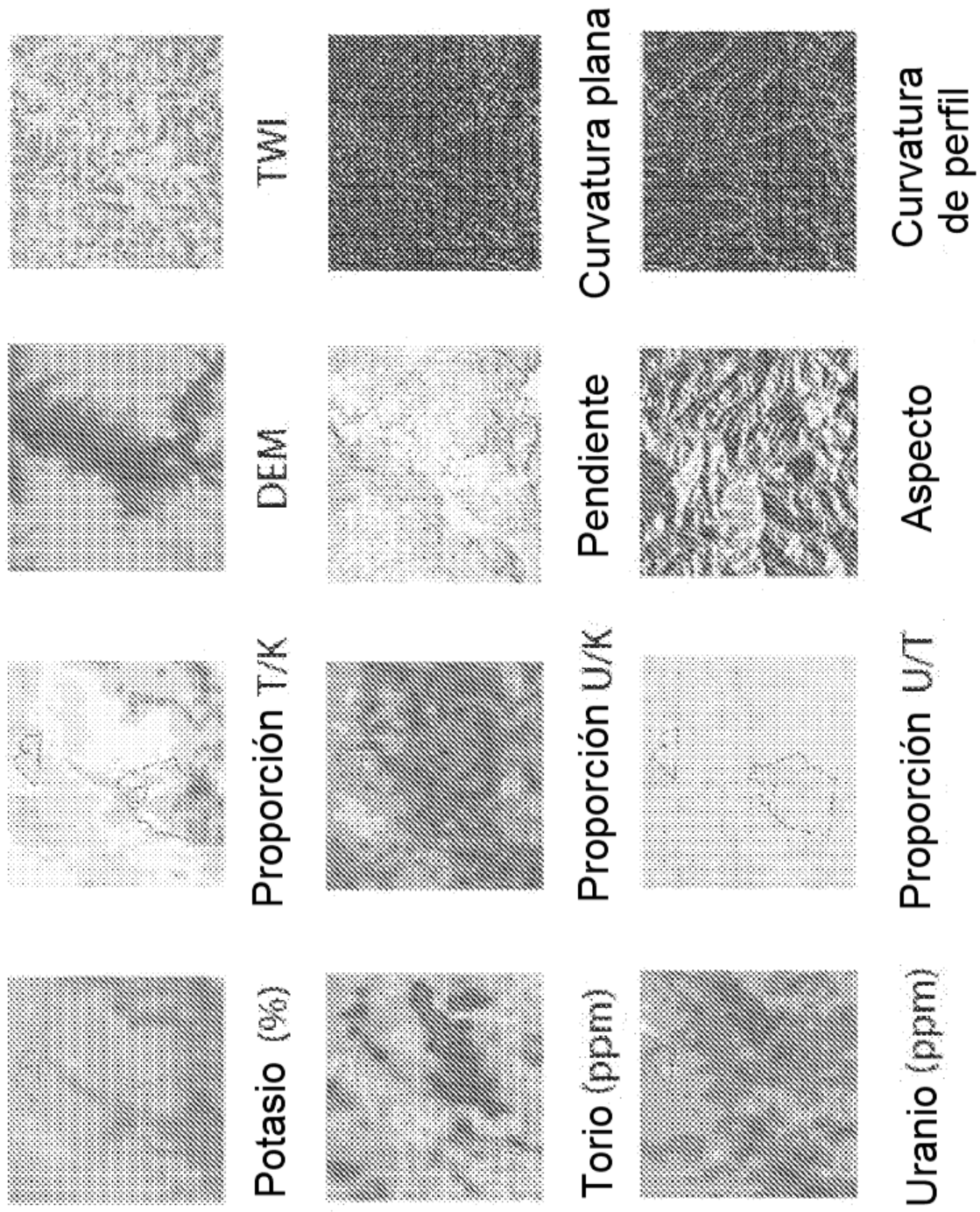


Figura 2A

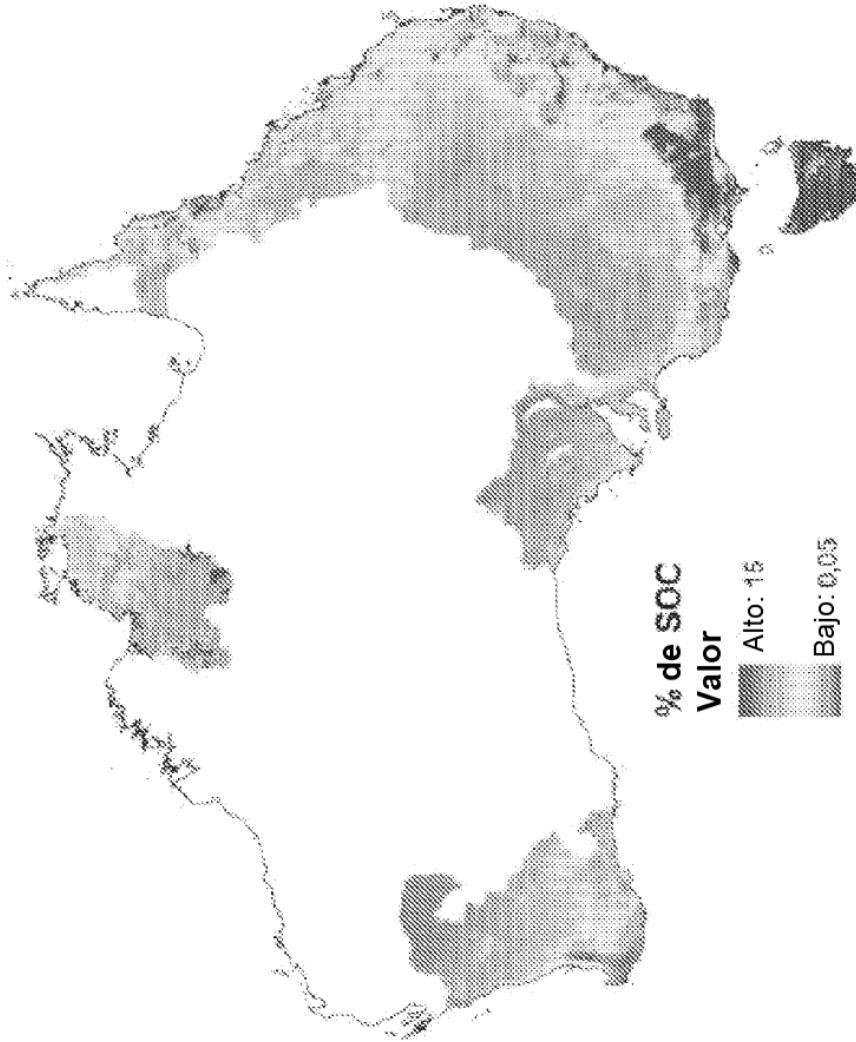


Figura 2B

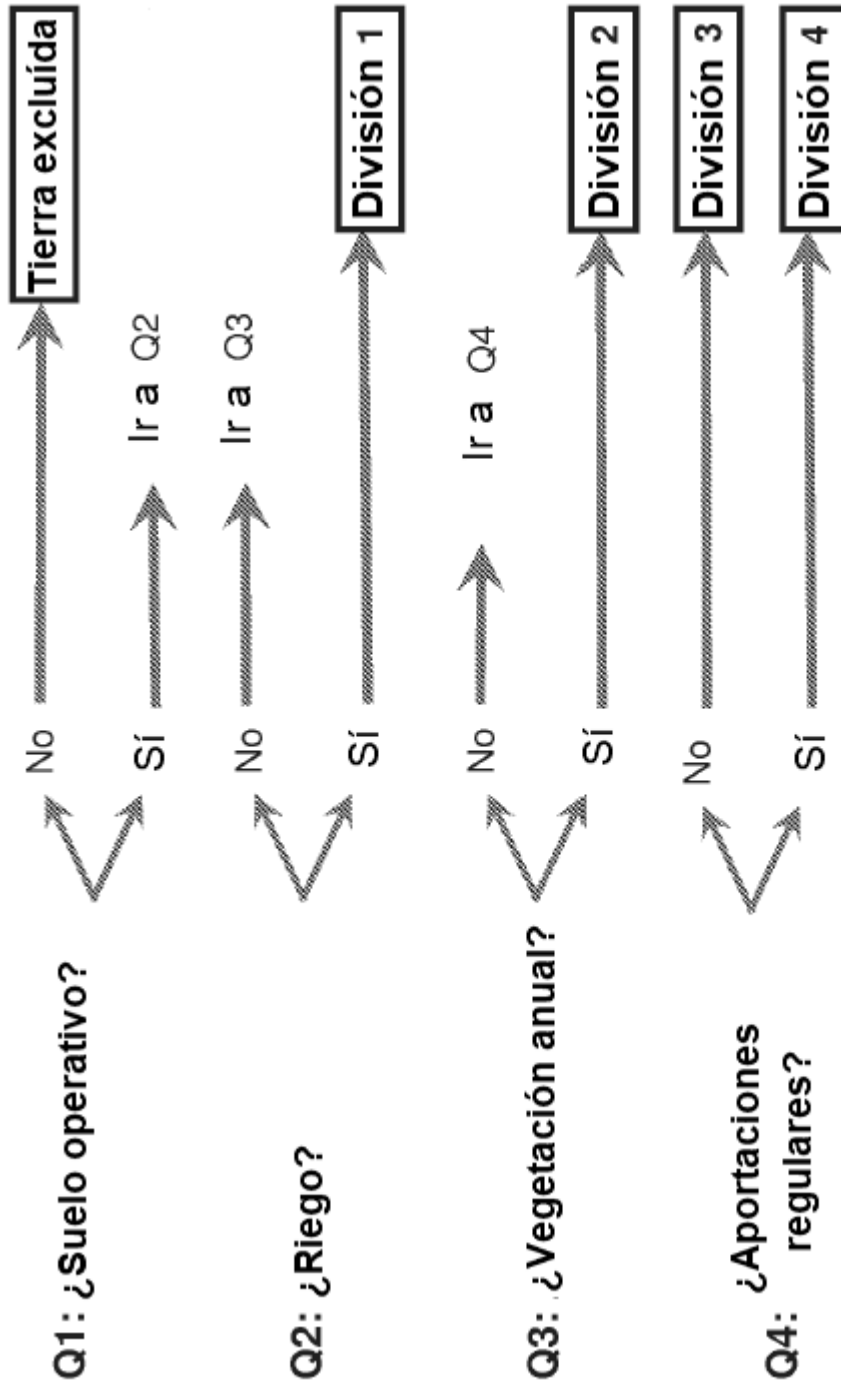


Figura 2C

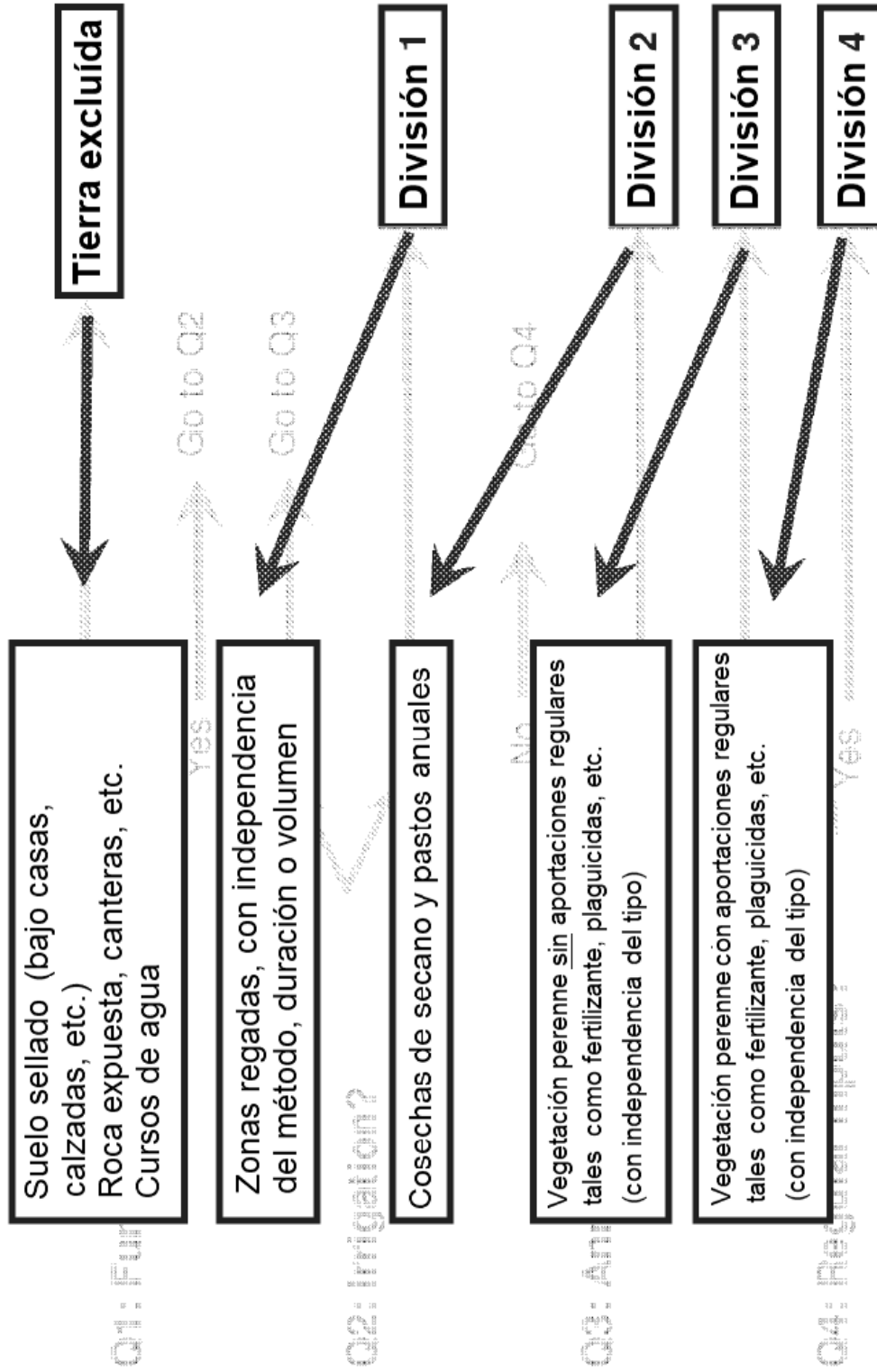


Figura 2D

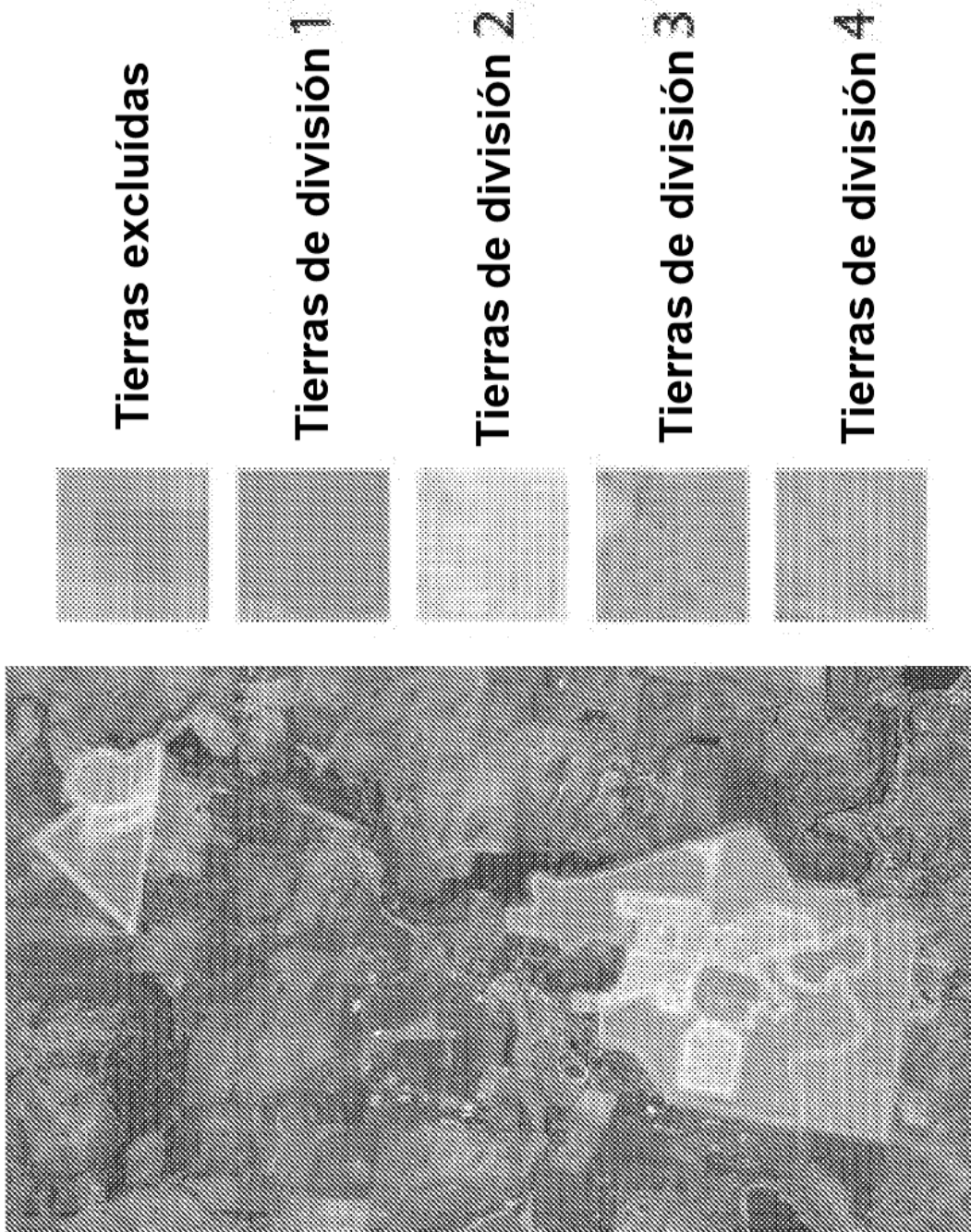


Figura 2E

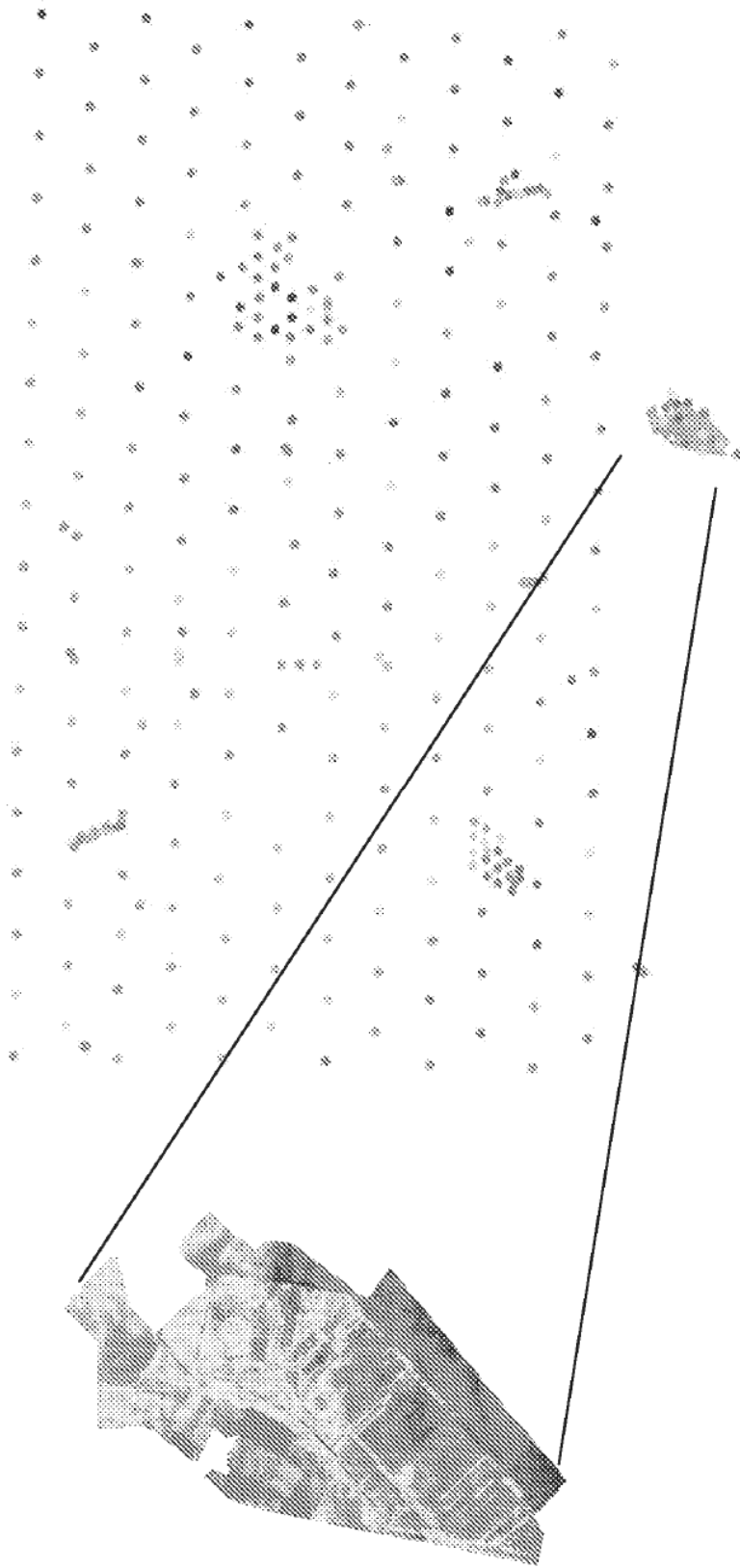


Figura 2F

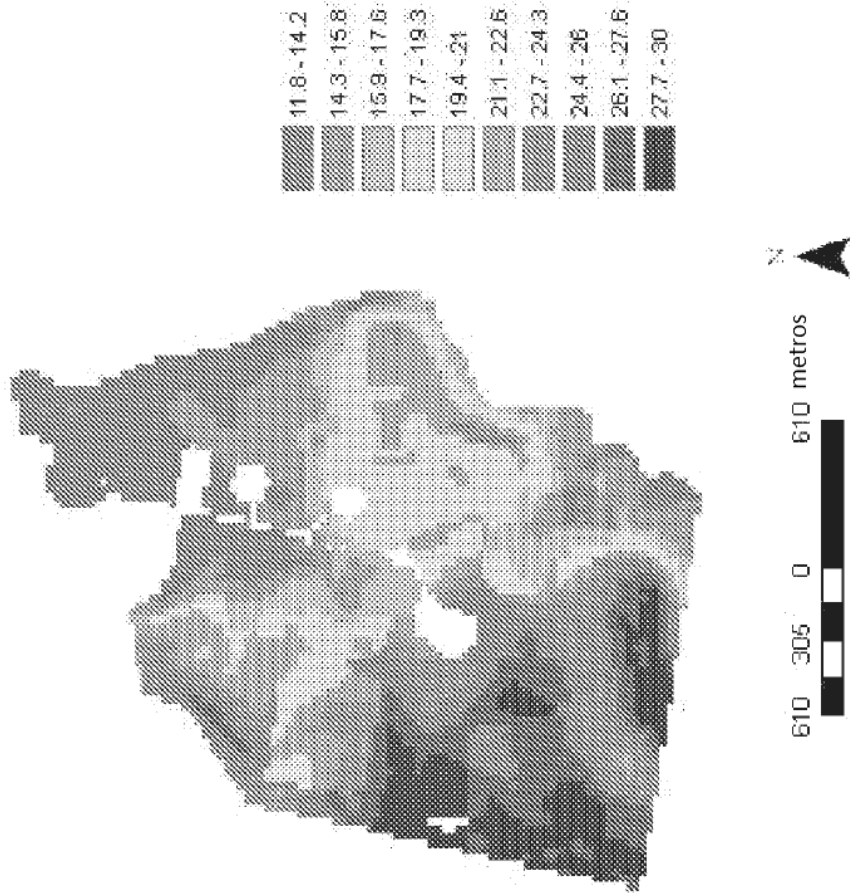


Figura 2G

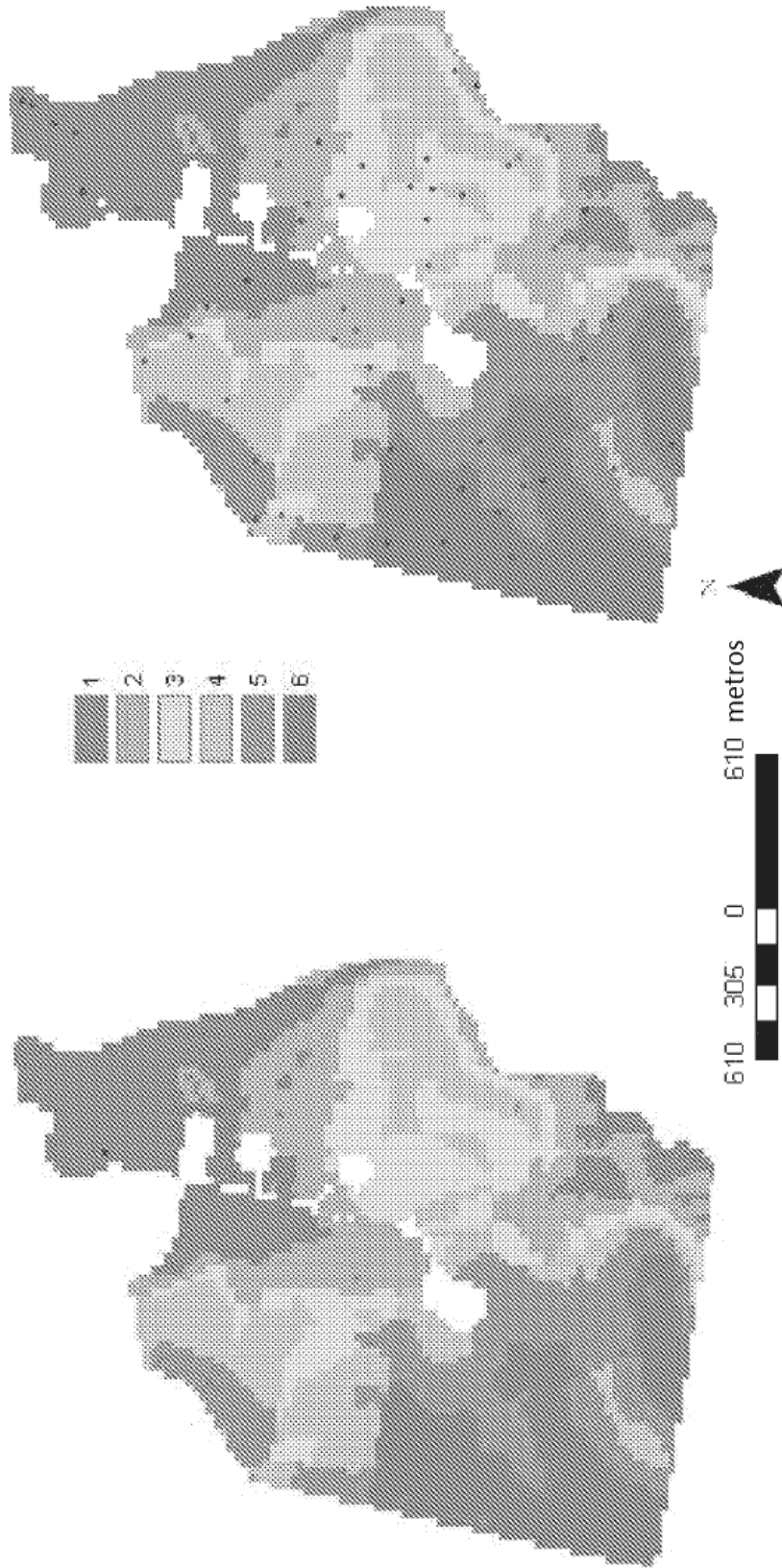


Figura 3

Variable	Descripción de la variable	Notas
$\Delta FC_{storage}$	Variación en almacenamiento de carbono a escala de explotación entre los tiempos 1 y 2	
AD_{mass}	Peso total de la "capa"	Peso secado al aire (o 40°C 48 horas). Para combinar debe haber adiciones de igual masa
AD_{soil}	Peso total de suelo AD	Material de tamaño <2 mm (Peso total - grava = suelo AD <2 mm)
$C\%$	Concentración de carbono	Uso de tratamiento con HCl para eliminar carbonatos inorgánicos cuando el pH es >7,5
$C_{content}$	Contenido de carbono del estrato con respecto a masa estándar por unidad de superficie	
C_{dens}	Contenido de carbono por capa	% de C * componente de suelo OD
$C_{dens i}$	Masa acumulada de carbono por capa	
C_{dens1}	Densidad de C en cualquier capa adyacente a la masa estándar	Es decir, capa 1 más cercana por encima de la profundidad estándar, capa 2 más cercana por debajo
C_{mass}	Contenido de carbono por capa	% de C * componente de suelo OD
$C_{mass i}$	Masa acumulada de carbono por capa	
C_{mass1}	Masa de C en cualquier capa adyacente a la masa estándar	Es decir, capa 1 más cercana por encima de la masa estándar, capa 2 más cercana por debajo
C_r	Radio de la zapata de testigo	Necesario para escalar al estrato o zona representativa (aquí, m ²)
C_{St}	Masa media de carbono por unidad de superficie y por estrato	
C_{STdens}	Contenido de carbono con respecto a volumen estándar	
$C_{STdens k}$	Masas de carbono combinadas con respecto a volumen estándar	
C_{STmass}	Contenido de carbono con respecto a masa estándar	
$C_{STmass k}$	Masas de carbono combinadas con respecto a masa estándar por estratos	
$FC_{content}$	Contenido de carbono a escala de explotación	
G_v	Volumen de grava	Material de tamaño > 2 mm
G_w	Peso de grava	Material de tamaño > 2 mm
k	Testigos por muestra compuesta	

Figura 4A

Variable	Descripción de la variable	Notas
L_l	Longitud de capa	
L_{ST}	Longitud estándar (100 cm)	
L_v	Volumen de capa	
m	Número de muestras compuestas	
$mdd\Delta\%FC_{content}$	Intervalo de confianza de 95% para % de diferencia en contenido de carbono a escala de explotación (asumiendo aquí igual varianza entre tiempos 1 y 2)	
$mdd\Delta FC_{content}$	Diferencia mínima detectable en contenido de carbono a escala de explotación (asumiendo aquí igual varianza entre tiempos 1 y 2)	
$mdd\Delta FC_{storage}$	Diferencia mínima detectable en almacenamiento de carbono a escala de explotación (asumiendo aquí igual varianza entre tiempos 1 y 2)	
n	Número de testigos dentro de los estratos	
OD_{mass}	Peso de masa OD	Peso de suelo OD + peso de grava
$OD_{mass\ i}$	Masa OD acumulada por capa	
$OD_{mass\ 1}$	Masa OD en cualquiera de las dos capas adyacentes a la masa estándar	Es decir, capa 1 más cercana encima de la masa estándar, capa 2 más cercana debajo
OD_{soil}	Peso de suelo OD	Suelo AD <2 mm corregido en cuanto a contenido de humedad
OD_{STmass}	Masa estándar (secada en estufa)	
pH	pH	Si pH es > 7,5 se requiere corregir en cuanto a carbono inorgánico
$S(C_{St})$	Error estándar de masa media de carbono por unidad de volumen y por estrato	
SP_{BD}	Densidad aparente de suelo y poros	
SP_v	Volumen de suelo y poros	
St_a	Superficie del estrato	
$t_1 \& t_2$	Muestreo en el tiempo 1 y en el tiempo 2	

Figura 4B

Variable	Descripción de la variable	Notas
v	Superficie estándar	Es decir, un único testigo es escalado a 1 m ²
v	Volumen estándar	Es decir, un único testigo es escalado a 1 m ³
$V(\Delta FC_{storage})$	Varianza de la variación de almacenamiento de carbono a escala de explotación entre tiempos 1 y 2	
$S(\Delta FC_{storage})$	Error estándar de la variación de almacenamiento de carbono a escala de explotación entre tiempos 1 y 2	
$V(C_{content})$	Varianza del contenido de carbono del estrato con respecto a la masa estándar por unidad de superficie	
$V(C_{St})$	Varianza de la masa media de carbono por unidad de superficie y por estrato	
$V(FC_{content})$	Varianza del contenido de carbono a escala de explotación	
θ	Humedad del suelo	Contenido de humedad del suelo
ρ	Coefficiente de autocorrelación temporal de medidas sin error (igual a 0 puesto que las muestras son independientes)	

Figura 4C

Ref. ident. testigo	Ref. ident. capa	AD _{mass}	G _w	AD _{soil}	θ	OD _{soil}	C%*	OD _{mass}	OD _{soil}	C _{mass}	OD _{mass i}	C _{mass i}
<i>Ec.</i>				(1.1)		(1.2)		(1.3)	(1.4)	(1.5)	(1.6)	(1.7)
<i>unidades</i>		g	g	g	g/g	g	%	kg ¹ .m ²	kg ¹ .m ²	kg ¹ .m ²	kg ¹ .m ²	kg ¹ .m ²
2i	1	881,2	17,32	863,88	0,01	856,01	1,01	770,05	754,78	5,77	770,05	5,77
2i	2	610,85	37,29	573,56	0,04	553,23	0,54	520,69	487,81	2,62	1290,74	8,39
2i	3	527,78	83,3	444,48	0,03	431,74	0,59	454,13	380,68	2,25	1744,87	10,63

*C% se refiere a % de C total, corregido en cuanto a % de C inorgánico si pH es mayor que ~7

Figura 5A

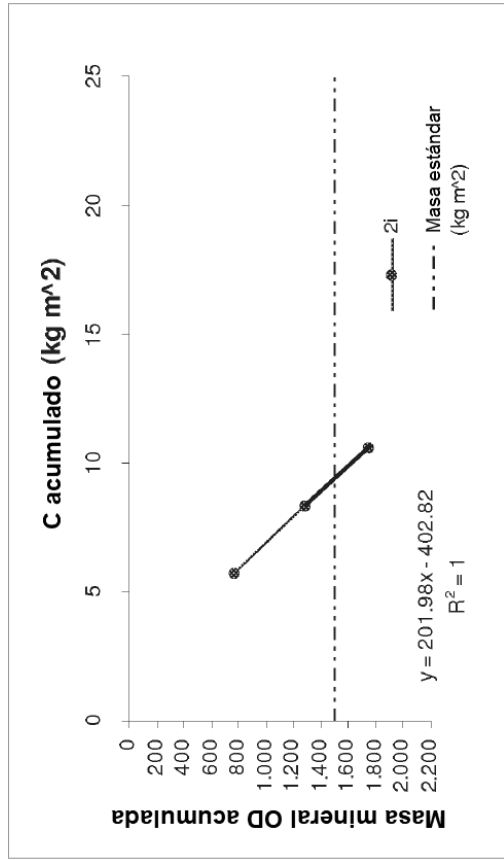


Figura 5B

Ref. ident. testig.	OD _{STmass}	C _{STmass}	V	n	St	C _{St}	V(C _{St})	S(C _{St})	St _a	C _{content}	V(C _{content})
Ec.		(1.8)*				(1.9)	(1.10)	(1.11)		(1.12)	(1.13)
Unid.	kg ⁻¹ .m ⁻²	kg ¹ .m ²	m ²	cuenta	nominal	kg ¹ .m ⁻²	C kg ² .m ⁻⁴	kg ¹ .m ⁻²	m ²	Mg/estrato	kg ⁻² .m ⁻⁴ /estrato
1e	1500	14,20	1		1	15,44	0,67	0,82	857850	13245,59	493441054447,78
1f	1500	16,98	1		2	10,29	0,19	0,44	752970	7747,12	107704290439,99
1g	1500	15,14	1	3							
2k	1500	10,65	1								
2a	1500	10,79	1								
2i	1500	9,42	1	3							

* aquí se ha utilizado interpolación lineal excepto cuando OD_{mass} recuperada es insuficiente para llegar a OD_{STmass}, en cuyo caso se supone que la masa adicional no contiene carbono orgánico adicional

Figura 5C

Totales de explotación	FC _{content}	V(FC _{content})	S(FC _{content})	+/-95% CI	mddΔ% FC _{content} *	mddΔ FC _{content} *	mddΔ FC _{storage} *
Ec.	(1,14)	(1,15)	(1,16)	(1,17)	(1,18)*	(1,19)	(1,20)
Unid.	Mg	Mg ²	Mg	Mg	%	Mg	kg ⁻¹ .m ⁻²
	20992,71	601145,34	775,34	1557,65	10,49	2202,85	1,37

* suponiendo igual varianza entre los tiempos 1 y 2

Figura 5D

Ref. ident. testigo	Ref. ident. capa	v	AD _{mass}	G _w	AD _{soil}	θ	OD _{soil}	C%*	OD _{mass}	OD _{soil}	C _{mass}	OD _{mass i}	C _{mass i}
<i>Ec.</i>					(2.1)		(2.2)		(2.3)	(2.4)	(2.5)	(2.6)	(2.7)
<i>unidades</i>			g	g	g	g/g	g	%	kg ⁻¹ .m ⁻²	kg ⁻¹ .m ⁻²	kg ⁻¹ .m ⁻²	kg ⁻¹ .m ⁻²	kg ⁻¹ .m ⁻²
2a+2i	1	2	530,49	20,94	509,55	0,008	505,30	1,581	232,00	222,77	3,52	232,00	3,52
2a+2i	2	2	1087,32	24,77	1062,55	0,012	1049,71	0,507	473,71	462,79	2,35	705,71	5,87
2a+2i	3	2	2353,27	158,81	2194,46	0,036	2115,53	0,573	1002,69	932,68	5,34	1708,40	11,21

*C% se refiere a % de C total, corregido en cuanto a % de C inorgánico si pH es mayor que ~7

Figura 6A

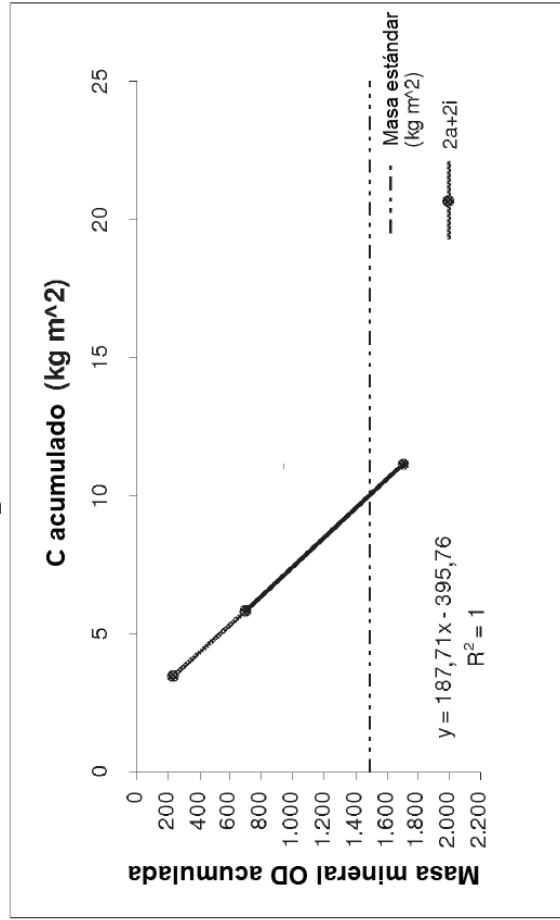


Figura 6B

Ref. ident. testig.	OD _{STma} _{SS}	C _{STmass}	v	k	vC _{STma} _{SS}	St	n	m	C _{ST}	V(C _{ST})	S(C _{ST})	St _a	C _{content}	V(C _{content})
<i>Ec.</i>		(2.8)			(2.9)				(2.10)	(2.11)	(2.12)		(2.13)	(2.14)
<i>Unid.</i>	kg ⁻¹ .m ⁻²	kg ⁻¹ .m ⁻²	m ²	cu en ta	kg ⁻¹	no mi na l	cu en ta	cu en ta	kg ⁻¹ .m ⁻²	C kg ⁻¹ .m ⁻⁴	kg ⁻¹ .m ⁻²	m ⁻²	Mg/estrato	kg ⁻² .m ⁻⁴ /estrato
1e	1500	14,24	1	1	14,24	1	3	2	14,21 2	0,001	0,023	8578 50	12192,05	375581260,10
1f+1g	1500	14,2	1	2	28,39	2	3	2	10,21 9	0,029	0,169	7529 70	7694,60	16218715439,67
2k	1500	10,46	1	1	10,46									
2a+2i	1500	10,1	1	2	20,20									

Figura 6C

Totales de explotación	FC _{content}	V(FC _{content})	S(FC _{content})	+/-95% CI	Δ% FC _{content} *	Δ FC _{content} *	mddΔ FC _{storage} *
<i>Ec.</i>	(2.15)	(2.16)	(2.17)	(2.18)	(2.19)	(2.20)	(2.21)
<i>Unid.</i>	Mg	Mg ²	Mg	Mg	%	Mg	kg ⁻¹ .m ⁻²
	19886,65	16594,30	128,82	258,80	1,84	365,99	0,23

* suponiendo igual varianza entre los tiempos 1 y 2

Figura 6D

Ref. ident. testig.	Ref. ident. capa	AD _{mass}	G _w	AD _{soil}	θ	OD _{soil}	L _i	L _v	G _v	SP _v	SP _{BD}	C%*	C _{dens}	C _{dens I}	C _{dens i}
Ec.				(1.1)		(1.2)		(1.3)	(1.4)	(1.5)	(1.6)		(1.7)	(1.8)	(1.9)
Unid.		g	g	g	g/g	g	cm	cm ³	cm ³	cm ³	g ¹ .cm ³	%	g ¹ .cm ³	capa kg ⁻¹ .m ³	kg ⁻¹ .m ³
2i	1	881,2	17,32	863,88	0,01	856,01	54	612,42	6,54	605,88	1,41	1,01	0,0143	7,71	7,71
2i	2	610,85	37,29	573,56	0,04	553,23	35	396,94	14,07	382,87	1,44	0,54	0,0078	2,73	10,44
2i	3	527,78	83,3	444,48	0,03	431,74	25,5	289,20	31,43	257,77	1,67	0,59	0,0099	2,52	12,96

*C% se refiere a % de C total, corregido en cuanto a % de C inorgánico si pH es mayor que ~7

Figura 7A

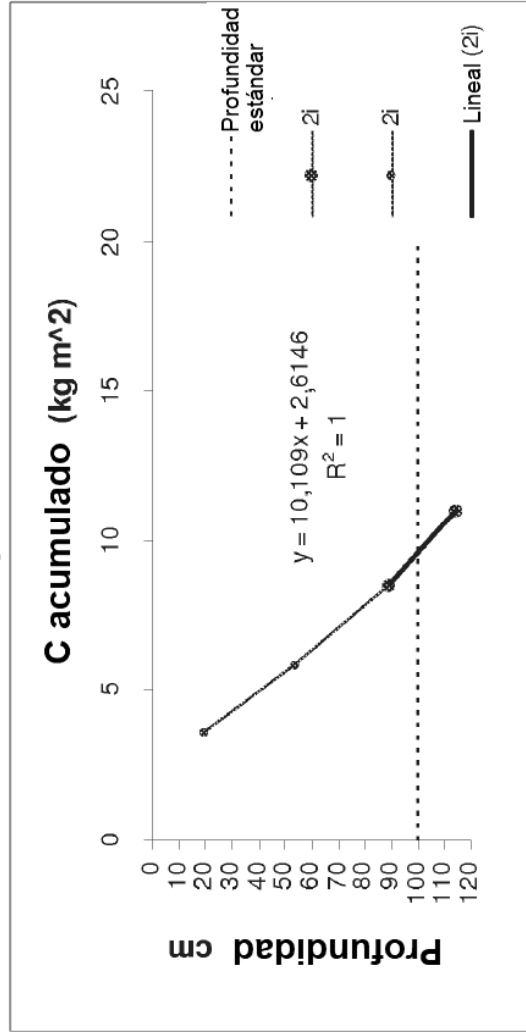


Figura 7B

Ref. ident. testig.	L _{st}	C _{stdens}	v	n	St	C _{st}	V(C _{st})	S(C _{st})	St _a	C _{content}	V(C _{content})
Ec.		(1.10)				(1.11)	(1.12)	(1.13)		(1.14)	(1.15)
<i>Unid.</i>	<i>cm</i>	$kg^{-1}.m^3$	m^3	<i>cuenta</i>	<i>nominal</i>	$kg^{-1}.m^{-3}$	$C kg^{-2}.m^{-6}$	$kg^{-1}.m^{-3}$	m^2	<i>Mg/estrato</i>	$kg^{-2}.m^6/estrato$
1e	100	14,47	1		1	15,35	0,306	0,553	857850	13164	225416325308
1f	100	16,37	1		2	10,60	0,314	0,560	752970	7981	178031871406
1g	100	15,19	1	3							
2k	100	11,57	1								
2a	100	10,59	1								
2i	100	9,63	1	3							

Figura 7C

Totales de explotación	FC _{content}	V(FC _{content})	S(FC _{content})	+/-95% CI	Δ% FC _{content} *	Δ FC _{content} *	mddΔ FC _{storage} *
Ec.	(1.16)	(1.17)	(1.18)	(1.19)	(1.20)	(1.21)	(1.22)
<i>Unid.</i>	<i>Mg</i>	Mg^2	<i>Mg</i>	<i>Mg</i>	%	<i>Mg</i>	$kg^{-1}.m^2$
	21066.03	468542,59	684,50	1375	9,2	1944,78	1,21
* suponiendo igual varianza entre los tiempos 1 y 2							

Figura 7D

Ref. ident. testig.	AD _{mass}	G _w	AD _{soil}	θ	OD _{soil}	L _i	k	L _v	G _v	SP _v	SP _{BD}	C%	C dens	C dens _i
<i>Ec.</i>			(2.1)		(2.2)			(2.3)	(2.4)	(2.5)	(2.6)		(2.7)	(2.8)
<i>Unid.</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g/g</i>	<i>g</i>	<i>cm</i>	<i>cuenta</i>	<i>cm³</i>	<i>cm³</i>	<i>cm³</i>	<i>g₁.cm₃⁻³</i>	%	<i>g₁.cm₃⁻¹</i>	<i>capa kg₁.m₂⁻²</i>
2a+2i	3971,08	204,52	3766,56	0,076	3670,54	114,25	2	2591,45	77,18	2514,28	1,46	0,69	0,0101	11,55

Figura 8A

Ref. ident. testigo	L _{ST}	C _{STdens}	v	k	St	n	m	C _{St}	V(C _{St})	S(C _{St})	St _a	C _{content}	V(C _{content})
<i>Ec.</i>		(2.9)*						(2.10)	(2.11)	(2.12)		(2.13)	(2.14)
<i>Unid.</i>	<i>cm</i>	<i>kg¹.m⁻³</i>	<i>m³</i>	<i>cuenta</i>	<i>nominal</i>	<i>cuenta</i>	<i>cuenta</i>	<i>kg¹.m⁻³</i>	<i>C.kg².m⁻⁶</i>	<i>kg¹.m⁻³</i>	<i>m²</i>	<i>Mg/estrato</i>	<i>kg².m⁶/estrato</i>
1e	100	14,20	1	1	1	3	2	15,39	0,713	0,844	857850	13202,62	524571556906
1f+1g	100	15,99	1	2	2	3	2	10,53	0,354	0,595	752970	7931,58	200966584345
2k	100	11,38	1	1									
2a+2i	100	10,11	1	2									

Figura 8B

Totales de explotación	FC _{content}	V(FC _{content})	S(FC _{content})	+/-95% CI	Δ% FC _{content} *	Δ FC _{content} *	mddΔ FC _{storage} *
<i>Ej.</i>	(2.15)	(2.16)	(2.17)	(2.18)	(2.19)	(2.20)	(2.21)
<i>Unid.</i>	<i>Mg</i>	<i>Mg⁻²</i>	<i>Mg</i>	<i>Mg</i>	%	<i>Mg</i>	<i>kg⁻¹.m⁻²</i>
	21134,2	725538,1	851,8	1711,2	11,45	2420,05	1,50

* suponiendo igual varianza entre los tiempos 1 y 2

Figura 8C