

Conceptos y técnicas en ecología fluvial

Edición a cargo de:

ARTURO ELOSEGI

Profesor titular de Ecología en la Universidad del País Vasco

SERGI SABATER

Catedrático de Ecología en la Universidad de Girona

Separata del capítulo 8

Retención de nutrientes en ecosistemas fluviales

EUGÈNIA MARTÍ

FRANCESC SABATER

Primera edición: abril 2009

ISBN: 978-84-96515-87-1

© los autores, 2009

© de la edición en español, Fundación BBVA, 2009

Retención de nutrientes en ecosistemas fluviales

EUGÈNIA MARTÍ Y FRANCESC SABATER

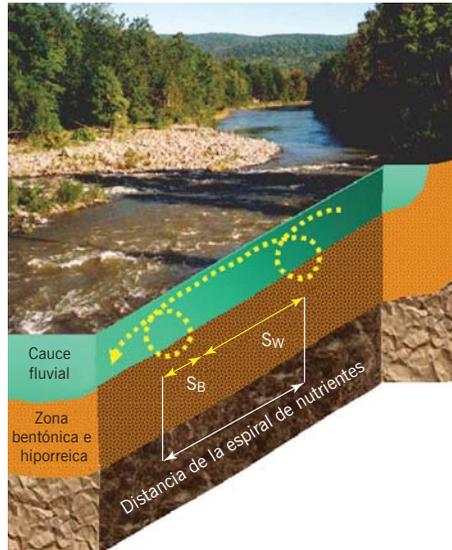
8.1. Introducción

Los ecosistemas fluviales son sistemas abiertos expuestos a una entrada continua de materiales particulados y disueltos procedentes de la cuenca de drenaje. Parte de este material es procesado por los organismos. En concreto, estos ecosistemas se caracterizan por su elevada capacidad de transformar y retener nutrientes (Peterson et al. 2001). Webster y Patten (1979) propusieron un nuevo concepto para describir la dinámica de nutrientes en ríos, acuñando el término *espiral de nutrientes*, que combina la retención y el transporte (fig. 8.1). Este nuevo concepto incidía en que el ciclo de un nutriente en un sistema fluvial no ocurre en un mismo tramo, sino que se cierra aguas abajo. Así, la forma de la espiral depende de la velocidad de reciclaje del nutriente y de la velocidad a la que es transportado aguas abajo (Newbold 1992). Por tanto, el acoplamiento entre la retención biótica y el transporte se puede llegar a cuantificar en unidades de longitud, de modo que la espiral de nutrientes se describe como la longitud de una espira a través de los dos compartimentos fluviales, la biota y la columna de agua (fig. 8.1). Esta longitud es la suma de dos distancias: la distancia de asimilación (S_w) y la distancia de retorno (S_b) (Newbold et al. 1981). La *distancia de asimilación* es la que corresponde al promedio que recorre un nutriente en su forma disuelta a lo largo del río hasta que es asimilado por la biota, y la *distancia de retorno* es la que recorre un átomo en el compartimento biótico hasta que es regenerado de nuevo al agua. En general, la mayor parte de la longitud de la espiral de nutrientes corresponde a la distancia de asimilación (Newbold et al. 1981).

A diferencia de los ecosistemas lacustres, en los ríos los nutrientes se reciclan conforme el agua circula hacia abajo, formando así una espiral de nutrientes

Figura 8.1:

Ilustración esquemática de la espiral de nutrientes (línea de puntos) y los dos componentes de la distancia de la espiral: la distancia de asimilación (S_A) y la distancia de retorno (S_R)



Estas distancias son el resultado de las distintas tasas de procesamiento y de retención de nutrientes del ecosistema fluvial (Stream Solute Workshop 1990). Así pues, la distancia de asimilación indica la eficiencia de retención de un nutriente por el ecosistema fluvial, es decir, la tasa de retención relativa al flujo del nutriente. Distancias cortas indican que el nutriente disuelto es retenido eficientemente. A su vez, la distancia de retorno nos indica la retentividad (es decir, capacidad de asimilación y transferencia a la red trófica) por parte de la biota fluvial, por lo que distancias de retorno largas indican que el ecosistema fluvial tiene una elevada retentividad.

La espiral de nutrientes informa de la afinidad del ecosistema por un nutriente determinado

Como el reciclado de nutrientes es, en gran medida, un proceso biótico, la forma de las espiras a lo largo de un río es el resultado de la relación entre la eficiencia de asimilación y la retentividad de los nutrientes por parte de la biota (Sabater y Martí 2000). De tal modo, la estructura jerárquica de los ríos determina cómo varía el reciclaje de nutrientes en función de las comunidades que se suceden a lo largo del gradiente fluvial. En los ríos, la mayor parte de la actividad biológica está asociada a los organismos bentónicos, que a su vez están influenciados por las concentraciones de nutrientes y por el tiempo de residencia de éstos en la columna de agua (Elwood et al. 1983). Y por supuesto, la capacidad de asimilación varía con el tipo de comunidad fluvial, ya que depende de las estrategias vitales, de la fenología y de la complejidad de la estructura trófica.

Las comunidades fluviales retienen una fracción de los nutrientes disponibles y los transfieren a través de las redes tróficas, de modo que reducen temporalmente la carga de nutrientes aguas abajo. Así, el flujo de nutrientes en los ríos depende de la rela-

ción entre la retención y la regeneración de nutrientes, y de la entrada continua de nutrientes procedentes de la cuenca de drenaje. Por tanto, considerando la variación longitudinal de dichos factores a lo largo del gradiente fluvial, puede esperarse que la longitud total de la espira tienda a incrementarse río abajo (Sabater y Martí 2000).

Hay distintas métricas para expresar la retención de nutrientes en ríos, pero todas derivan de la distancia de asimilación (Stream Solute Workshop 1990). Entre ellas destacan la velocidad de asimilación y la tasa de asimilación por unidad de superficie. La *velocidad de asimilación* (m/s) es aquella en que una molécula de nutriente se mueve desde la columna de agua al sedimento, y es un índice de la demanda biológica de nutrientes (Hall et al. 2002). La *tasa de asimilación* (mg/s·m²) es la masa de nutriente retenida por unidad de superficie y por unidad de tiempo, e indica la capacidad de retención de nutrientes por parte del río. Estas dos métricas permiten caracterizar diferentes aspectos de la retención de nutrientes en ríos y aportan información complementaria (Webster y Valett 2006). La velocidad y la tasa de asimilación permiten corregir el efecto del flujo de nutrientes sobre la distancia de asimilación, ya que, como hemos dicho, la distancia de la espira depende de la velocidad de la corriente y de la carga de nutrientes. De esta manera, la velocidad de asimilación corrige el efecto del caudal sobre la retención, y la tasa de asimilación corrige el efecto de la carga basal de nutrientes. Así, estas dos métricas permiten comparar la retención de nutrientes entre ríos distintos.

El estudio de la retención de nutrientes en ríos se ha abordado tradicionalmente a partir de la adición de nutrientes en tramos fluviales de centenares de metros. La adición se puede realizar a *flujo constante* durante un tiempo suficiente para asegurar que la concentración añadida esté repartida homogéneamente por todo el tramo de estudio, o de *forma instantánea*. Los resultados del primer método permiten calcular directamente la distancia de asimilación a partir de la obtención de una tasa de retención por unidad de longitud de río. Con los resultados derivados del segundo método se obtienen tasas de retención por unidad de tiempo. No obstante, las tasas obtenidas a partir de las dos técnicas son intercambiables a partir de la velocidad promedio del agua (véase ecuación 8.10, en la página 130) (Runkel 2007). Recientemente, el uso de isótopos estables en adiciones a flujo constante ha permitido no sólo medir la distancia de asimilación, sino también la distancia de retorno (es decir, el flujo de nutrientes a través de la red trófica, Mulholland et al. 2000). Todas estas técnicas sólo se pueden aplicar a ríos pequeños o medianos (con caudales menores de 500 L/s) debido al volumen de adición necesario. La retención de nutrientes en ríos más grandes se suele estimar a partir de un balance de masas entre las entradas y las salidas en un tramo de río. En este caso y, a diferencia de los valores obtenidos con la adición de nutrientes, el valor de retención se obtiene del balance neto entre la retención y la regeneración de nutrientes y, además, es dependiente de la longitud de tramo considerado.

La retención de nutrientes se puede medir mediante balance de masas, o mediante adiciones, en continuo o instantáneas

Técnica 13. Retención de nutrientes

Técnica 13a. Adición en continuo

La macro 8.1 permite calcular las disoluciones a realizar, y las métricas de retención, tanto para adiciones en continuo como a flujo constante

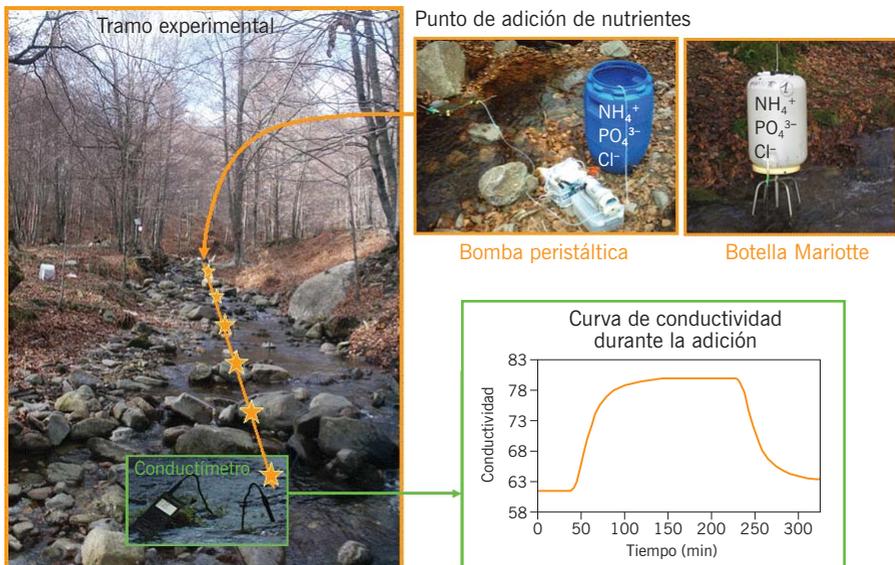
Este método permite estimar la retención de nutrientes en los ríos a partir del cálculo de la distancia de asimilación y los parámetros derivados de ésta (velocidad de asimilación y tasa de asimilación). Para ello, se incrementa ligeramente la concentración basal de nutrientes añadiendo, a flujo constante, una solución concentrada, y se cuantifica la tasa de retención por unidad de longitud del río a partir del patrón de variación de la concentración de nutriente en un determinado tramo. Para que esta tasa obtenida refleje la tasa de retención del ecosistema en condiciones basales de nutrientes, la adición no debe aumentar la concentración de nutrientes hasta saturar el sistema. Esta tasa es independiente de la longitud de tramo seleccionado para realizar el experimento.

Es importante no saturar el tramo de nutrientes

Para la adición en continuo hay que seleccionar un tramo de río de unos centenares de metros, e identificar un número de estaciones de muestreo distribuidas en progresión geométrica. Al inicio del tramo se añade un nutriente (o una combinación de varios) junto con un trazador hidrológico (por ejemplo, véase técnica 2) a flujo constante hasta que la solución añadida se haya mezclado completamente

Figura 8.2:

Esquema de la puesta a punto del tramo experimental para la realización de una adición de nutrientes en continuo



Nota: La figura muestra dos opciones para añadir la solución de nutrientes y trazador hidrológico a flujo constante: una bomba peristáltica y una botella Mariotte. Los puntos de muestreo a lo largo del tramo se indican con estrellas. El gráfico muestra la variación de la conductividad durante el transcurso de la adición al final del tramo; indicando el incremento inicial debido a la advección, las condiciones de meseta (es decir, mezcla completa de la solución a lo largo del tramo) y el decremento debido al cierre de la adición.

con el agua de todo el tramo (fig. 8.2). Antes de la adición, y también una vez se ha alcanzado una mezcla completa de la solución en el tramo, se recogen muestras de agua en cada uno de los puntos de muestreo para el posterior análisis de la concentración tanto del trazador como del nutriente. Los cambios en la concentración del nutriente a lo largo del tramo (corregidos por las concentraciones basales) son debidos tanto a factores físicos (dilución) y químicos (precipitación) como biológicos (asimilación, nitrificación, desnitrificación). Por otra parte, los cambios en la concentración del trazador hidrológico sólo son debidos a factores físicos. Por ello, los datos del trazador hidrológico se utilizan para corregir el efecto de dilución sobre la concentración de nutrientes y así poder cuantificar la tasa de cambio asociada sólo a procesos de retención bióticos o químicos.

Junto con la adición, conviene tomar medidas de parámetros ambientales (luz, temperatura, retención hidráulica) y biológicos (biomasa del biofilm, materia orgánica bentónica), ya que éstos influyen en la retención de nutrientes.

CONSIDERACIONES PREVIAS A LA ADICIÓN

Consideraciones espaciales

Los tramos deben ser representativos de las características morfológicas del río para poder extrapolar los datos a la respuesta del río. La longitud del tramo está en función del caudal y tamaño del río. El tramo seleccionado ha de ser suficientemente largo para poder detectar variaciones longitudinales en la concentración de nutrientes entre los distintos puntos de muestreo, pero suficientemente corto para evitar entradas laterales o verticales de agua. Por ejemplo, para caudales menores de 50 L/s se aconseja un tramo de entre 100-150 m, mientras que para caudales hasta 100 L/s el tramo debería ser de entre 200-300 m. Dentro del tramo seleccionado se definen un mínimo de 5 puntos de muestreo, separados siguiendo una distribución geométrica. El primer punto de muestreo se debe colocar a una distancia del punto de adición que asegure la mezcla completa entre la solución añadida y el flujo del río.

Consideraciones temporales

La adición debe prolongarse hasta que la solución añadida llegue a condiciones estacionarias (meseta) al final del tramo. Esto indica que la solución se ha mezclado homogéneamente a lo largo del mismo. Una manera de saber que se han alcanzado estas condiciones es midiéndolo en continuo la conductividad (como indicadora del trazador hidrológico, fig. 8.2) al final del tramo. Una vez la solución esté bien mezclada en el tramo, la conductividad se mantendrá constante al final del mismo. En condiciones de meseta se deben recoger las muestras de agua en todos los puntos de muestreo en el mínimo tiempo posible para evitar que parte del nutriente retenido vuelva de nuevo a la columna de agua.

Una vez alcanzadas las condiciones de mezcla hay que tomar muestras en el menor intervalo posible

Consideraciones técnicas

Es muy importante mantener el flujo de adición constante, y por tanto, es necesario asegurar el buen funcionamiento de la bomba peristáltica y de su fuente de alimentación o, alternativamente, de la botella Mariotte. Se recomienda medir varias veces el flujo de adición al inicio y al final del experimento. Es importante situar el punto de adición en una zona del río angosta y con turbulencia suficiente para que la solución se mezcle rápidamente con el agua del río. Si dichas características no se encuentran en el tramo de estudio, se debe introducir algún mecanismo que facilite la mezcla.

Se aconseja elevar la concentración de nutrientes hasta superar en dos o tres veces la concentración basal

La cantidad de nutriente añadida debe ser suficiente para poder detectar cambios entre las concentraciones basales y las de meseta. No obstante, la concentración resultante no debería ser muy elevada si se quiere estimar la retención de nutrientes en condiciones basales. El incremento debería estar dentro del rango de respuesta lineal entre la concentración de nutrientes y la tasa de asimilación (Mulholland et al. 1990, Payn et al. 2005). Si no se dispone de dicha información, incrementos de dos o tres veces la concentración basal suelen ser aceptables. Para calcular la cantidad de reactivo necesario para elevar la concentración resultante al nivel deseado se supone que el flujo de nutrientes resultante (F_r) debe ser igual a la suma del flujo de nutrientes en el agua del río (F_a) y el flujo añadido mediante la adición de la solución (F_s). El flujo de nutrientes se define como el producto de su concentración (C) por el caudal (Q), con lo que el balance de masas se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$F_r = F_s + F_a \quad (8.1)$$

$$C_r(Q_r + Q_s) = (C_s Q_s) + (C_a Q_a) \quad (8.2)$$

donde C_r : concentración resultante en el río, C_s : concentración de la solución añadida, C_a : concentración basal del río, Q_r : caudal del río, y Q_s : caudal de la adición de la solución.

A partir de esta ecuación, la concentración de nutrientes en la solución para obtener un incremento de X veces la concentración del agua del río se calcula de la siguiente manera:

$$C_s = \frac{[XC_a(Q_s + Q_a)] - (C_a Q_a)}{Q_s} \quad (8.3)$$

La concentración estimada de nutriente en la solución depende del caudal y de la concentración basal de nutrientes en el río en el momento de la adición. Por ello, si la solución se prepara en el laboratorio, puede ser que el valor resultante final

no sea el deseado, y la única alternativa posible sea la de variar el flujo de la bomba si ésta lo permite. Para evitar este problema, es recomendable calcular la cantidad de nutrientes de la solución en el campo después de haber hecho una estimación rápida de caudal (técnicas 3a y 3b) y de la concentración de nutrientes en el río utilizando un kit analítico de campo.

MATERIAL NECESARIO

- Cinta métrica.
- Estacas o cinta adhesiva y rotulador para marcar los puntos de muestreo.
- Bidón de 20-50 L para preparar la solución.
- Probeta de 2 L para preparar la solución.
- Reactivos de adición: sales de compuesto conservativo (NaCl, NaBr) y sales de compuestos reactivos (NH_4Cl , NaNO_3 , $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
- Balanza de campo para pesar los reactivos de la solución (precisión 0,5 mg).
- Bomba peristáltica con batería, o botella Mariotte (véase fig. 8.2).
- Cronómetro.
- Probeta de 25-50 mL para medir el flujo de adición.
- Conductímetro, mejor si tiene *datalogger*.
- Frascos para muestrear agua.
- Filtros Whatman GF/F y portafiltros para filtrar directamente en el campo las muestras (recomendable para evitar contaminación).
- Viales para guardar las muestras de agua. El número total depende de los puntos de muestreo que se seleccionen a lo largo del tramo y del número de réplicas analíticas por punto que se desee tomar (mínimo tres para la concentración basal y meseta).
- Nevera portátil.

PROTOCOLO DE CAMPO

1. Seleccionar el tramo de estudio y medir su longitud.
2. Seleccionar el punto de adición, donde el agua fluya en un solo canal confinado y turbulento para facilitar la mezcla. Si es necesario, añadir piedras o alguna estructura artificial para incrementar la turbulencia.
3. Definir seis puntos de muestreo distribuidos a lo largo del tramo. Marcar los puntos. Anotar las distancias de los puntos en relación al punto de adición, y medir la anchura del río en cada uno.
4. Mezclar los reactivos (trazador hidrológico y nutrientes) ya pesados con un poco de agua del río en el bidón para preparar la solución. Asegurar que se mezclen bien. Terminar de llenar el bidón con agua hasta llegar al volumen deseado de solución. Evitar que el agua añadida sea turbia. Recoger una muestra de la solución final para su posterior análisis y medir su conductividad.

Es importante analizar la solución vertida

5. Instalar la bomba peristáltica y la batería en el punto de adición. Comprobar que funcione bien utilizando sólo agua del río.
6. Medir el flujo de adición utilizando una probeta de 25-50 mL y un cronómetro. Repetir la medida al menos tres veces.
7. Instalar un conductivímetro en el último punto de muestreo del tramo. Colocar la sonda en el punto central del río. Anotar la conductividad inicial.
8. Recoger muestras de agua (tres réplicas) en el punto central del tramo para cada uno de los puntos de muestreo antes de iniciar la adición. Estas muestras servirán para medir las concentraciones basales de trazador y nutrientes en el tramo. En cada punto medir también la conductividad basal y la temperatura. Evitar pisotear o remover el cauce del río durante la recogida de muestras.
9. Poner en marcha la bomba y empezar a verter la solución al río. Poner en marcha el cronómetro y anotar la fecha y la hora de inicio de la adición. Asegurarse que el flujo de adición es constante.
10. Anotar los cambios de conductividad en el último punto del tramo a intervalos de tiempo regulares (por ejemplo, cada 5 o 10 segundos). Alternativamente, el conductivímetro puede estar conectado a un *datalogger* y programado para recoger y almacenar datos automáticamente cada cierto tiempo.
11. Una vez los valores de conductividad se mantengan estables (condiciones de meseta) esperar unos 15 minutos y recoger tres muestras de agua en cada uno de los puntos.
12. Una vez recogidas las muestras, cerrar el flujo de adición y anotar la hora.
13. Seguir anotando los cambios de conductividad al final del tramo hasta que la conductividad vuelva a las condiciones basales. Este punto sólo será necesario si se quieren obtener medidas hidráulicas.
14. Filtrar las muestras de agua y guardarlas en una nevera para su transporte al laboratorio.
15. En el laboratorio, guardar las muestras de agua en el refrigerador si se realizan los análisis químicos antes de 48 horas, o congelarlas hasta su análisis.

CÁLCULO DE PARÁMETROS

Los resultados de las concentraciones de nutrientes y del trazador hidrológico (o en su caso, la conductividad) obtenidos a partir de la adición permiten el cálculo directo de una de las tres métricas de retención de nutriente, la distancia de asimilación (S_w), (véase fig. 8.3). El cálculo de las otras dos métricas, la velocidad de asimilación (V_p) y la tasa de asimilación (U), derivan de la primera.

El cálculo de S_w se basa en la variación, a lo largo del tramo, de la concentración de nutriente añadida (es decir, concentración a meseta menos concentración basal), corregida por la variación del trazador hidrológico añadido (o lo que es

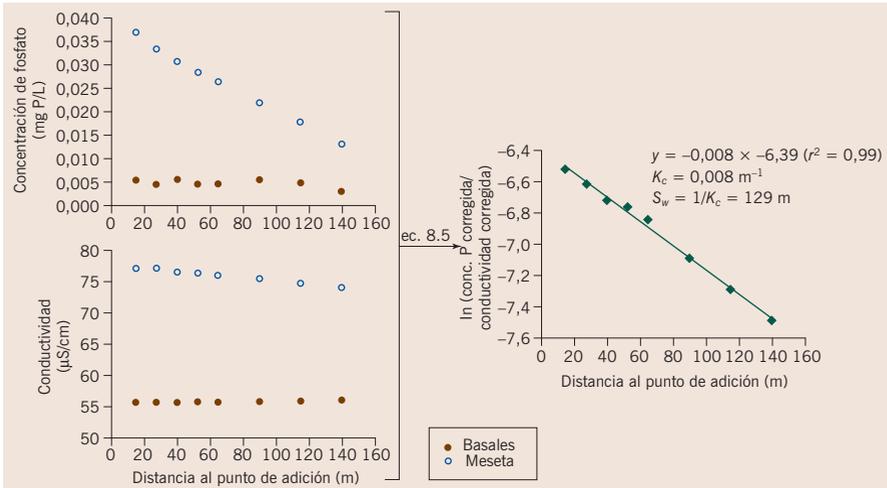


Figura 8.3: Variación longitudinal de la conductividad y la concentración de fosfato en el tramo experimental a partir de la realización de una adición a flujo constante de nutrientes y trazador hidrológico

Nota: Los gráficos muestran los valores en condiciones basales y en meseta. La figura también muestra la variación longitudinal de la relación entre la concentración de nutriente y de trazador hidrológico (calculada a partir de la ecuación 8.5) y la obtención de la tasa de retención por unidad de longitud de río (K_c) y de la distancia de asimilación (S_w).

lo mismo, la variación de caudal (Q) entre puntos (fig. 8.3). Si asumimos que la tasa de retención de nutrientes es constante a lo largo del tramo, el patrón de variación resultante puede ser caracterizado por la siguiente ecuación de primer orden:

$$C_x \left(\frac{Q_x}{Q_0} \right) = C_0 e^{-K_c x} \tag{8.4}$$

donde C_0 : concentración de nutriente añadida en el punto de muestreo inicial, corregidas por la concentración añadida de trazador hidrológico o la variabilidad en el caudal, C_x : concentración de nutriente en cada uno de los puntos restantes, K_c : tasa de retención de nutrientes por unidad de longitud de río (m^{-1}), y X : distancia de cada punto de muestreo al punto de adición (m).

La K_c es la pendiente de la función lineal obtenida al transformar la ecuación exponencial a logarítmica (fig. 8.3):

$$\ln \left(C_x \frac{Q_x}{Q_0} \right) = \ln(C_0) - K_c x \tag{8.5}$$

K_c se obtiene a partir de una regresión lineal entre el logaritmo neperiano de la concentración de nutrientes añadida para cada punto de muestreo y la distancia de cada uno de estos puntos al punto de adición. El inverso de K_c es S_w (m).

La velocidad de asimilación (V_f , en m/s) y la tasa de asimilación por unidad de superficie (U , en mg/m²s) se calculan a partir S_w utilizando las siguientes ecuaciones:

$$V_f = \frac{h v}{S_w} \quad (8.6)$$

$$U = \frac{C_b Q}{S_w w} \quad (8.7)$$

donde h : profundidad media (m), v : velocidad media (m/s), w : anchura media (m), Q : caudal (L/s), y C_b : concentración basal del nutriente en el tramo de estudio (mg/L).

La concentración basal se obtiene a partir del valor medio de la concentración basal medida en los diferentes puntos de muestreo. Los parámetros hidráulicos v y Q se pueden estimar a partir de la curva de variación de conductividad durante la adición registrada al final del tramo (técnica 3a). La anchura media del río en el tramo de estudio se puede estimar a partir de las anchuras medidas en los diferentes puntos de muestreo seleccionados. Finalmente, h se puede inferir a partir de los valores de v , w y Q .

Técnica 13b. Adición instantánea

La macro 8.1 permite calcular las disoluciones a realizar, y las métricas de retención, tanto para adiciones en continuo como a flujo constante

Esta técnica se basa en la adición instantánea de un volumen conocido de una solución de nutriente y trazador hidrológico en un punto del río y el posterior seguimiento de la pluma de nutrientes que se genera aguas abajo a una distancia conocida del punto de adición. A diferencia de la técnica anterior, en ésta no se alcanzan condiciones homogéneas a lo largo del tramo, lo que la hace menos aconsejable. Dado que el nutriente añadido no se reparte por igual por todo el tramo y el tiempo de contacto con el sustrato es mucho menor, cabe esperar que la tasa de asimilación resultante sea menor que con la técnica anterior, y sólo se aproxime en el caso de que la velocidad y el caudal sean bajos.

La adición instantánea es una opción aceptable en tramos de caudal más elevado

No obstante, esta metodología es una alternativa a tener en cuenta cuando el caudal o las concentraciones de nutrientes del río son muy elevados. En estas condiciones, la cantidad de solución necesaria para llegar a condiciones de meseta utilizando una adición en continuo es impracticable. La adición instantánea es algo más sencilla que la adición en continuo, ya que sólo requiere preparar la solución en un bidón y colocar el conductímetro y las botellas para recoger muestras al final del tramo. No obstante, el esfuerzo de muestreo es más intenso y se suele generar un mayor número de muestras para su posterior análisis.

En general, las consideraciones preliminares expuestas en la técnica anterior también sirven para esta técnica. No obstante, el cálculo de la cantidad de reactivo necesaria para preparar la solución difiere de la técnica anterior. En este caso, la cantidad de reactivo a añadir se estima a partir de la adición previa de un trazador hidrológico (por ejemplo, NaCl), que permita evaluar el factor de dilución en el punto final del tramo midiendo la concentración del soluto respecto al tiempo. A partir de esta curva, y conociendo la concentración basal de nutriente, se recalcula la curva teórica para obtener un incremento máximo deseado de concentración de nutriente en este punto final mediante un balance de masas. Con esta curva se calcula la masa de reactivo que debe añadirse a partir de la integración de la curva teórica. Esta masa de nutriente es la que se utilizará para preparar la solución de la adición.

MATERIAL NECESARIO

- Cinta métrica.
- Bidón de 20-50 L para preparar la solución.
- Probeta de 2 L para preparar la solución.
- Reactivos de adición: sales de compuesto conservativo (NaCl, NaBr) y sales de compuestos reactivos (NH_4Cl , NaNO_3 , $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
- Balanza de campo para pesar los reactivos de la solución (precisión 0,5 mg).
- Cronómetro.
- Conductímetro, mejor si tiene *datalogger*.
- Botellas para muestras de agua.
- Filtros Whatman GF/F y portafiltros para filtrar directamente en el campo las muestras (recomendable para evitar la contaminación).
- Nevera portátil.

PROTOCOLO DE CAMPO

1. Seleccionar el tramo de estudio y medir su longitud.
2. Llenar el bidón de la solución con un poco de agua y añadir las sales de nutrientes y del trazador hidrológico. Mezclar la solución hasta que los reactivos estén completamente disueltos. Una vez la solución esté mezclada, añadir el resto de agua del río hasta el volumen de adición estimado.
3. Anotar la cantidad de reactivos añadidos y el volumen total de la solución. Medir la conductividad y recoger una muestra de agua para su posterior análisis. No olvidar este paso antes de verter la solución al río, los datos son necesarios para los cálculos posteriores.
4. Instalar un conductímetro al final del tramo. Colocar la sonda en el punto central del río. Anotar la conductividad inicial. Si se dispone de *datalogger*, conectarlo, anotar la hora y empezar las mediciones.

5. Recoger tres muestras de agua al final del tramo para medir la concentración basal de nutrientes.
6. Preparar los botes para tomar las muestras de agua al final del tramo.
7. Verter la solución del bidón lo más rápidamente posible al inicio del tramo, en un punto donde se pueda mezclar fácilmente con el agua del río y empezar a cronometrar el tiempo. Anotar la hora de adición.
8. Si no se dispone de *datalogger*, iniciar la lectura de los valores de conductividad al final del tramo. Esta lectura manual se puede realizar a intervalos regulares o cada vez que la conductividad varíe. La frecuencia de las lecturas debe adecuarse para poder describir la curva del paso del pulso de la adición al final del tramo.
9. A la vez que se inician las medidas de conductividad, iniciar la recogida de muestras de agua en el punto final del tramo. La frecuencia de muestreo debe ir en paralelo a la recogida de datos de conductividad. Es importante anotar el tiempo de recogida de cada muestra.
10. Finalizar la recogida de muestras cuando el valor de conductividad vuelva a las condiciones basales.
11. Anotar la duración total del muestreo.
12. Medir la anchura y profundidad del río en cinco puntos a lo largo del tramo.

CÁLCULO DE PARÁMETROS

La concentración de nutrientes y la conductividad al final del tramo se utilizan para estimar la tasa de retención por unidad de tiempo (K_p , en s^{-1}). A partir de este valor se calcula la distancia de asimilación (S_w) y el resto de métricas de retención derivadas de ésta.

K_r se calcula comparando la curva en función del tiempo, de las concentraciones de nutrientes analizadas con las concentraciones de nutrientes estimadas a partir de la concentración del trazador hidrológico (o en el caso de Cl^- , de la conductividad) (fig. 8.4). Las concentraciones estimadas asumen que los nutrientes son transportados como un elemento conservativo (y, por tanto, son afectados sólo por procesos de advección, dispersión y dilución), mientras que la variación de la concentración de nutrientes observada está influenciada, además, por procesos de retención biológicos y químicos. Por tanto, la concentración estimada en diferentes momentos (N_{et}), durante el experimento, se calcula a partir de la siguiente ecuación (fig. 8.4):

$$N_{et} = \left(\frac{Cl_t - Cl_b}{Cl_s} N_s \right) + N_b \quad (8.8)$$

Esta ecuación asume que los cambios en la concentración de nutrientes (corregida por los niveles basales, $N_t - N_b$) en relación con la concentración de la solu-

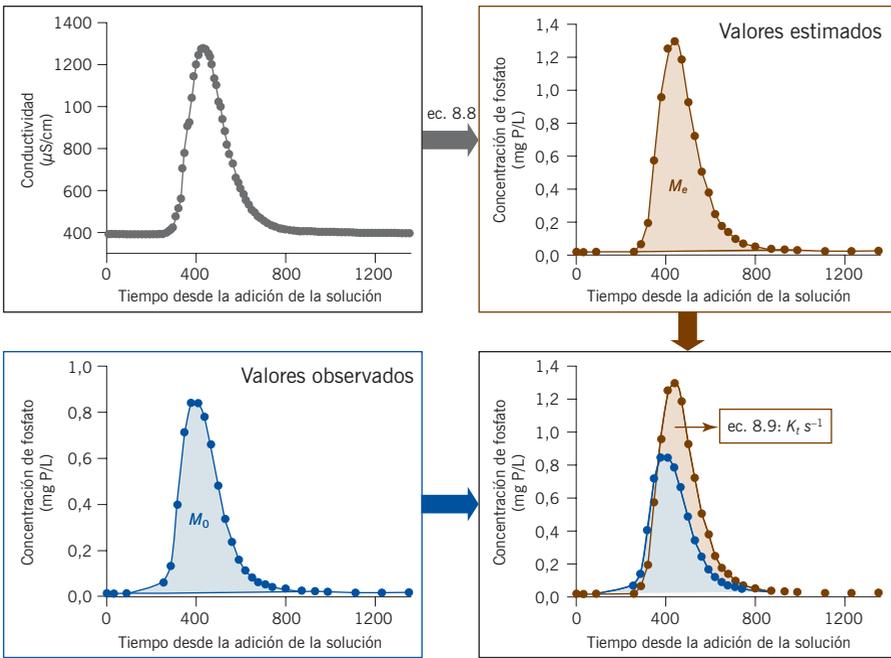


Figura 8.4: Curvas de conductividad y concentración de fosfato obtenidas al final del tramo, después de una adición instantánea de nutrientes junto con un trazador hidrológico

Nota: La figura también muestra la curva de concentración de fosfato estimada a partir de los valores de conductividad tras aplicar la ecuación 8.8, e ilustra cómo se obtiene la tasa de retención por unidad de tiempo (K_t) mediante la ecuación 8.9.

ción añadida (N_i) son iguales a los cambios en la concentración del trazador (correctada por los niveles basales, $Cl_i - Cl_b$) en relación con la concentración del trazador de la solución añadida (Cl_e). Si los nutrientes añadidos son retenidos a lo largo del tramo, las concentraciones estimadas deben ser más elevadas que las concentraciones observadas (fig. 8.4). La diferencia entre las dos áreas integradas de las curvas, en función del tiempo, de las concentraciones estimadas y observadas, multiplicado por el caudal, es la masa de nutriente retenida en el tramo durante el experimento. Sobre la base de estos valores, la tasa de asimilación por unidad de tiempo (K_t) se calcula a partir de la siguiente ecuación (Wilcock et al. 2002):

$$K_t = \frac{\ln(M_e/M_o)}{\tau} \tag{8.9}$$

donde, M_o : masa de nutriente calculada a partir de las concentraciones observadas, M_e : masa de nutriente calculada a partir de las concentraciones estimadas, y τ : tiempo requerido para que pase el pulso de adición al final del tramo (fig. 8.4).

S_w se calcula a partir de K_i mediante la ecuación:

$$S_w = \frac{v}{K_i} \quad (8.10)$$

donde, v : velocidad promedio del agua.

Finalmente V_f y U se calcularán a partir de S_w como se ha indicado en la técnica 13a.

Alternativamente al cálculo empírico de K_p , este parámetro también puede estimarse a partir de modelos unidimensionales de transporte de solutos que incluyen tanto el efecto del almacenaje hidrológico del agua, como el de la retención sobre el transporte de solutos. Estos modelos consideran dos compartimentos, el cauce principal y la zona de retención transitoria, que están conectados hidrológicamente y que pueden influenciar el transporte de solutos con tasa de retención por unidad de tiempo diferenciadas. En estos modelos, la dinámica del soluto añadido en un punto determinado del tramo se describe a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q_L}{A} (C_L - C) + \alpha (C_S - C) - \lambda C \quad (8.11)$$

$$\frac{\partial C_S}{\partial t} = \alpha \frac{A}{A_S} (C - C_S) - \lambda_S C_S \quad (8.12)$$

Estas ecuaciones son similares a las expuestas en la técnica 2, pero en este caso describen la variación de la concentración de un soluto biorreactivo (nutriente) y, por tanto, incluyen un componente que tiene en cuenta los procesos de retención de éste. La primera ecuación describe la variación del nutriente en función del tiempo en el cauce principal ($\partial C/\partial t$) y la segunda ecuación representa la variación de éste en la zona de retención transitoria ($\partial C_S/\partial t$).

Los términos de la primera ecuación describen los procesos de: a) advección, b) dispersión, c) entradas laterales, d) intercambio con la zona de retención transitoria, y e) la retención del soluto debida a procesos bióticos y químicos en el cauce principal, siendo λ la tasa de retención en el cauce principal.

Los términos de la segunda ecuación describen los procesos de: a) intercambio con el cauce principal y b) la retención del soluto debida a procesos bióticos y químicos en la zona de retención transitoria, siendo λ_S la tasa de retención en la zona de retención transitoria.

Existen diversos programas de software que incluyen estos modelos y que permiten obtener los distintos parámetros para una base de datos determinada.¹ En este caso, se recomienda primero parametrizar el modelo para los parámetros hidráulicos (advección, dispersión, sección de la zona de retención transitoria y coeficiente de intercambio entre la columna de agua y esta zona) utilizando los datos de la curva de conductividad o de la concentración del trazador hidrológico (técnica 2). Una vez obtenidos estos parámetros e incluyéndolos en el modelo, se parametriza de nuevo el modelo para obtener las tasas de retención en función del tiempo en el cauce principal (λ , en s^{-1}) y en la zona de retención transitoria (λ_s , en s^{-1}), utilizando los datos de variación de la concentración de nutrientes durante la adición. Una vez conocidas λ y λ_s , la suma de ambas tasas es equivalente a K_i obtenida a partir de la ecuación 8.9. Más detalle de la aplicación de este modelo y el posterior desarrollo de los cálculos se puede encontrar en Runkel (2007).

El programa OTIS permite obtener los parámetros hidráulicos principales a partir de los datos de adiciones instantáneas

8.2. Bibliografía

- ELWOOD J.W., NEWBOLD J.D., O'NEILL R.V., y VAN WINKLE W. «Resource spiralling: An operational paradigm for analyzing lotic ecosystems». En T.D. Fontain III, y S.M. Bartell, eds. *Dynamics of lotic ecosystems*. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1983: 3-27.
- HALL R.O., BERNHARDT E.S., y MEYER J.L. «Relating nutrient uptake with transient storage in forested mountain streams». *Limnology and Oceanography* 47 (2002): 255-265.
- MULHOLLAND P.J., STEINMAN A.D., y ELWOOD J.W. «Measurements of phosphorus uptake length in streams: Comparison of radiotracer and stable PO_4 releases». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 47 (1990): 2351-2357.
- MULHOLLAND P.J., TANK J.L., SANZONE D.M., WOLLHEIM W.M., PETERSON B.J., WEBSTER J.R., y MEYER J.L. «Nitrogen cycling in a forest stream determined by a N^{15} tracer addition». *Ecological Monographs* 70 (2000): 471-493.
- NEWBOLD J.D. «Cycles and spirals of nutrients». En P. Calow, y G.E. Petts G.E., eds. *The rivers handbook. Vol. 1*. Oxford: Blackwell, 1992: 379-408.
- NEWBOLD J.D., ELWOOD J.W., O'NEILL R.V., y VAN WINKLE W. «Measuring nutrient spiralling in streams». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38 (1981): 860-863.
- PAYN R.A., WEBSTER J.R., MULHOLLAND P.J., VALETT H.M., y DODDS W.K. «Estimation of stream nutrient uptake from nutrient addition experiments». *Limnology and Oceanography: Methods* 3 (2005): 174-182.
- PETERSON B.J., WOLLHEIM W.M., MULHOLLAND P.J., WEBSTER J.R., MEYER J.L., TANK J.L., MARTÍ E., BOWDEN W.B., VALETT H.M., HERSHEY A.E., MCDOWELL W.H., DODDS W.K., HAMILTON S.K., GREGORY S., y MORRALL D.D. «Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams». *Science* 292 (2001): 86-90.
- RUNKEL R.L. «Toward a transport-based analysis of nutrient spiralling and uptake in streams». *Limnology and Oceanography: Methods* 5 (2007): 50-62.
- SABATER F., y MARTÍ E. «Towards a holistic view of nutrient dynamics in fluvial ecosystems». *Verhandlungen Internationale Vereinigung Limnologie* 27 (2000): 3111-3116.

¹ Uno de los programas más utilizados es OTIS, disponible gratuitamente en <http://co.water.usgs.gov/otis/>

- STREAM SOLUTE WORKSHOP. «Concepts and methods for assessing solute dynamics in stream ecosystems». *Journal of the North American Benthological Society* 9 (1990): 95-119.
- WEBSTER J.R., y PATTEN B.C. «Effects of watershed perturbation on stream potassium and calcium dynamics». *Ecological Monographs* 1979 (1979): 51-72.
- WEBSTER J.R., y VALETT H.M. «Solute dynamics». En F.R. Hauer, y G.A. Lamberti, eds. *Methods in stream ecology*. San Diego: Academic Press, 2006: 169-185.
- WILCOCK R.J., SCARSBROOK M.R., COSTLEY K.J., y NAGELS J.W. «Controlled release experiments to determine the effects of shade and plants on nutrient retention in a lowland stream». *Hydrobiologia* 485 (2002): 153-169.