

# VARIACIONES DEL QUIMISMO DEL ARROYO DURANTE LAS CRECIDAS EN UNA CUENCA DE ENCINAR MONTANO

Anna Avila\*  
Ferrán Rodà\*\*

## RESUMEN

*Se estudian las variaciones del quimismo del arroyo durante las crecidas en una pequeña cuenca de encinar montano en el macizo del Montseny (Barcelona). Los resultados obtenidos en dos precipitaciones de diferente intensidad acaecidas en condiciones antecedentes secas se discuten en términos de los mecanismos de la escorrentía y del origen de los iones. Conductividad, pH,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  manifiestan efecto de dilución mientras que K y  $\text{NO}_3^-$  generalmente aumentan con el caudal, a veces de modo espectacular. Sulfato y  $\text{Cl}^-$  aumentan de forma sustancial y sostenida durante las crecidas. Un análisis de componentes principales simplifica la representación de los datos.*

## SUMMARY

*Streamwater changes during storm events are investigated in a small evergreen-oak forested watershed in the Montseny mountains (NE Spain). Results from two storms of different intensities that took place under dry antecedent conditions are discussed in terms of ion sources and runoff mechanisms. Dilution effects were found for conductivity, pH,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{Mg}^{2+}$  while  $\text{K}^+$  and  $\text{NO}_3^-$  usually increased with discharge, sometimes dramatically. Substantial and sustained increases of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Cl}^-$  in storm runoff were also observed. A principal component analysis helps in summarizing the data.*

\* Departament d'Ecologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Diagonal 645. 08028 Barcelona.

\*\* Departament d'Ecologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra (Barcelona).

Dentro de un amplio programa de estudios de los ciclos biogeoquímicos en ecosistemas terrestres, nuestros departamentos han establecido dos pequeñas cuencas experimentales en el Parque Natural del Montseny (Barcelona). Una de ellas está cubierta de bosque y la otra de landas. Los objetivos del estudio de dichas cuencas son: 1) obtener el balance anual de entradas y salidas de agua y nutrientes a nivel de cuenca; y 2) conocer las pautas de respuesta biogeoquímica de ambas cuencas ante lluvias individuales.

En este trabajo presentamos los resultados obtenidos sobre las variaciones del quimismo del arroyo en la cuenca forestada (TM9) durante dos crecidas. El conocimiento de tales variaciones puede ilustrarnos sobre los procesos biogeoquímicos que tienen lugar en la cuenca, y es por otra parte imprescindible para calcular la exportación de nutrientes en las aguas de avenamiento.

### Area de estudio

TM9 (41° 46' N, 2° 21' E) es una cuenca de 4,3 ha orientada al N. La pendiente media entre los extremos de la cuenca es de 36°. La roca madre es una filita formada principalmente por cuarzo, sericita, albita y clorita. Los suelos, de carácter coluvial, son de tipo ránker. Estimamos que la precipitación media para el conjunto de la cuenca debe estar alrededor de los 900 mm. anuales. La cuenca está cubierta en su totalidad por un encinar montano denso que fue tratado en régimen de monte bajo para carboneo hasta hace unos 20 ó 30 años y que no ha sido perturbado desde entonces. El arroyo es permanente.

### Métodos

Una estación de aforo, dotada de vertedero en V de 60°, limnígrafo y pluviógrafo, permite conocer de modo continuo el caudal a la salida de la cuenca, así como la cuantía e intensidad de las precipitaciones. Un colector automático realiza un muestreo intensivo del arroyo durante las crecidas. Un interruptor acciona el colector cuando el nivel del agua en el vertedero alcanza una altura pre-seleccionada.

La conductividad y el pH se miden electrométricamente. La alcalinidad ( $\text{HCO}_3$ ) se determina por valoración conductimétrica;  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por fotometría de emisión;  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por absorción atómica;  $\text{NO}_3$  (más  $\text{NO}_2$ ) por reducción en columna de cadmio en un Technicon AAII;  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  por cromatografía iónica en un Dionex 2010. Las lecturas de los análisis de cationes se realizan en el Servei d'Espectroscopia de la Universidad de Barcelona.

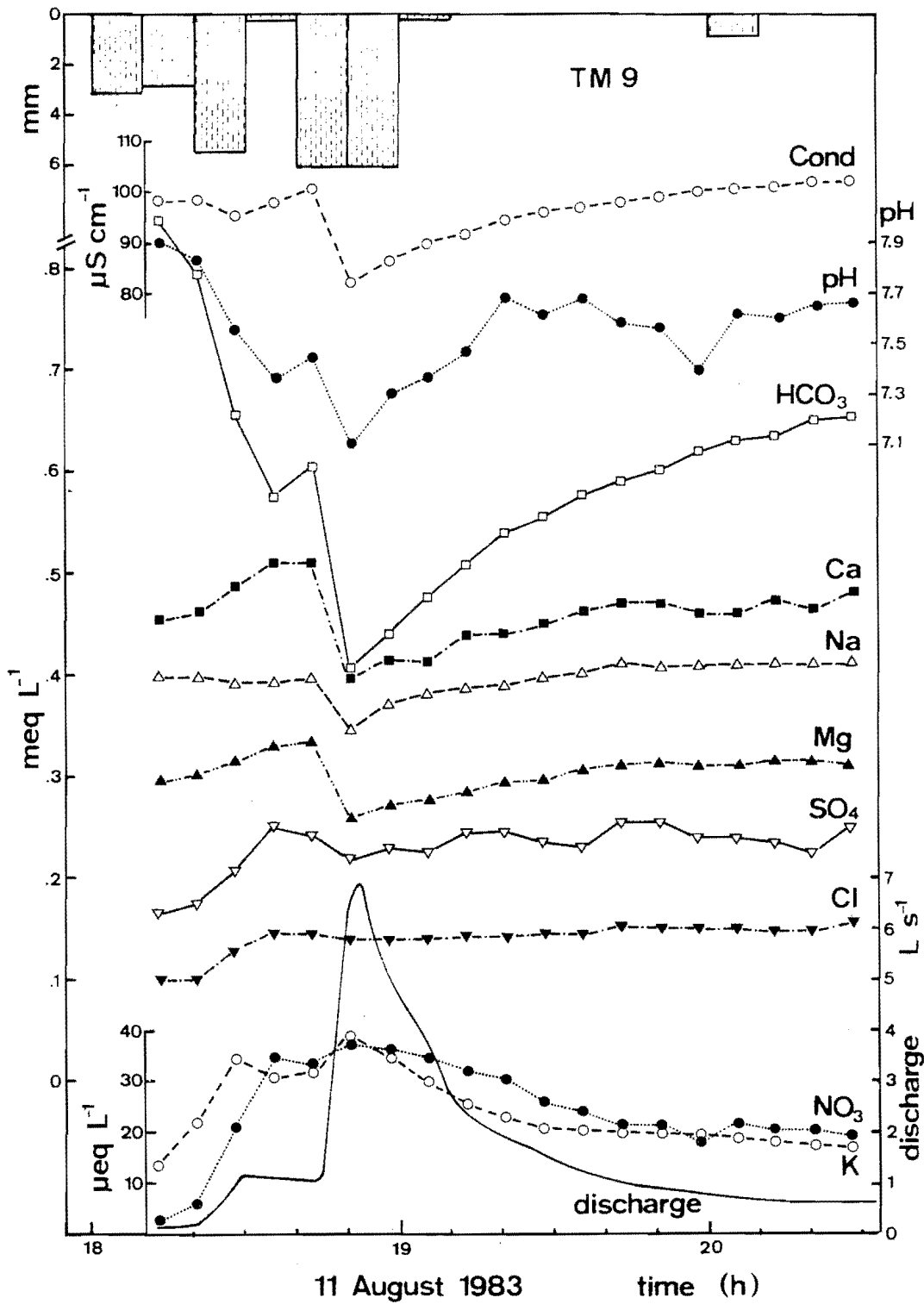


Figura 1

Quimismo del arroyo de una cuenca de encinar (TM9, Montseny, Barcelona) durante la crecida del 11 agosto 1983. La precipitación total fue de 26,3 mm. Una barra de precipitación corresponde a 10 minutos. La conductividad está referida a 20 °C.

## Resultados y discusión

Crecida del 11 agosto 1983

Una tormenta convectiva, corta e intensa, descargó 26,3 mm., de los cuales 23,7 cayeron en una hora (Fig. 1). A pesar de que 23 horas antes había caído otros 27 mm., las condiciones hídricas antecedentes cabe calificarlas de secas. El caudal de base al inicio de la lluvia era escaso (0,1 L s<sup>-1</sup>). El hidrograma es muy característico de estas condiciones: el caudal aumentó rápidamente, presentó un pico definido y disminuyó también con rapidez (Fig. 1). El caudal máximo fue de 6,9 L s<sup>-1</sup>. El avenamiento atribuible a la crecida representó sólo el 1,8% de la precipitación total: la mayor parte de la lluvia fue pues retenida por suelos de la cuenca.

Durante el pulso de caudal se produjeron cambios importantes en el quimismo del arroyo, que documentamos con 19 muestras tomadas cada 7,5 minutos (Fig. 1), seguidas de otras 3 tomadas cada 4 horas y que no se representan en la figura. Las variables analizadas pueden clasificarse en tres grupos bien diferenciados según sus pautas de variación durante la crecida (Fig. 1):

1) Conductividad, pH, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y Mg<sup>2+</sup> que están positivamente correlacionados entre sí y negativamente correlacionados con el caudal. Todos ellos tienen su valor mínimo en el momento del caudal punta, es decir, manifiestan un efecto de dilución. Dicho efecto es especialmente acusado en el caso del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Bicarbonato y pH disminuyen desde el mismo principio de la crecida, mientras que Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> aumentan durante la primera parte de la rama ascendente y disminuyen sólo cuando el caudal sube bruscamente hasta el pico. Por su parte, conductividad y Na<sup>+</sup> se mantienen constantes al principio y disminuyen en el pico. Todas las variables de este grupo aumentan gradualmente durante la recesión.

2) K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que están muy correlacionados entre sí, positivamente correlacionados con el caudal, y negativamente correlacionados con las variables del grupo 1. Ambos iones aumentan espectacularmente durante la crecida, alcanzan valores cercanos a sus máximos con bastante antelación respecto al caudal punta, y disminuyen gradualmente durante la recesión.

3) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup> que están muy correlacionados entre sí y poco o nada correlacionados con las demás variables químicas ni con el caudal (aunque el Cl tiene dos correlaciones moderadas: positiva con NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y negativa con HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ambos iones aumentan al principio de la crecida pero, a diferencia del grupo 1, apenas disminuyen en el caudal punta y permanecen más o menos constantes durante la recesión.

Como hemos visto, muchas de las variables analizadas están muy correlacionadas entre sí. Existe por lo tanto una fuerte redundancia en los datos, y un análisis de componentes principales simplifica la representación de los

## QUIMISMO EN UNA CUENCA DE ENCINAR

mismos. Aplicando este análisis a la matriz formada por las 22 muestras y las 10 variables químicas (excluyendo el caudal) se obtiene un primer componente que explica el 62% de la variancia, mientras que el segundo explica el 25%. O sea, dos componentes bastan para explicar la mayor parte de la variación observada en esta crecida. Los tres grupos anteriormente descritos quedan perfectamente reflejados en el gráfico que representa las correlaciones de las 10 variables con ambos componentes (Fig. 2a). El componente I opone las variables del grupo 1 en el polo positivo frente a  $K^+$  y  $NO_3^-$  en el polo negativo. Este componente está muy negativamente correlacionado con el caudal ( $r = -0,93$ ) y representa el principal proceso que ha tenido lugar durante esta crecida: la sustitución del agua "vieja" (rica en  $HCO_3^-$ , básica, relativamente rica en  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{2+}$ , de conductividad elevada, pobre en  $K^+$  y muy pobre en  $NO_3^-$ ) por agua "nueva", de características contrarias (Fig. 1). El componente II queda definido por  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  en su polo positivo (Fig. 2a) y recoge la contribución de estos dos iones atmosféricos que no participan del antagonismo reflejado por el componente I y que se comportan de manera muy similar en esta crecida (Fig. 1).

En la Figura 2b puede verse la trayectoria temporal de las 22 muestras en el plano de los dos primeros componentes. Destaquemos: 1) el aumento del componente II durante la primera parte de la rama ascendente, debido al aumento de  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  (y, en menor medida, el aumento de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $NO_3^-$ , y a la disminución de  $HCO_3^-$  y pH); 2) el salto al polo negativo del componente I en el pico de caudal (muestra 6) producido por la dilución de las variables del grupo 1 y por los altos valores de  $K^+$  y  $NO_3^-$ ; 3) el aumento gradual del componente I durante la recesión (muestras 6 a 19); y (4) la tendencia a volver a las posiciones iniciales durante la recesión avanzada (muestras 19 a 22). Señalemos no obstante que al acabar el muestreo (13.5 horas después del final de la lluvia eficaz), ambos componentes tienen coordenadas más positivas que las de la primera muestra. Esto se debe a que las concentraciones finales de  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{2+}$  son mayores que las iniciales.

En esta crecida, la mayor parte del aumento del caudal se debió seguramente a la precipitación sobre el cauce y a la escorrentía superficial de Horton generada en una franja estrecha alrededor de los márgenes del arroyo. Es decir, el hidrograma estaría dominado por agua no infiltrada. Esto explicaría la rapidez y brevedad de la respuesta del caudal así como el hecho de que sólo avenase el 1,8% de la precipitación. En efecto, la precipitación sobre el cauce podría representar un 1% de la precipitación total o menos. Por su parte, la buena capacidad de infiltración de los suelos de la cuenca da lugar a que cualquier escorrentía superficial de Horton producida localmente se infiltre a los pocos metros, de modo que este tipo de escorrentía sólo puede alcanzar el cauce si se genera en sus proximidades. En conjunto, pues, y como corresponde a unas condiciones antecedentes secas, sólo una proporción muy pequeña del área de la cuenca contribuyó al avenamiento.

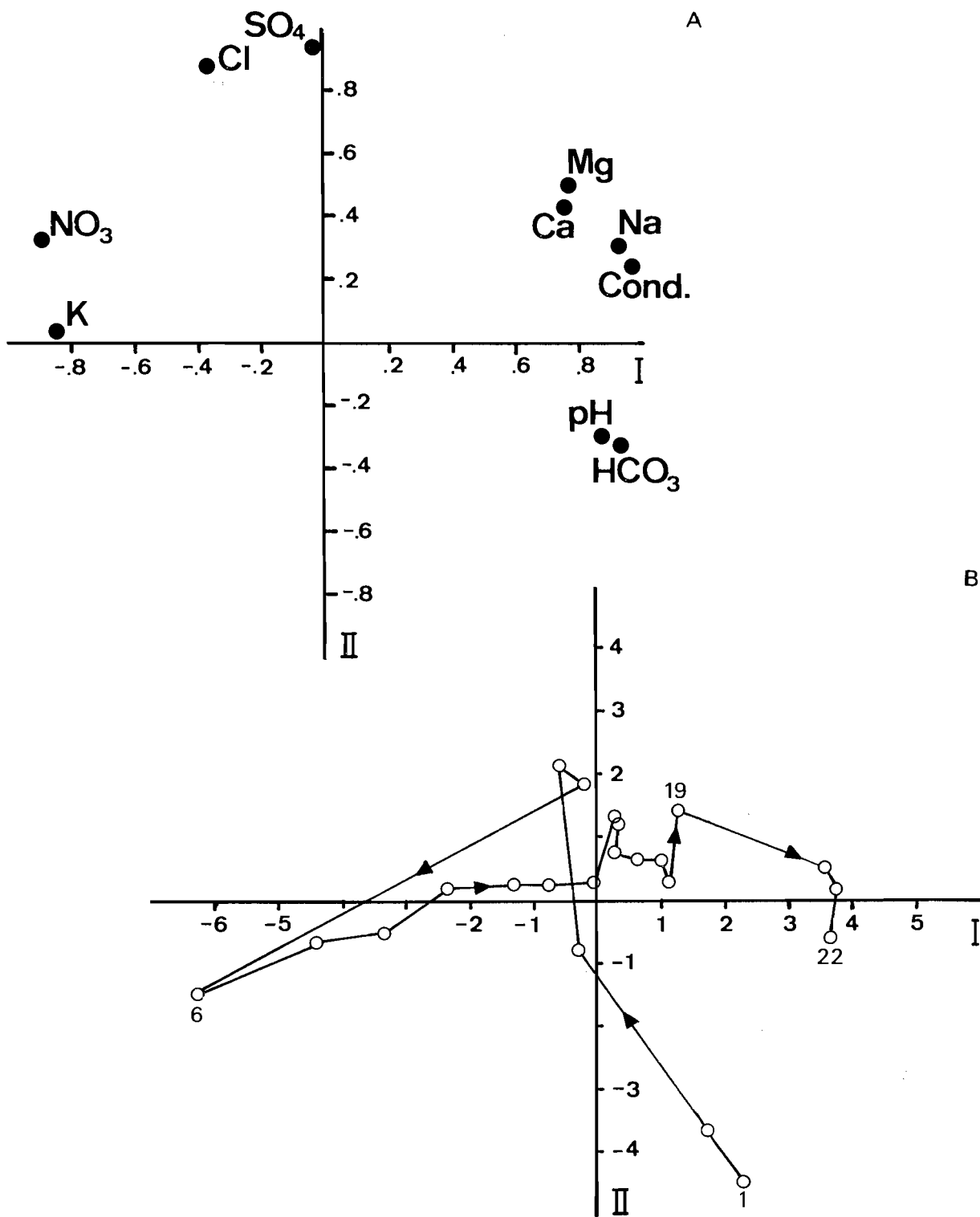


Figura 2

Análisis de componentes principales de la crecida del 11 agosto 1983 en una cuenca de encinar. Los dos primeros componentes explican el 87% de la variancia. A) representación de los coeficientes de correlación lineal de las 10 variables originales con cada uno de los dos primeros componentes. B) trayectoria temporal de las 22 muestras en el plano de los dos primeros componentes. La muestra 6 corresponde al pico del caudal.

## QUIMISMO EN UNA CUENCA DE ENCINAR

Desde una perspectiva biogeoquímica, hay que tener en cuenta que en un arroyo forestal como TM9 tanto la precipitación sobre el cauce como la que llega al suelo del bosque es de hecho trascolación (*throughfall*) y escorrentía cortical (*stemflow*). Tanto la trascolación como la escorrentía cortical y la escorrentía superficial de Horton son ricas en  $K^+$  porque las dos primeras han lixiviado copas y troncos y la tercera, además, el mantillo. Los tres tipos de agua son, por otra parte, mucho más ricos en  $NO_3^-$  que el caudal de base de TM9. El predominio del agua no infiltrada en el hidrograma de esta crecida sería el responsable del rápido aumento de  $K^+$  y  $NO_3^-$  en la rama ascendente (Fig. 1) y del color y sedimento orgánicos que caracterizan a éstas y subsiguientes muestras. El  $HCO_3^-$  disminuye desde el principio (Fig. 1) porque los tres tipos de agua que nos ocupan tienen una alcalinidad mucho menor que la del caudal de base. Por el contrario,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  aumentan inicialmente, indicando que el agua nueva que llega al cauce contiene dichos iones en concentraciones ligeramente mayores que las del caudal de base debido al lavado de la vegetación, del mantillo, o de la superficie del suelo. La constancia del  $Na^+$  durante la crecida, y en particular durante la primera parte de la rama ascendente, revela que el agua nueva ha estado en contacto no sólo con materiales orgánicos (vegetación, hojarasca), que son pobres en  $Na^+$ , sino que ha tenido suficiente contacto con la superficie del suelo mineral como para enriquecerse en  $Na^+$ . Esto implica, quizás, que la escorrentía superficial de Horton fue cuantitativamente más importante que la precipitación sobre el cauce, en esta crecida.

La disminución gradual de  $K^+$  y  $NO_3^-$  durante la recesión (Fig. 1) no se debe primordialmente a una dilución creciente del agua nueva por parte de la escorrentía subterránea. Cabe suponer que ésta fue constante durante toda la crecida (dado que no hubo recarga subterránea, como evidencia el hecho de que el caudal de base 24 horas después de la lluvia fuese igual que el inicial) y, excepto en la fase más avanzada de la recesión, representa, sólo un pequeño porcentaje del avenamiento total. Es interesante señalar que ambos iones presentan una histéresis respecto al caudal, en sentido de las agujas del reloj (Fig. 1): para un mismo caudal, sus concentraciones son mayores en la rama ascendente que en la recesión. Esta histéresis podría deberse: 1) a un agotamiento del  $K^+$  y  $NO_3^-$  solubilizables en la vegetación, el mantillo o la superficie del suelo; 2) a una retención creciente de estos iones mediada biológicamente, quizá en el propio cauce; y 3) a una dilución de la escorrentía superficial de Horton por parte de agua previamente infiltrada que llegue al cauce durante la recesión como escorrentía hipodérmica o como flujo de retorno, aguas probablemente menos ricas que aquélla en ambos iones.

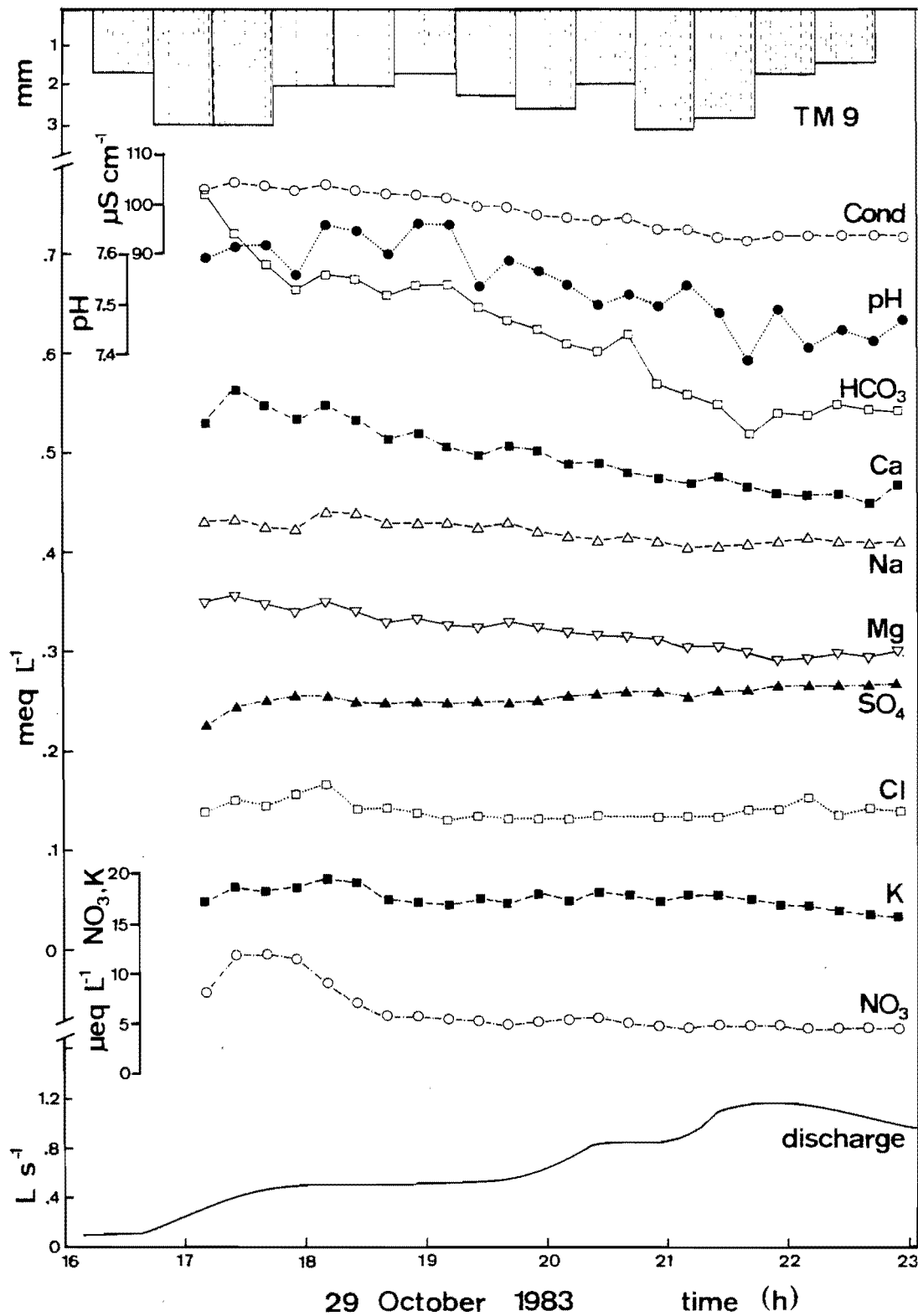


Figura 3

Quimismo del arroyo de una cuenca de encinar (TM9, Montseny, Barcelona) durante la crecida del 29 octubre 1983. La precipitación total fue de 37,0 mm. Una barra de precipitación corresponde a media hora. La conductividad está referida a 20 °C.



## QUIMISMO EN UNA CUENCA DE ENCINAR

*Crecida del 29 octubre 1983*

En esta ocasión la lluvia fue de origen frontal, prolongada y de baja intensidad. Se midieron en total 37,0 mm., de los cuales 35,5 mm. cayeron durante 9 horas a una intensidad media de 3,9 mm h<sup>-1</sup>, seis veces inferior a la del 11 de agosto. La intensidad horaria máxima fue de 6,2 mm. h<sup>-1</sup>. Las condiciones antecedentes eran también secas, con un caudal inicial de 0,1 l s<sup>-1</sup>. El hidrograma fue totalmente distinto al anterior: el caudal subió lentamente durante toda la lluvia, alcanzó un máximo en forma de meseta y disminuyó con más lentitud que el 11 de agosto (Fig. 3). El caudal máximo fue de sólo 1,2 l s<sup>-1</sup>. El avenamiento atribuible a la crecida representó el 1,6% de la precipitación total. Los cambios del quimismo se documentan con 24 muestras tomadas cada 15 minutos, y que corresponden a la rama ascendente y al inicio de la recesión (Fig. 3). Desgraciadamente, no disponemos de muestras para el resto de la recesión. Por consiguiente, el período de muestreo representa sólo el 51% del avenamiento atribuible a la crecida.

La variación del quimismo es, como la del caudal, menos drástica en esta crecida que en la anterior (Fig. 3). Existe un efecto de dilución gradual que afecta a las variables del grupo 1, pero que es mucho menor que el del 11 de agosto. El HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> vuelve a ser el ión más diluido. El pH desciende mucho menos que en la crecida anterior. La dilución del Na<sup>+</sup> es extremadamente débil. Potasio y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se comportan de modo distinto al 11 de agosto. El NO<sub>3</sub><sup>-</sup> tiene un pico inicial moderado y su concentración ha disminuido ya 3 horas antes de que se llegue al caudal máximo. Las concentraciones de K<sup>+</sup>, aunque mayores que las del caudal de base, presentan sólo un suave máximo inicial (una media hora más tarde que el pico de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y disminuyen muy gradualmente durante todo el muestreo. El Cl<sup>-</sup>, a excepción de dos modestísimos incrementos que siguen a períodos de lluvia algo más intensa, mantiene un nivel muy constante durante toda la crecida. Advertimos sin embargo que la primera muestra se tomó cuando el caudal era ya de 0,3 L s<sup>-1</sup>, momento en que las concentraciones de Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> habían aumentado considerablemente respecto a las del caudal de base.

La pauta de correlaciones es básicamente semejante a la del 11 de agosto. Las dos diferencias más importantes respecto a la crecida anterior estriban en que, por un lado, la correlación de K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub> con el caudal es ahora negativa en vez de positiva (Figs. 1 y 3). Por el otro, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup> no están aquí correlacionados (Fig. 3). El SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> es ahora la única variable positivamente correlacionada con el caudal (Fig. 3). No hemos realizado un análisis de componentes principales para esta crecida, pero partiendo de la matriz de correlación y ampliando los comentarios anteriores podemos clasificar las variables analizadas en tres grupos: a) conductividad, pH, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que están negativamente correlacionados con el caudal; b) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que lo está positivamente; y c) Cl<sup>-</sup> que no está correlacionado con el caudal ni con ninguna de las variables químicas. El actual grupo a

resulta de la fusión de los grupos 1 y 2 reconocidos en la crecida del 11 de agosto. De hecho, sus primeras seis variables (el anterior grupo 1) están muy correlacionadas entre ellas mientras que sus correlaciones con  $K^+$  y  $NO_3^-$  son sólo moderadas. Se mantiene por tanto una cierta distinción entre los anteriores grupos 1 y 2, aunque la situación es muy diferente de la oposición radical observada el 11 de agosto (Fig. 2a).

En conjunto, la respuesta biogeoquímica de TM9 a la precipitación del 29 de octubre se caracterizó porque los cambios del quimismo del arroyo fueron menores, más graduales y más sostenidos que los de la crecida anterior. Las condiciones antecedentes eran secas en ambas ocasiones. Las diferencias biogeoquímicas observadas entre las dos crecidas permiten deducir que, a pesar del escaso porcentaje de avenamiento, la precipitación sobre el cauce no dominó el hidrograma del 11 de agosto puesto que, a igualdad de condiciones antecedentes, la precipitación sobre el cauce debería dar respuestas biogeoquímicamente parecidas en las dos fechas. Por lo tanto, el hidrograma del 11 de agosto estaría dominado por la escorrentía superficial de Horton. La precipitación del 29 de octubre fue mucho menos intensa y no debió generar cantidades apreciables de este tipo de escorrentía. Como el porcentaje de avenamiento fue muy similar en ambas crecidas, la precipitación sobre el cauce tampoco es suficiente para explicar la mayor parte del aumento del caudal del 29 de octubre. Por consiguiente, el hidrograma de ese día estuvo dominado por agua infiltrada. La subida gradual del caudal, el máximo en forma de meseta, la recesión menos rápida que el 11 de agosto, la falta de una respuesta drástica del  $K^+$  y  $NO_3^-$ , y el menor contenido de sedimento orgánico avalan la anterior interpretación. A pesar de unas condiciones iniciales secas en el conjunto de la cuenca, este tipo de hidrograma sería posible si a lo largo de la precipitación de 37 mm. el contenido hídrico de los suelos adyacentes al cauce hubiese ido en aumento hasta poder generar gradualmente escorrentía hipodérmica o flujos de retorno.

A pesar de que la segunda precipitación fue un 41% más copiosa que la primera, el factor clave para interpretar las respuestas biogeoquímicas radica en el hecho de que el hidrograma esté dominado por agua infiltrada o no infiltrada. Para una misma cuenca y bajo condiciones antecedentes secas, esta dicotomía depende exclusivamente de la intensidad de la precipitación. El agua infiltrada ha estado en contacto con el suelo mineral y da lugar a un efecto de dilución menor que la no infiltrada (Figs. 1 y 3). Por otra parte, el agua infiltrada sólo produce aumentos moderados de  $K^+$  y  $NO_3^-$  porque al no haber escorrentía superficial de Horton la lixiviación del mantillo es menor y porque el contacto con el suelo mineral favorece la retención de ambos iones (por absorción biológica, por desnitrificación en la zona saturada, o por fijación del  $K^+$  entre las láminas de las arcillas 2:1). En este sentido, los máximos iniciales de  $K^+$  y  $NO_3^-$  que se observan el 29 de octubre (Fig. 3) serían debidos a que la trascolación y la escorrentía cortical caídas sobre el cauce pueden representar un porcentaje importante

## QUIMISMO EN UNA CUENCA DE ENCINAR

del caudal al principio de la crecida, pero resultan luego diluidas con volúmenes crecientes de agua infiltrada.

En el futuro, será interesante comparar las pautas descritas en este trabajo con las que se obtengan en crecidas bajo condiciones antecedentes húmedas o saturadas, y con resultados similares generados en la cuenca experimental desforestada. Concurrentemente, los datos sobre las variaciones del quimismo de los arroyos durante las crecidas se utilizan para obtener balances fidedignos de nutrientes a nivel de cuenca.

