



© JOHN MARTIN, CI

## Conceptualización del proyecto y desarrollo de un plan de medición en el campo

## MEDICIÓN DE EXISTENCIAS DE CARBONO VERSUS SUMIDEROS DE CARBONO

Una *existencia de carbono* es la cantidad de carbono orgánico ( $C_{org}$ ) almacenado en un ecosistema de carbono azul, que generalmente se mide en megagramos de carbono orgánico por hectárea ( $Mg C_{org}/ha$ ) hasta una profundidad de suelo determinada. Estas existencias se determinan sumando todos los sumideros de carbono en cuestión dentro del área investigada. De forma similar, los *sumideros de carbono* son reservorios, tales como el suelo, la vegetación, el océano y la atmósfera, que almacenan y liberan carbono. Entre los sumideros de carbono azul de importancia, se incluyen los siguientes:

- La biomasa aérea viva, principalmente la masa vegetal herbácea (en el caso de los pastos marinos y las marismas) y leñosa (en el caso de los manglares). Esta biomasa también incluye a organismos epífitos (por ejemplo, algas y microbios que viven en las plantas).
- La biomasa aérea muerta, principalmente detritos de hojas (en los tres ecosistemas) o madera (en manglares), y otros restos orgánicos tales como macroalgas.
- La biomasa subterránea viva dominada por raíces y rizomas.
- El carbono subterráneo formado por tejidos de vegetación muerta y materia orgánica en el suelo (carbono “autóctono” y “alóctono”).

Los sumideros de carbono en los ecosistemas de carbono azul se subdividen asimismo en sumideros de corto plazo (con una duración menor de 50 años, por ejemplo, biomasa viva) y sumideros de largo plazo (con una duración de siglos o miles de años, por ejemplo, el carbono orgánico del suelo). Para los fines del carbono azul, los sumideros de carbono de largo plazo son los más importantes para determinar el potencial de mitigación del carbono (IPCC 2007; Protocolo de Kioto 1998).

## EVALUACIONES DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO

Durante la planificación, el objetivo final de un proyecto debe definirse claramente, ya que esto influirá tanto en el diseño como en la ejecución del proceso de evaluación. Un objetivo final claro requiere de la determinación de las áreas geográficas que se deben incluir, los sumideros de carbono que se deben medir, el nivel de especificidad requerido y la necesidad y la escala de tiempo de una reevaluación en el futuro. Además, deben tenerse en cuenta los recursos disponibles para maximizar la efectividad de los costos del proyecto.

El proceso de planificación tiene cuatro elementos fundamentales:

- 1) Concepción.
- 2) Muestreo en el campo de los sumideros de carbono.
- 3) Preparación de la muestra y análisis en laboratorio.
- 4) Cálculos para ampliar la escala de las existencias de carbono al área del proyecto.

La conceptualización del proyecto se analiza en detalle en este capítulo. Se presentan descripciones detalladas de los enfoques y las técnicas necesarias para el muestreo de los sumideros de carbono en el campo y las técnicas específicas de laboratorio para el análisis de cada sumidero en el Capítulo 3 (Muestreo en el campo de los sumideros de carbono en el suelo de ecosistemas costeros) y en el Capítulo 4 (Muestreo en el campo de los sumideros de carbono vegetal en ecosistemas costeros). Las opciones de sensores remotos que pueden informar la ubicación del lugar y ampliar la escala de los resultados se presentan en el Capítulo 6 (Sensores remotos y mapeo).

Los enfoques que se detallan aquí representan las mejores prácticas basadas en las investigaciones más recientes arbitradas por pares. No obstante, alentamos a los gestores de proyectos a explorar la literatura y elegir el mejor método para su proyecto, o es posible que decidan adaptar estos métodos en función de su conocimiento local, su formación, las limitaciones de recursos u otras necesidades en cuanto a la recolección de datos, o a la evolución de las directrices del IPCC y otras fuentes relevantes

## CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROYECTO

Los principales pasos necesarios para preparar un plan sólido de medición en el campo se resumen en la **Fig. 2.1**. Cada paso debe realizarse de forma coherente, bien justificada y bien documentada. Si bien Pearson *et al.* (2007) presentan pautas sobre el diseño de proyectos en bosques terrestres, gran parte de la discusión puede aplicarse a los ecosistemas de carbono azul y, en consecuencia, influyeron en gran medida en las siguientes recomendaciones.



**Figura 2.1** Pasos para preparar un plan de medición

### Definir los límites del proyecto

La determinación de los límites espaciales del proyecto dependerá del alcance y de los objetivos de este. Las áreas de proyectos pueden variar desde un único sitio (decenas de hectáreas) a evaluaciones en el ámbito nacional (cientos o miles de hectáreas). Es posible que contengan ecosistemas degradados o transformados. El área del proyecto puede ser un bloque continuo de tierra o estar formada por muchos fragmentos dispersos en una gran área. Una vez establecidos los límites, debe hacerse todo lo posible por no modificarlos. No obstante, en caso de que sea inevitable hacer cambios, estos deben ser bien documentados, y las estimaciones de las existencias totales de carbono o sus cambios deben ajustarse para reflejar el cambio en el área.

Una vez que se decidieron la ubicación y la escala del proyecto, el próximo paso es hacer un mapa del área. Los mapas permiten que los equipos en el campo optimicen su campaña mediante la selección de puntos de muestreo que maximicen el rango geofísico y las variables ambientales y biofísicas dentro del área. También pueden utilizarse mapas para verificar la accesibilidad a través de caminos, canales de marea y ríos. Comenzar con un mapeo preciso y exhaustivo es importante no solo para determinar dónde tomar las muestras, sino también para extrapolar las mediciones de carbono de muestras individuales a sitios de proyecto de gran escala. En caso de que se prevea hacer reevaluaciones en el futuro, contar con un mapa inicial preciso del área será fundamental para determinar cambios en la existencia de carbono y los servicios del ecosistema. En las agencias gubernamentales locales se pueden obtener mapas topográficos, de uso de la tierra, de suelos y vegetación, así como también fotografías aéreas, y utilizarlos para discernir los límites del proyecto con exactitud variable. Las imágenes satelitales y las técnicas que utilizan sensores remotos son muy útiles para hacer mapas de ecosistemas de carbono azul y para recopilar información sobre el ecosistema en forma más general. En el Capítulo 6 (Sensores remotos y mapeo) encontrará información detallada sobre sensores remotos.

## Estratificación del área del proyecto

La estratificación se utiliza para dividir sitios heterogéneos de gran tamaño (que requieren de muchas muestras para explicar la variación) en áreas homogéneas más pequeñas (donde se requieren menos muestras) y además es útil cuando las condiciones del campo, las cuestiones logísticas y los recursos limitados impiden actividades intensas de muestreo (**Fig. 2.2**). La estratificación divide el área del proyecto en áreas secundarias o “estratos” que son relativamente homogéneos en términos ecológicos (por ejemplo, en cuanto a diversidad de especies y geomorfología). Existen muchas herramientas para realizar la estratificación, incluyendo el conocimiento local, las imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica.



**Figura 2.2** Ejemplo de estratificación en un manglar (© Boone Kauffman, OSU)

La estratificación debe realizarse de manera tal que los criterios utilizados para definir los estratos se relacionen con la variable que se desea medir. Para el propósito que nos interesa, la variable principal que se debe medir es el carbono. Por lo tanto, se utilizan los aspectos que influyen en el contenido de carbono azul para determinar los estratos del área de un proyecto. La variación en las especies vegetales y la densidad de la vegetación influyen en gran medida en las existencias de carbono azul. Por ejemplo, los manglares contienen bosques de árboles altos, manglares bajos, arbustos y palmeras nipa (también conocidas como nipas o *Nypa fruticans*); las marismas contienen pastos, arbustos y juncos; y las especies de pastos marinos varían en función de la profundidad del agua. Estas variaciones pueden guiar el trazado de los estratos. Otros factores que pueden utilizarse para definir los estratos son:

- 1) El uso actual de la tierra (áreas de marismas que se utilizan con fines agrícolas).
- 2) El uso potencial de la tierra (áreas vulnerables que pueden modificarse para la acuicultura o el desarrollo).
- 3) Variaciones en las características del suelo (profundidad o tipo de suelo, o tamaño del grano del sedimento).
- 4) Características geomorfológicas (proximidad a rasgos geológicos, características de drenaje).
- 5) Proximidad al océano (áreas inundables con régimen diario de mareas o áreas que se inundan únicamente con la pleamar más alta).

Si bien la estratificación se aplica para reducir la cantidad de muestras necesarias y aumentar la exactitud de la estimación de las existencias de carbono, es importante tener en cuenta que estratificar con criterios estrictos que generen muchos estratos pequeños (que deben ser muestreados en su totalidad) o, de lo contrario, con criterios amplios que generen solo un par de estratos grandes (en los que en alguna medida se perderá la variación) anula esta ventaja. El tamaño y la cantidad de estratos deben reflejar un equilibrio entre la exactitud deseada, el tiempo requerido y los recursos disponibles.

## Decidir qué sumideros de carbono medir

Cada estrato definido en el área del proyecto contendrá por lo general más de un sumidero de carbono. El propósito y el objetivo del proyecto determinarán qué sumideros de carbono se deben medir dentro de cada estrato. No todos los sumideros serán de importancia o requerirán de cuantificación para todos los proyectos. Según el proyecto, se podrá decidir ignorar uno o más sumideros de carbono si se puede demostrar que no afectarán significativamente los resultados de la evaluación, pero siempre es preferible medir todos los sumideros de carbono en al menos unos pocos sitios de muestreo representativos.

En general, un sumidero de carbono debería medirse:

- Si representa una porción significativa (por ejemplo, >5 %) del carbono total del estrato.
- Si existe la posibilidad de que cambie o si ha cambiado significativamente (ya sea en forma natural debido al cambio climático y clima extremo o debido a impactos antrópicos tales como el cambio en el uso de la tierra o el dragado).
- Si el sumidero de carbono es desconocido.

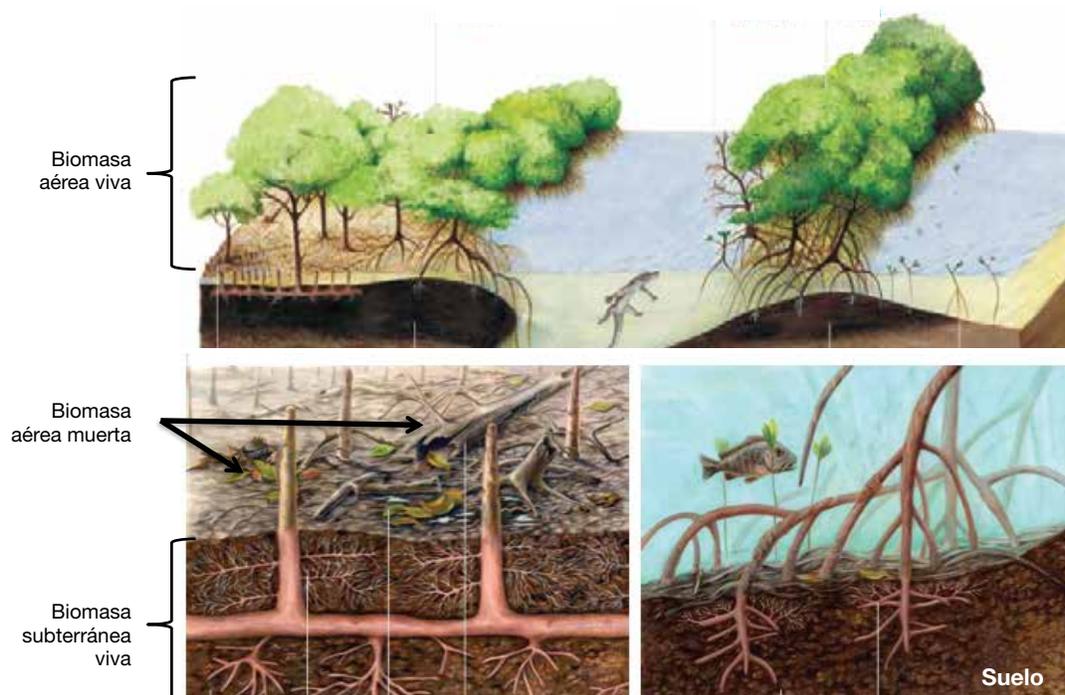
Los sumideros de carbono pequeños o aquellos con bajas posibilidades de ser afectados por un cambio pueden o bien excluirse o ser muestreados con menor frecuencia, en función del presupuesto del proyecto y de otras restricciones. En la mayoría de los sistemas de carbono azul, **el carbono del suelo es sin duda el sumidero de carbono predominante**. No obstante, es necesario por lo general medir otros sumideros de carbono para cumplir con los requisitos de certificación de un proyecto de carbono. Por ejemplo, tanto la contabilidad de carbono a nivel nacional como los proyectos de mercado de carbono requieren de cuatro mediciones básicas de sumideros de carbono: biomasa aérea viva (por ejemplo, árboles, pastos y arbustos), biomasa aérea muerta (por ejemplo, hojarasca y madera caída), biomasa subterránea viva (por ejemplo, raíces y rizomas) y carbono del suelo.

En los tres hábitats, es habitual encontrar vegetación y sedimentos que provengan de hábitats circundantes al sitio del proyecto. Por ejemplo, los lechos de pastos marinos a menudo tendrán unos pocos propágulos y hojas de manglares, y las hojas de los pastos marinos son comunes en los mangares y en los sedimentos de las marismas. La materia orgánica proveniente de tierras altas también puede transportarse e incorporarse a los ecosistemas de carbono azul. En la mayoría de los casos, este material orgánico alóctono no representa una proporción significativa de la biomasa total del ecosistema y puede desestimarse. No obstante, si el material alóctono presente es significativo (>5 %), puede clasificarse como un sumidero aparte y cuantificarse directamente. En algunos casos, el carbono orgánico alóctono presente en el suelo puede cuantificarse mediante isótopos estables, pero es posible que esto no sea práctico en todas las áreas ni necesario para todos los proyectos (Johnson *et al.* 2007).

## SUMIDEROS DE CARBONO EN MANGLARES

De forma similar a la mayoría de los ecosistemas boscosos terrestres, los manglares pueden dividirse a grandes rasgos en cuatro sumideros de carbono (**Fig. 2.3**):

- Biomasa aérea viva (árboles, arbustos, lianas, palmeras, neumatóforos).
- Biomasa aérea muerta (detritos, madera caída, árboles secos).
- Biomasa subterránea viva (raíces y rizomas).
- Carbono del suelo que incluye la biomasa subterránea muerta.



**Figura 2.3** Sumideros de carbono en ecosistemas de manglares

En los manglares, todos los árboles se incluyen en la evaluación porque constituyen un importante sumidero de carbono (hasta 21 % de la existencia de carbono), son relativamente fáciles de medir (debido a ecuaciones alométricas bien documentadas que transforman la biomasa vegetal en contenido de carbono) y se ven afectados severamente por el uso de la tierra. La madera seca puede ser un importante sumidero (del 2.5 % al 5 % de la existencia de carbono), pero podría ser particularmente importante después de disturbios tales como actividades de uso de la tierra o tormentas tropicales (Kauffman & Cole 2010). Es difícil medir el componente de las raíces vivas (del 5 % al 15 % del total de la existencia de carbono subterráneo), pero existen algunas ecuaciones alométricas (Capítulo 4). La vegetación no arbórea y la hojarasca son por lo general componentes menores del ecosistema y, a menudo, pueden excluirse de las mediciones sin afectar la exactitud.

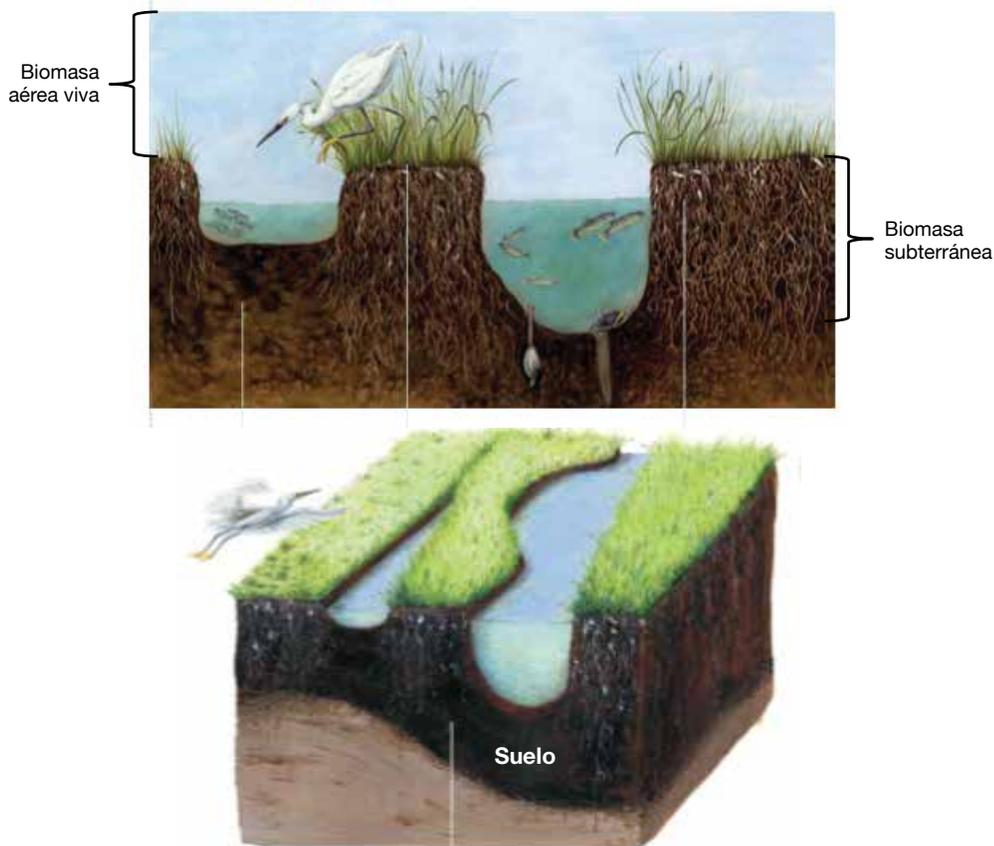
El carbono azul se almacena principalmente debajo de la tierra en suelos ricos en materia orgánica con muchos metros de profundidad, donde puede permanecer por muchísimo tiempo (hasta miles de años). El gran tamaño de estos sumideros subterráneos y su poco comprendida vulnerabilidad ante los cambios en el uso de la tierra hacen que medirlos sea extremadamente importante.

## SUMIDEROS DE CARBONO EN LAS MARISMAS

Se pueden considerar tres sumideros principales de carbono en los ecosistemas de marismas.

(Fig. 2.4):

- Biomasa aérea viva (arbustos, pastos, hierbas, etc.).
- Biomasa subterránea viva (raíces y rizomas).
- Carbono del suelo.



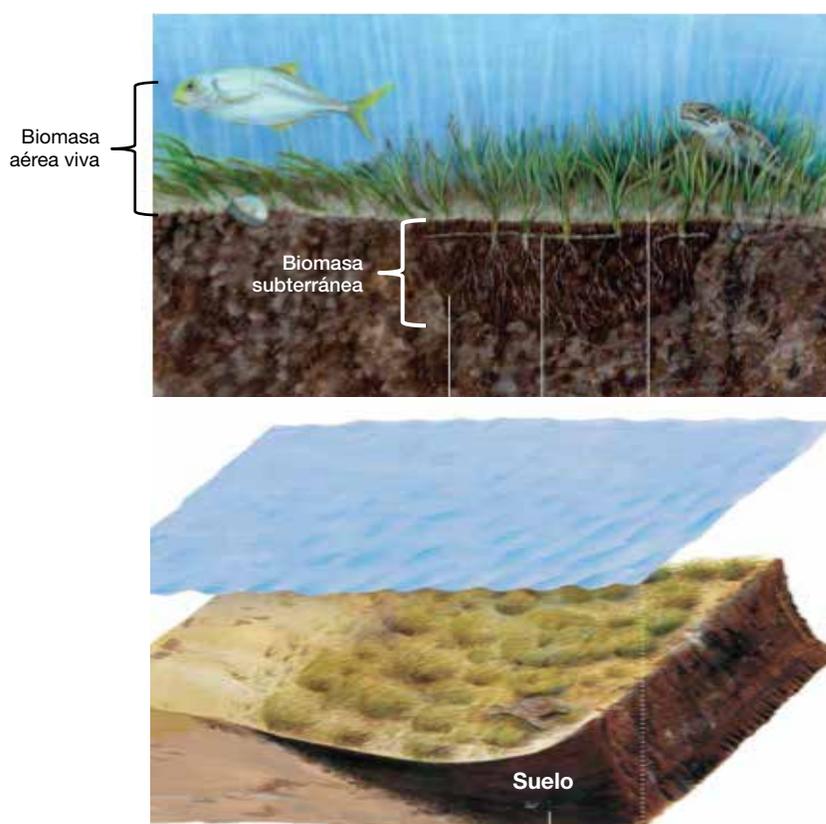
**Figura 2.4** Sumideros de carbono en ecosistemas de marismas

En las marismas, la mayor parte de la producción primaria anual tiene lugar en la biomasa subterránea (raíces y rizomas) (Valiela *et al.* 1976) con proporciones de raíz a brote (por ejemplo, proporción de biomasa subterránea a aérea) que oscilan entre 1.4 a 50 en la vegetación de marismas (Smith *et al.* 1979; Darby & Turner 2008a). Por lo tanto, la mayor parte del carbono en las marismas se almacena en la biomasa subterránea viva y en el sumidero de carbono del suelo. Estos dos sumideros a menudo son difíciles de separar y, por lo tanto, se consideran como un único sumidero de carbono (Chmura *et al.* 2003). La biomasa aérea muerta a menudo es arrastrada periódicamente por las mareas y, por lo general, puede excluirse de las mediciones sin afectar la exactitud.

## SUMIDEROS DE CARBONO EN LAS PRADERAS DE PASTOS MARINOS

Se pueden considerar tres sumideros principales de carbono en las praderas de pastos marinos. (Fig. 2.5):

- Biomasa aérea viva (hojas de pastos marinos y epífitas).
- Biomasa subterránea viva (raíces y rizomas).
- Carbono del suelo.



**Figura 2.5** Sumideros de carbono en ecosistemas de pastos marinos

El principal sumidero de carbono en los ecosistemas de pastos marinos es el carbono del suelo. La biomasa aérea muerta a menudo se desestima, ya que las hojas de los pastos marinos se descomponen rápidamente o se exportan velozmente desde las praderas de pastos marinos con el movimiento de las mareas. Las epífitas se tienen en cuenta como sumidero de carbono. No obstante, su tamaño varía en función de la especie y la ubicación.

En una escala global, la biomasa subterránea viva de pastos marinos solo representa el 0.3 % del sumidero de carbono orgánico total que se encuentra debajo de la superficie. Por lo tanto, a menudo se puede combinar con la estimación del sumidero de carbono del suelo sin sobrestimar significativamente este último (Fourqurean *et al.* 2012a).

### Determinar el tipo, la cantidad y la ubicación de las parcelas

Determinar la cantidad mínima de parcelas necesarias para garantizar la exactitud servirá para mantener lo más bajo posible los costos iniciales de medición en el campo y del programa de monitoreo a largo plazo. No obstante, la meta del proyecto y la exactitud deseada determinarán en última instancia la

densidad del muestreo. Una evaluación nacional de nivel 2 requiere de datos suficientes para estimar las existencias nacionales o regionales de carbono, y puede lograrse con una densidad de muestras relativamente baja cubriendo un área relativamente grande. En contraste, un proyecto de mercado de carbono requiere un nivel de exactitud mayor, que se logra mediante un mayor esfuerzo de muestreo en un área más pequeña a través del tiempo.

En función de los sumideros de carbono presentes en el ecosistema y la estratificación del área del proyecto, existe la necesidad de determinar la forma óptima, la magnitud y la intensidad del muestreo necesarias para describir las propiedades del ecosistema con exactitud sin redundancias innecesarias. Como tal, el diseño de las parcelas debería realizarse teniendo en cuenta los objetivos del proyecto, la exactitud, la eficiencia del muestreo y la seguridad.

## TIPO DE PARCELAS

Para evaluar las existencias de carbono azul, pueden utilizarse dos tipos de parcelas de muestra: permanentes y temporales. Las parcelas permanentes tienen mayor valor y credibilidad a largo plazo para determinar los cambios en las existencias de carbono a través del tiempo, pero las parcelas temporales pueden ser más prácticas.

Las parcelas permanentes son áreas perdurables y bien demarcadas que permiten hacer mediciones comparables directamente a través del tiempo.

- **Ventajas:** La estratificación y el diseño de parcelas se realizan solo una vez; son estadísticamente más precisas para determinar cambios en la existencia de carbono a través del tiempo porque se mide la misma parcela y la misma vegetación en ambos momentos en el tiempo; permiten la verificación con bajo costo, ya que una organización de verificación independiente puede medir parcelas permanentes y hacer comparaciones directas (Pearson *et al.* 2007).
- **Desventajas:** Los sitios pueden manipularse y desarrollarse (mejor manejo, aumento en las plantaciones, etc.) para dar la impresión de que se ha secuestrado más carbono del que existe verdaderamente en el resto de los estratos; las parcelas pueden perderse a causa de desastres naturales o la intervención antrópica, por lo que se requieren suficientes parcelas para obtener una medición precisa en caso de que algunas se destruyan (Pearson *et al.* 2007).

Las parcelas temporales se utilizan para generar una única medición de carbono azul. Pueden usarse para determinar el cambio en la existencia de carbono a través del tiempo; no obstante, las mediciones no son comparables directamente, por lo que se reduce la exactitud.

- **Ventajas:** Su implementación es más económica, ya que no requieren demarcaciones permanentes; se puede elegir una nueva ubicación con relativa facilidad en caso de que se pierda el área donde se tomaron las muestras originales.
- **Desventajas:** Es posible que se requieran más parcelas para lograr el nivel de precisión deseado.

## CANTIDAD DE PARCELAS

La cantidad óptima de parcelas depende del nivel de exactitud deseado, la variabilidad inherente de la biomasa entre las parcelas dentro de los mismos estratos y el costo asociado al muestreo. Lo ideal es que haya una estimación del carbono existente en el sitio de estudio y que se conozca la variación asociada a esas mediciones. En esas circunstancias, Pearson *et al.* (2007) presentan métodos exhaustivos para determinar el número de parcelas en función de la variación conocida dentro de los estratos (también está disponible en Internet una herramienta para calcular la cantidad de parcelas: <http://www.winrock.org/resources/winrock-sample-plot-calculator>). No obstante, el escenario más probable es que no haya información disponible. En esta situación, se recomienda examinar la mayor

cantidad de parcelas que los recursos (presupuesto y tiempo del personal) permitan la primera vez que se tomen muestras en el área. Las mediciones posteriores pueden luego tomar estos datos iniciales para determinar si se necesitan más o menos parcelas a fin de lograr el nivel de exactitud deseado.

Es importante tener en cuenta que algunas áreas pueden ser muy variables por naturaleza. Por lo tanto, es posible que la cantidad mínima de parcelas necesarias se desconozca o no sea práctica. Las áreas con alta variabilidad (principalmente debido a variaciones en el carbono del suelo a distintas profundidades) presentan más incertidumbres (el nivel de incertidumbre debe simplemente reportarse junto con los resultados). El gestor del proyecto deberá determinar qué tanto esfuerzo es factible realizar.

## UBICACIÓN DE LAS PARCELAS

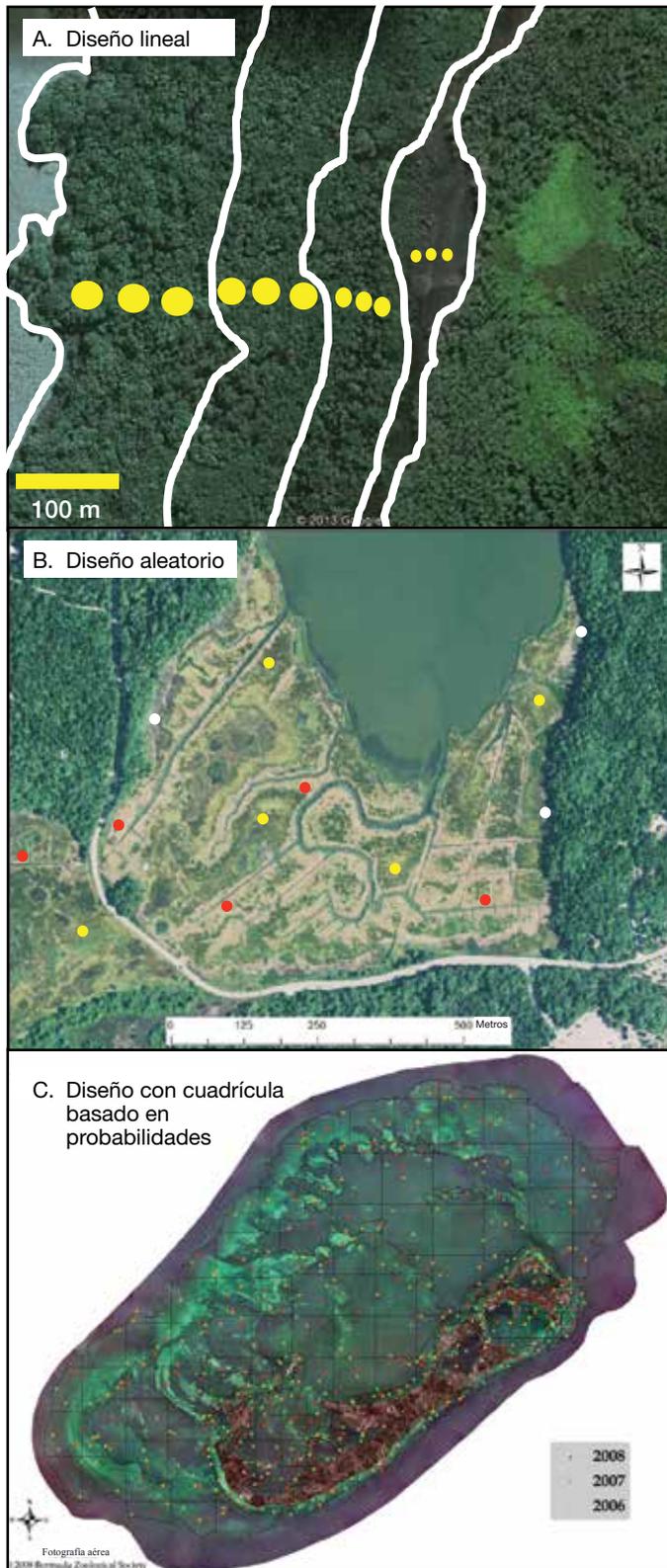
La ubicación de las parcelas debe decidirse para minimizar los disturbios al ecosistema y, a la vez, tener en cuenta la variación dentro de los estratos. Existen varios métodos para determinar la ubicación de las parcelas. Los más habituales son:

- 1) **Lineal:** Este método puede aplicarse cuando el procedimiento de estratificación muestre que los estratos se basan más lógicamente en las distancias desde un punto (río, costa, canal de marea) o cuando sea imposible atravesar la distancia entre parcelas establecidas al azar. No obstante, es posible que no se represente la variabilidad real (**Fig. 2.6a**).
- 2) **Aleatorio:** Dentro de cada estrato, las parcelas se seleccionan al azar para aumentar la probabilidad de captar la variación real dentro de los estratos y entre ellos (**Fig. 2.6b**).
- 3) **Cuadrícula basada en probabilidades:** Este método aplica celdas cuadradas o hexagonales superpuestas dentro de los estratos definidos, y se toma una muestra en un punto al azar dentro de cada celda. Este método permite que el muestreo se distribuya en forma uniforme a través de los estratos y que a la vez se mantengan las premisas necesarias para obtener muestras al azar (**Fig. 2.6c**).

El método elegido dependerá de la accesibilidad del sitio de estudio, pero, siempre que sea posible, se recomienda el diseño de parcelas aleatorio o con cuadrícula basada en probabilidades. Si los estratos se definieron adecuadamente, no habrá diferencias significativas entre parcelas. Si hubiera diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), es posible que sea necesario muestrear parcelas adicionales para obtener estimaciones sólidas, o simplemente reportar la variabilidad encontrada dentro del estrato. Esta última opción, no obstante, reduce la exactitud.

## FORMA Y TAMAÑO DE LAS PARCELAS

Existen muchos tamaños y formas aceptables de parcelas que pueden describir adecuadamente la composición, la biomasa y el contenido de carbono de un ecosistema. La forma y el tamaño de las parcelas se determinan en función del equilibrio entre la exactitud, el tiempo y el costo de la medición. Por ejemplo, las parcelas cuadradas de gran tamaño (por ejemplo, de 100 m<sup>2</sup>) son relativamente simples de definir, requieren únicamente equipos básicos para marcar los límites (cintas para medir y estacas), y tomar muestras en estas áreas es relativamente eficiente en términos de tiempo y recursos. No obstante, muestrear una pequeña cantidad de parcelas más grandes limita el área total que puede muestrearse. En consecuencia, es posible que no se represente toda el área del proyecto, por lo que las evaluaciones de carbono extrapoladas de estas parcelas no serán tan exactas. Por otro lado, muestrear muchas parcelas pequeñas y circulares (por ejemplo, 10 parcelas, 14 metros de diámetro) requerirá más tiempo y recursos, pero incluirá más variación en el área del proyecto y permitirá una contabilidad de carbono más exacta. Debido a eso, optar por muchas parcelas de menor tamaño será más conveniente cuando la variación dentro del área del proyecto sea alta y haya recursos disponibles.



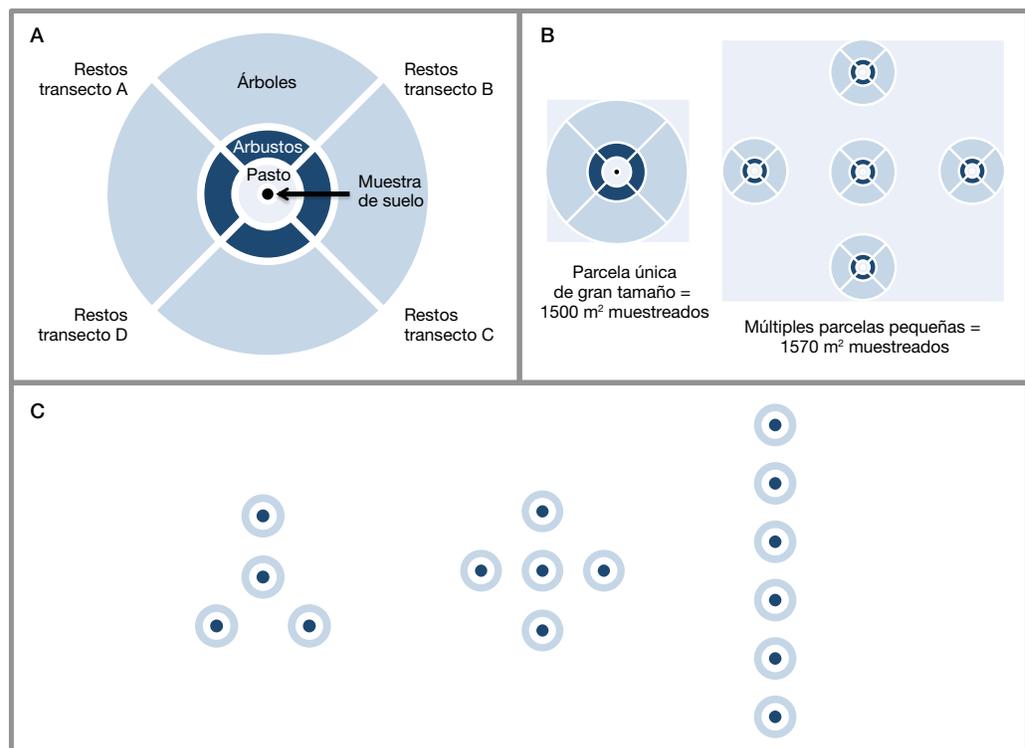
**Figura 2.6** Estrategias para la ubicación de parcelas. A) El diseño lineal de parcelas es habitual en áreas de vegetación densa donde es imposible atravesar la distancia entre sitios y donde hay un gradiente (© Boone Kauffman, OSU). B) El diseño aleatorio de parcelas ubica las parcelas al azar dentro de cada estrato. Esto garantiza que todos los estratos estén representados por igual (los puntos rojos, amarillos y blancos representan posibles sitios donde ubicar parcelas en la zona baja, alta y superior de la marisma, respectivamente) (© Beverly Johnson, Bates College). C) En el diseño de cuadrícula basada en probabilidades se utiliza software (por ejemplo, ArcView) para crear retículas que se superpongan a cada estrato y sean proporcionales a estos. Se utiliza software para generar puntos al azar en cada retícula a muestrear (© Sarah Manuel, Departamento de Servicios de Conservación, Bermudas)

El tamaño de las parcelas se determina principalmente por la resolución del mapa o el tamaño de la vegetación predominante. Basar el tamaño de las parcelas en la resolución del mapa es útil cuando se intenta validar técnicas de sensores remotos para generar mapas de carbono. El tamaño de las parcelas en función del tamaño de la vegetación puede variar dentro de la misma evaluación para incorporar distintos sumideros o estratos dentro de un sistema. Por ejemplo, en un sistema de manglares, los árboles y plantas de mayor tamaño se muestrean en las parcelas más grandes (por ejemplo, 100 m<sup>2</sup>). La alta densidad de árboles más pequeños, lianas y palmeras hace que sea práctico tomar muestras de estos en parcelas más pequeñas o en una serie de parcelas (por ejemplo, 10 m<sup>2</sup>). Se pueden tomar muestras de hojarasca, plántulas y pastos adecuadamente en parcelas incluso más pequeñas (por ejemplo, 1 m<sup>2</sup>). De forma similar, las parcelas para especies de pastos marinos de gran tamaño, como *Posidonia* spp, podrían ser más grandes (por ejemplo, 1 m<sup>2</sup>) que las parcelas para marismas donde predominan pastos (por ejemplo, 0.50 m<sup>2</sup>) o especies más pequeñas de pastos marinos, como *Halophila* spp o *Zostera* spp (por ejemplo, 0.25 m<sup>2</sup>).

### SUBPARCELAS Y CONGLOMERADOS

Si se requieren varios tamaños de parcela para muestrear, a menudo es más eficiente determinar el tamaño mayor necesario y anidar las parcelas más pequeñas dentro de la más grande. Las parcelas anidadas se diseñan de forma tal que los componentes vegetales de mayor tamaño (por ejemplo, los árboles) se miden en toda la parcela, pero los componentes más pequeños (por ejemplo, los arbustos y los pastos) se miden en un área más pequeña de la parcela más grande (**Fig. 2.7a**). Los conglomerados se dan cuando el área de la parcela más grande se divide en subparcelas de forma tal que el área total que se muestrea sigue siendo la misma, pero el diseño del conglomerado es capaz de captar más variación dentro de una parcela aumentando así la exactitud total.

Por ejemplo, se puede determinar que el área de un manglar requiere una parcela circular con un área aproximada de 1520 m<sup>2</sup> (radio de 22 m) para los componentes más grandes, pero que para los componentes más pequeños serían adecuadas parcelas anidadas con un área aproximada de 250 m<sup>2</sup> (radio de 9 m).



**Figura 2.7** Diseños con parcelas anidadas y conglomeradas. A) Diseño con parcela anidada en el que las parcelas más pequeñas están en el centro. B) Ejemplo de cobertura espacial con parcelas únicas de gran tamaño versus múltiples parcelas pequeñas. El área muestreada es similar, pero el área total representada es mayor con parcelas múltiples. C) Ejemplos de diseños de parcelas conglomeradas en forma radial y lineal. (USDA 2008; Kauffman & Cole 2010; Donato *et al.* 2011; Kauffman & Donato 2011)

El área total que se debe medir puede dividirse en cinco subparcelas formadas por una subparcela mayor con un radio de 10 m (~ 314 m<sup>2</sup> \* 5 subparcelas = 1570 m<sup>2</sup>) y subparcelas anidadas con un radio de 4 m (~ 50 m<sup>2</sup> \* 5 subparcelas = 250 m<sup>2</sup>). En definitiva, el área total muestreada es prácticamente la misma, pero las subparcelas conglomeradas reducen la variación entre parcelas y, por lo tanto, la cantidad total de parcelas necesarias para alcanzar la exactitud deseada (USDA 2008; Kauffman & Donato 2011) (**Fig. 2.7b**).

Es importante tener en cuenta algunas consideraciones prácticas al planificar el diseño y la distribución de subparcelas para el muestreo. La distribución de subparcelas en forma lineal tiene muchos beneficios (**Fig. 2.7c**). Las subparcelas lineales facilitan las maniobras en manglares densos o en marismas lodosas, minimizan los daños por pisoteo e incorporan la variación a lo largo de un gradiente natural. Un diseño con parcelas radiales podría ser más apropiado para sitios más pequeños y arrojar datos más representativos.

## Determinar la frecuencia de la medición

La frecuencia necesaria para realizar (y repetir) evaluaciones de las existencias de carbono depende de los objetivos de la evaluación y del nivel de cambio que se espera en el ecosistema estudiado. Las existencias de carbono de manglares, marismas y praderas de pastos marinos pueden cambiar por diversas razones que varían en impacto y respuesta en el tiempo. Estos cambios pueden incluir disturbios naturales (por ejemplo, tifones), variaciones en la productividad de las plantas y tasas naturales de secuestro de carbono, cambios en la cobertura de la tierra debido a actividades de uso de la tierra (por ejemplo, acuicultura o agricultura en tierras altas), y alteraciones debidas al cambio climático (por ejemplo, aumento del nivel del mar). La frecuencia del muestreo también implica establecer requisitos para la regulación, gestión o financiamiento, y la disponibilidad de recursos. También depende del sumidero que se esté midiendo. Por ejemplo, el sumidero de la biomasa aérea en los lechos de pastos marinos cambiará más rápidamente que la existencia de carbono de los suelos subyacentes. Además, los patrones estacionales de crecimiento y muerte de la biomasa aérea viva oscilan a lo largo del año y lo más probable es que se cancelen mutuamente. Para medir la existencia en pie, recomendamos realizar el muestreo durante el pico de la biomasa aérea (por lo general, a fines del verano). En caso de repetir las muestras, estas deberán tomarse en la misma época del año (Fourqurean *et al.* 2001).

Dada la dinámica de un ecosistema de carbono azul, basta con intervalos de aproximadamente cinco años para monitorear los sumideros aéreos (Pearson *et al.* 2005; Pearson *et al.* 2007). En el caso de sumideros de carbono que responden más lentamente (por ejemplo, suelos asociados a manglares, marismas y praderas de pastos marinos), podrán aplicarse períodos más largos, tal vez 10 o incluso 20 años entre eventos de muestreo, cuando no hayan ocurrido perturbaciones repentinas que afecten la integridad del suelo. No obstante, con intervalos más largos se corre el riesgo de omitir disturbios naturales o antrópicos (Pearson *et al.* 2007). Por lo tanto, eventos irregulares o inesperados, tales como intensas tormentas tropicales, rápido aumento del nivel del mar o cambio en el uso de la tierra, podrían justificar muestreos con intervalos más frecuentes que los originalmente planeados.

## CONCLUSIÓN

Es indispensable contar con un proyecto diseñado con el objetivo final en mente para obtener estimaciones confiables y sólidas de las existencias de carbono. Los diseños de los proyectos variarán en función de los requisitos locales y del tipo de ecosistema. Una vez que se hayan determinado los detalles del proyecto, se podrán comenzar las mediciones. Las técnicas de campo para medir la biomasa aérea viva y subterránea en distintos ecosistemas varían según se trate de manglares, marismas o praderas de pastos marinos, y se describen en las secciones específicas sobre ecosistemas en el Capítulo 4. No obstante, las técnicas para muestrear el carbono contenido en sedimentos y suelos pueden aplicarse, por lo general, a los tres ecosistemas y se analizan en el Capítulo 3.

**Paso 1: Definir los límites del proyecto**

- Depende del alcance y del objetivo del proyecto (desde una sola área hasta evaluaciones de escala nacional).
- Asegurarse de que el área que se evaluará represente adecuadamente la diversidad de especies y formas de vida de ese ecosistema.

**Paso 2: Estratificar el área del proyecto**

- Si el área del proyecto está formada por una diversidad de estructuras biológicas distintas (por ejemplo, áreas con manglares de árboles altos, manglares de árboles bajos y palmeras), podría ser conveniente estratificar el área del proyecto en subsecciones de unidades o estratos relativamente homogéneos.
- Los sensores remotos y las imágenes satelitales son útiles para este propósito, pero también se requiere conocimiento local.
- Se debe procurar no incluir ecosistemas marinos, de tierras altas, o de agua dulce adyacentes.

**Paso 3: Decidir qué sumideros de carbono medir**

- Los sumideros de carbono que se miden habitualmente son:
  - Biomasa aérea viva (árboles, arbustos, pastos, etc.).
  - Biomasa aérea muerta (madera caída, hojarasca, etc.).
    - Puede que no sea relevante para todos los ecosistemas. Las marismas y las praderas de pastos marinos no contienen sumideros suficientemente grandes de madera caída y hojarasca debido a la composición de la vegetación local y a que las mareas y las corrientes se encargan de remover los restos.
  - Biomasa subterránea de vegetación viva (raíces y rizomas).
    - El muestreo dependerá de la factibilidad.
  - Suelo.
    - El sumidero más rico en carbono de estos ecosistemas.
- Un sumidero debería medirse si:
  - Es grande.
  - Es probable que se vea afectado por el uso de la tierra.
  - El uso futuro de la tierra es incierto.
  - El tamaño del sumidero es incierto.
- Determinar el tipo, la forma, el tamaño, la cantidad y la ubicación de las parcelas para la medición.
  - Tipo:
    - Decidir si las parcelas van a ser temporales (medición única) o permanentes (monitoreo continuo).
  - Forma y tamaño:
    - Se pueden obtener datos confiables a partir de parcelas circulares o rectangulares.
    - La forma y el tamaño de las parcelas se determina por el nivel de exactitud deseado, el tiempo, el riesgo y el costo.
    - Se recomienda un diseño de parcelas anidadas con tamaños que correspondan a la escala espacial del componente de interés.
  - Cantidad
    - Debería haber una cantidad de parcelas suficiente como para alcanzar un alto nivel de certeza estadística ( $p < 0.05$ ).
    - Está disponible en Internet una herramienta para calcular la cantidad de parcelas necesarias: [www.winrock.org/Ecosystems/tools.asp](http://www.winrock.org/Ecosystems/tools.asp).
    - Si el área del proyecto está estratificada, la cantidad de parcelas debe determinarse para cada estrato.
  - Ubicación:
- Para evitar sesgos, la selección de parcelas debería ser aleatoria (por ejemplo, a lo largo de un transecto) y sin conocimiento previo de la composición o la estructura de los estratos.

**Paso 4: Determinar la frecuencia de la medición**

- Depende de la velocidad del cambio anticipado (desastres naturales, cambio en el uso de la tierra, cambio climático, etc.), los requisitos de participación en los mercados de carbono y el costo que implica el muestreo y el análisis en laboratorio en relación con los recursos disponibles.
- Las mediciones anuales pueden arrojar las mejores estimaciones pero son costosas y, a menudo, esta frecuencia es mayor de la necesaria para monitorear los cambios.
- Los intervalos de 5 años son habituales y coinciden con las recomendaciones para participar en mercados de carbono.
- Los intervalos de 10 a 20 años también son habituales, pero se corre el riesgo de omitir disturbios naturales o antrópicos.