

ESTUDIO DE PROCESOS HIDROLÓGICOS A DIFERENTES ESCALAS (MARCO TEÓRICO Y PROPUESTA METODOLÓGICA)

Antonio Gómez Plaza, Víctor M. Castillo & Juan Albadalejo

Departamento de Conservación de Suelos y Aguas. CEBAS-CSIC.
Apto. Correos 4195. 30080 Murcia

Resumen: La comprensión de los procesos hidrológicos requiere el estudio de los mismos en un rango de escalas espacio-temporales lo suficientemente amplio como para poder caracterizarlos correctamente. En el presente trabajo se describe la situación actual del estudio de los procesos hidrológicos a diferentes escalas y se propone un método para la determinación de las escalas de trabajo, el establecimiento de los dominios de escala y el traspaso de información de unas escalas a otras.

Palabras clave: Procesos hidrológicos, escalas, *scaling*, Murcia.

Abstract: In order to understand well hydrological processes it is necessary to study them across a wide range of spatial and temporal scales in order to characterize these processes properly. In this paper the state of the art of scale issues is described and a methodology to determine working scales, scale domains and change of information across scales is proposed.

Key words: Hydrological processes, scale, *scaling*, Murcia.

1. INTRODUCCIÓN

Todos los sistemas que operan en la naturaleza, ya estén gobernados por principios biológicos o por principios físicos, actúan dentro de un rango de escalas tanto en el espacio como en el tiempo. Cada una de estas escalas de

actuación puede considerarse como un nivel aislado de funcionamiento, si bien es cierto que, a su vez, cada uno de ellos se encuentra conectado de una forma u otra con su inmediato superior e inferior. De este modo, cualquier cambio en el comportamiento de uno de los niveles afectará a los que se encuentren más próximos, y la alteración de cualquier nivel superior influirá en los inferiores.

De lo dicho puede deducirse que para comprender el funcionamiento de cualquier sistema es preciso conocer cómo se comporta en un rango de escalas. Este conocimiento permitirá establecer unas pautas que expliquen los mecanismos por los que se rige el sistema.

Klemes (1983) afirma que el error más común cuando se trata de estudiar procesos naturales dentro de un rango de escalas es que se tiende a considerarlas como una simple disminución o aumento del tamaño de los objetos, sin tener en cuenta que, en la naturaleza, la escala no es arbitraria, sino que es el producto de una serie de interrelaciones entre fuerzas actuantes y parámetros que determinan el proceso.

Por tanto, a la hora de trabajar con procesos y sistemas a diferentes escalas de estudio conviene tener en cuenta los siguientes principios:

1. Los patrones espaciales de comportamiento son diferentes en cada escala (Turner *et al.*, 1989; Meentenmeyer, 1989).
2. Los cambios producidos en los patrones espaciales son diferentes a distintas escalas temporales; las escalas espaciales y temporales se encuentran relacionadas (O'Neill *et al.*, 1986; O'Neill, 1988).
3. Los procesos que regulan los cambios de los patrones espaciales son diferentes a diferentes escalas: ningún mecanismo es capaz de explicar por sí mismo los patrones observados y sus cambios en todas las escalas (Levin, 1992).
4. Se necesitan distintas variables para describir procesos similares según las escalas de trabajo (Jarvis & McNaughton, 1986).

2. ESCALAS EN HIDROLOGÍA

El estudio de los efectos de la escala en los procesos hidrológicos es un tema de reciente estudio. A pesar del impulso recibido en los últimos años (Dooge, 1982; Rodríguez-Iturbe & Gupta, 1983; Gupta *et al.*, 1986; Wood *et al.*, 1988; Beven, 1991;1995;1996; Mackay y Riley, 1991; Sivapalan, 1993) la influencia de las escalas de trabajo en la cuantificación de los procesos hidrológicos y en la identificación de sus variables de control es reconocido

por numerosos investigadores como el mayor problema no resuelto en hidrología (Kalma & Sivapalan, 1995).

El hecho es que existe un conflicto fundamental entre la escala en la que se realizan los experimentos y la escala en que los problemas que se pretenden resolver son significativos (Beven, 1996). Este conflicto no es resoluble con el conjunto de técnicas de medida que están disponibles hoy en día, y tampoco por medio del razonamiento teórico por sí mismo. Muchos de los modelos usados en hidrología se basan en sistemas a pequeña escala, que pueden ser abarcados con facilidad y que, en general, se consideran homogéneos. Su funcionamiento es descrito, a esta escala de trabajo, por ecuaciones de tipo lineal. Sin embargo, los sistemas hidrológicos reales no pueden considerarse homogéneos. Los procesos hidrológicos a mayor escala están determinados por una estructura y geometría del sistema que a veces puede llegar a ser muy compleja, y cuyo comportamiento es no lineal. Los parámetros determinados a pequeña escala, con una aproximación lineal, no son, por tanto, capaces de explicar el comportamiento de los procesos a gran escala. El incremento de escala de observación implica más complejidad, nuevas variables, nuevas relaciones, y, como consecuencia, nuevos problemas.

Un gran inconveniente en hidrología y otras ciencias ambientales es que los datos necesarios para su estudio no están disponibles en las escalas apropiadas y la teoría de muchos procesos tales como la infiltración, escorrentía, transporte de sedimentos, etc. se ha desarrollado, y lo seguirá siendo, en pequeñas escalas espacio-temporales. De igual forma, cuando se estudia procesos a distintas escalas, la observación y modelización se realiza en cortos periodos de tiempo, cuando realmente se necesitan periodos más largos de observación, medición y estudio para definir bien el proceso (Blöschl & Sivapalan, 1995). La gran variabilidad espacio-temporal de los sistemas hidrológicos implica que un análisis correcto de los mismos abarque las siguientes etapas: identificar y formular relaciones aceptables dentro de las escalas de interés, comprobarlas experimentalmente, y buscar unas conexiones analíticas consistentes entre estas relaciones y aquellas que son conocidas a otras escalas (Gupta *et al.*, 1996).

2.1. Trabajando con y entre escalas

Elección de la escala de estudio

La determinación de las escalas de estudio dependerá generalmente del criterio de un observador y deberán ser las apropiadas para el análisis del fenómeno o sistema que se pretenda estudiar. La forma más común para trabajar con escalas es comparar patrones de comportamiento del sistema

entre un rango de escalas seleccionado al azar. Las escalas elegidas para dicho análisis, aunque seleccionadas arbitrariamente, tenderán a reflejar la disposición jerárquica de escalas espaciales basada en la propia percepción de la naturaleza.

La escala de investigación determina el rango de patrones y procesos que se dan en cualquier sistema. Si se estudia el sistema a una escala inadecuada no se detectarán los mecanismos y procesos que definen la dinámica real del mismo encontrando, por el contrario, pautas que son propias de la escala y no se corresponden con la realidad.

Dominios de escala

Los procesos hidrológicos se producen dentro de un rango de escalas espacio-temporales sumamente amplio, desde los procesos de infiltración o circulación de agua en el suelo, en unos pocos cm^2 del mismo, hasta los mecanismos que regulan el funcionamiento de cuencas hidrográficas de millones de kilómetros cuadrados. Igual ocurre con la escala temporal, hay procesos que se producen en minutos mientras que otros precisan días e incluso años. Las escalas de trabajo que se contemplan mayoritariamente dentro del estudio de los procesos hidrológicos son las expresadas en la tabla 1.

Tabla 1. *Escalas de trabajo más comúnmente utilizadas (Dooge, 1982).*

<i>En el espacio:</i>	<i>En el tiempo</i>
Escala local (< 1 m^2)	Evento (< 1 día):
Escala ladera (<100 m^2)	Estacional (< 1 año)
Escala cuenca (< 10 km^2)	Largo período (< 100 años)
Escala regional (< 1000 km^2)	

Sin embargo, las variables que están afectando a dichos procesos no cambian continuamente dentro de este amplio rango, sino que existe lo que se denominan dominios de escala (Wiens, 1989). Estos dominios de escala son regiones del rango en las cuales ciertos patrones o mecanismos de funcionamiento de los sistemas o bien no cambian o bien lo hacen de forma muy poco apreciable (fig. 1).

Los dominios se encuentran generalmente separados por zonas de transición y los sistemas que presentan dominios claros, como es el caso de los hidrológicos, tienden a comportarse en estas zonas de transición de una forma impredecible e inestable. Es por tanto conveniente averiguar cuáles son los dominios de escala del proceso hidrológico que se esté considerando con

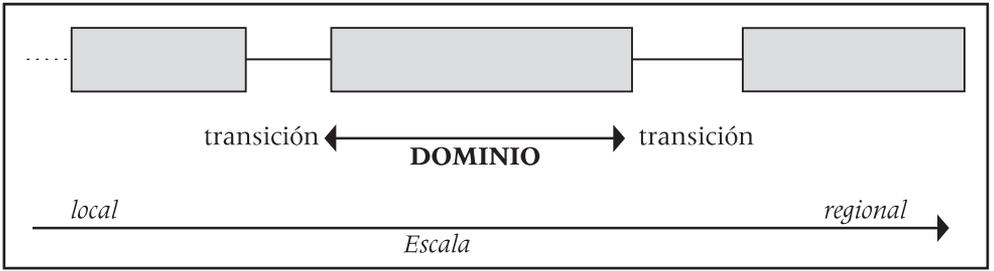


Figura 1: Dominios de escala a lo largo de un rango (Wiens, 1989).

el fin de determinar adecuadamente cuáles serán los rangos de estudio, y que escalas se seleccionarán para caracterizar mejor los procesos.

Uno de los métodos aportados por Wiens (1989) para determinar los dominios de escala de un sistema consiste en ir agregando zonas de estudio de igual escala hasta que se obtengan varianzas inusualmente altas. Cuando esto ocurre se ha sobrepasado la zona de dominio para entrar en la de transición (fig. 2).

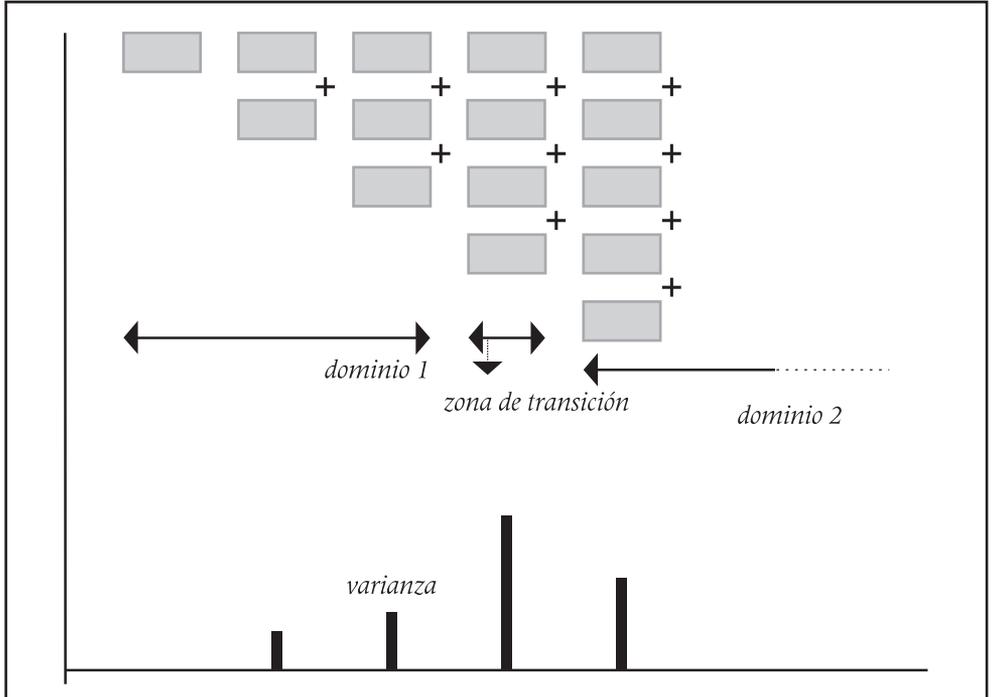


Figura 2: Comportamiento de varianza en dominios y zona de transición.

Traspaso de información de unas escalas a otras: Scaling

Los dominios de escala de un proceso particular pueden servir de indicador para definir los límites de generalización. Es decir, las conclusiones obtenidas a cierta escala pueden extrapolarse a todas las escalas del dominio. Más allá, en la zona de transición, la inestabilidad en el comportamiento de los sistemas dificulta la extrapolación de los resultados. La definición de un límite de extrapolación es necesaria para trasladar información a través de escalas ya que el error asociado a una extrapolación se incrementa conforme aumenta la diferencia espacio-temporal entre escalas.

El proceso de extrapolar datos de escalas superiores a inferiores se denomina *downscaling*, mientras que para el proceso contrario se usa la expresión *upscaling*. Los métodos de *downscaling* se basan en los conocimientos previos de la jerarquía existente en el proceso analizado. En el caso de *upscaling*, el paso inicial es la medición de parámetros en la escala más pequeña con el fin de explicar el mismo fenómeno a escalas mayores. Este último método tiene como finalidad usar información que está disponible en pequeñas escalas de estudio pero que resulta difícil obtener a escalas mayores.

La heterogeneidad espacial es otra limitación para trasladar información de una escala a otra. No es posible agregar las mediciones en escalas pequeñas para llegar a la más grande como en el caso de sistemas espacialmente homogéneos, así como tampoco suele dar resultado el uso de medias ponderadas puesto que la heterogeneidad puede influir en los procesos de una forma no lineal. En la mayoría de los sistemas naturales la complejidad del sistema y los efectos de la heterogeneidad local aumenta conforme lo hace la escala de trabajo. Algunos procesos hidrológicos no siguen esta regla general y así, mientras a escalas inferiores la variabilidad espacial de las variables que controlan el proceso es un factor determinante de la respuesta hidrológica, en escalas superiores el efecto de la variabilidad espacial deja de ser significativo. La escala a partir de la cual la variabilidad espacial de las variables de control deja de tener un efecto significativo sobre el proceso se denomina REA (Representative Elementary Area) (Wood *et al.*, 1988).

Este comportamiento se debe al hecho de que cuando la escala de medida o muestreo de cualquier parámetro cambia la varianza del mismo también lo hace en función del rango de la escala de estudio. Un incremento en la escala de medida implica generalmente una disminución de la variabilidad espacial del parámetro medido (Wiens, 1989). En el caso de un medio totalmente homogéneo, la pendiente de una gráfica, expresada en escala logarítmica, de la varianza frente a la escala tiene un valor de -1 . La varianza disminuye con el aumento de escala de una forma lineal. En medios heterogéneos la pen-

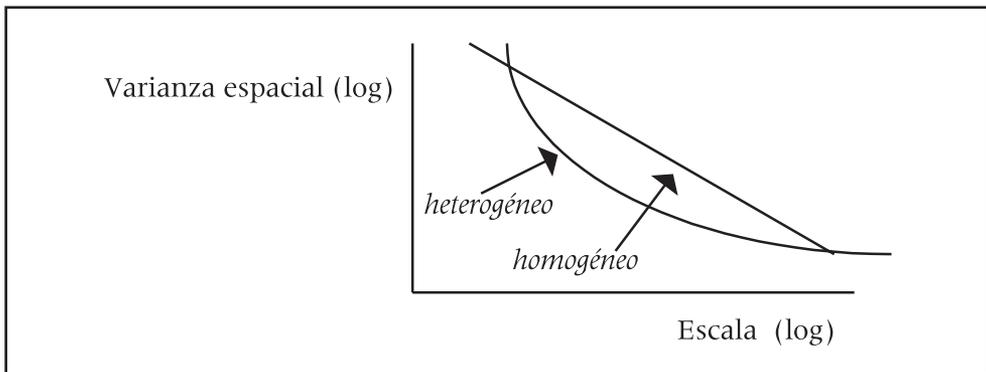


Figura 3: Cambio de varianza con la escala en distintos medios (Wiens, 1989).

diente está comprendida entre -1 y 0 , aunque también se puede presentar una relación curvilínea (fig. 3).

De todo esto podría deducirse que los patrones de comportamiento son aparentemente más predecibles en rangos de escala próximos a la regional. Sin embargo, conviene tener en cuenta que a la hora de estudiar fenómenos hidrológicos el incremento de escala espacial implica, generalmente, un incremento en la escala temporal de los acontecimientos. A grandes escalas espaciales la dinámica natural de los sistemas se desarrolla en escalas temporales que sobrepasan por regla general el tiempo de estudio y, por tanto, la predictibilidad de los mismos se hace menor. Si por el contrario se estudian procesos hidrológicos a largo plazo en pequeñas escalas espaciales la predictibilidad de los acontecimientos también disminuirá (Wiens, 1989). Existe, por tanto, un rango de escalas espacio-temporales en el que la predictibilidad es máxima (fig. 4).

3. PROPUESTA METODOLÓGICA

3.1. Elección de las escalas de trabajo y descripción de la zona de estudio

La finalidad del estudio es caracterizar la respuesta hidrológica y el transporte de sedimentos en cuencas de drenaje cuyo tamaño oscila entre 1 y 50 has en áreas mediterráneas semiáridas. El rango de escalas seleccionado intenta reflejar el comportamiento del área de estudio dentro de los diferentes niveles donde se dan los procesos de escorrentía y erosión en este tipo de ambientes (Bergkamp, 1996).

El área de estudio elegida se encuentra enclavada en el piedemonte de la Sierra del Picacho, en el término municipal de Cieza (Murcia). Geomorfológi-

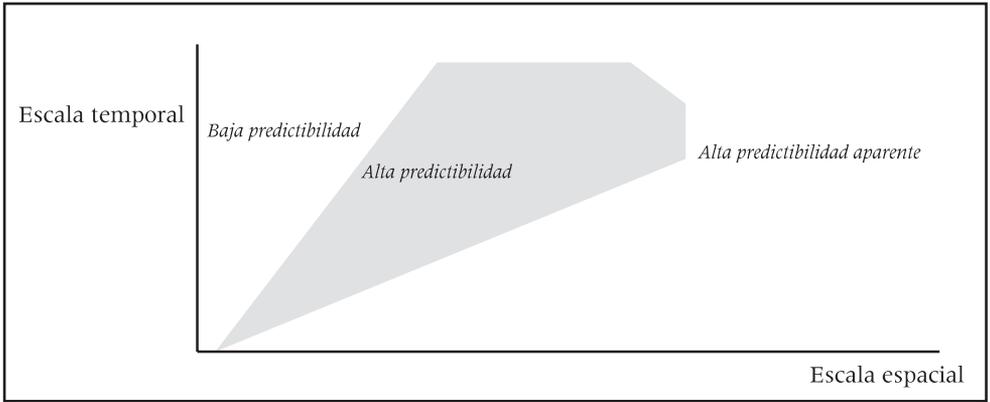


Figura 4: Predictibilidad en un rango de escalas espacio-temporales (Wiens, 1989).

camente se trata de un glacis encostrado sobre rocas carbonatadas. Los suelos predominantes son de tipo Xerosol Petrocálcico. La zona se encuadra en el piso bioclimático Mediterráneo inferior semiárido con una precipitación media de 283 mm anuales. En julio de 1994 un incendio forestal asoló la zona por lo que, en la actualidad, se pueden distinguir tres formaciones vegetales predominantes: una zona quemada en la que se está regenerando un matorral de esparto (*Stipa tenacissima*), una zona de espartal bien desarrollado, no afectado por el incendio, y una zona de pinar claro (densidad de cubierta arbórea inferior al 20%) con sotobosque mediterráneo esclerófilo.

Las escalas de trabajo seleccionadas han sido:

- Microparcelas de 1 m², en las que se realizan simulaciones de lluvia en distintas condiciones de suelo, pendiente y vegetación con el fin de identificar los patrones de comportamiento de los procesos hidrológicos a este nivel.

- Seis parcelas cerradas de 30 m², en tres zonas bien diferenciadas en cuanto a los usos del suelo (dos en zona de espartal quemado, dos en la zona de espartal bien desarrollado y otras dos en la zona de pinar). La escorrentía y la cantidad de sedimentos originados en cada parcela se recogen en depósitos situados en su borde inferior. Las características hidrodinámicas del suelo y su variabilidad espacial se han estudiado para cada una de las parcelas.

- Tres cuencas de 7,5, 6,4 y 26 has respectivamente, con diferentes orientaciones topográficas y situaciones de suelo y vegetación (dos en la zona quemada y una en la zona de pinar), en las que se caracterizaron las propiedades físicas del suelo y la variabilidad espacial de las mismas a través de una serie de transectos seleccionados. Los caudales de salida y el volumen de sedimentos que arrastran se miden en estaciones de aforo después de cada evento hidrológico (figs. 5a y 5b).

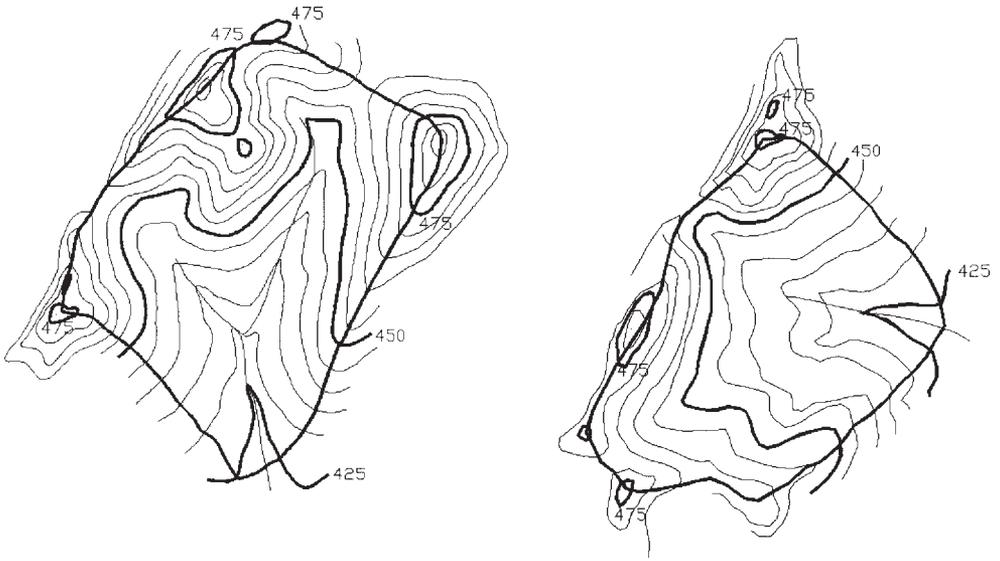


Figura 5a: Mapa topográfico de las dos cuencas estudiadas en la zona quemada.



Figura 5b: Mapa topográfico de la cuenca estudiada en la zona de

3.2. Identificación de las variables que determinan los procesos de escorrentía en cada escala

Las variables que determinan un proceso pueden cambiar o no con la escala, pero generalmente existe un cambio en la importancia relativa de las mismas cuando se trabaja a diferentes escalas.

En una primera etapa se establecerá un relación funcional entre los distintos procesos y los parámetros de control para cada una de las escalas de trabajo:

$$P = f(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, \dots)$$

donde P es el proceso que se pretende caracterizar y a_i son los parámetros de control (pendiente (a_0), cobertura vegetal (a_1), profundidad del suelo (a_2), conductividad hidráulica (a_3), humedad antecedente (a_4), precipitación (a_5), capacidad de infiltración (a_6), ...)

Posteriormente, la importancia de cada uno de los factores estudiados en el proceso se estimará mediante modelos teóricos del tipo:

$$P = ma_1^b \otimes na_2^c \otimes pa_3^d \otimes qa_4^e \otimes ra_5^f \otimes sa_6^g \otimes \dots$$

obtenidos con técnicas estadísticas de regresión. Los coeficientes que acompañan a los parámetros a_n serán los que determinen el peso de cada uno de ellos (f es un operador).

3.3. Determinación de los dominios de escala

Para averiguar cuáles son los rangos que podemos definir como dominios se necesitaría una gran cantidad de zonas estudiadas a igual escala con el fin de ir agrupando dichas zonas según la metodología propuesta por Wiens (1989). Como la determinación precisa de tales dominios, al menos en cuanto a procesos hidrológicos se refiere, resulta imposible se determinará que rangos de escala constituyen al menos un dominio. Para ello se agruparán n resultados obtenidos en las microparcels de 1 m^2 , y se observará la varianza existente entre los datos. Si ésta no presenta ningún valor máximo implicará que $n \text{ m}^2$ estarán comprendidos al menos dentro de un dominio. Si encontramos que existe un máximo, el dominio llegará desde al menos 1 m^2 hasta la extensión $m < n$, en la que la varianza aumenta significativamente. Este mismo proceso se repite agrupando parcelas entre sí, y parcelas con microparcels (fig. 6).

3.4. Cambio de escala

Una vez determinados los dominios, es posible definir unos límites de extrapolación y predecir el comportamiento hidrológico de una superficie

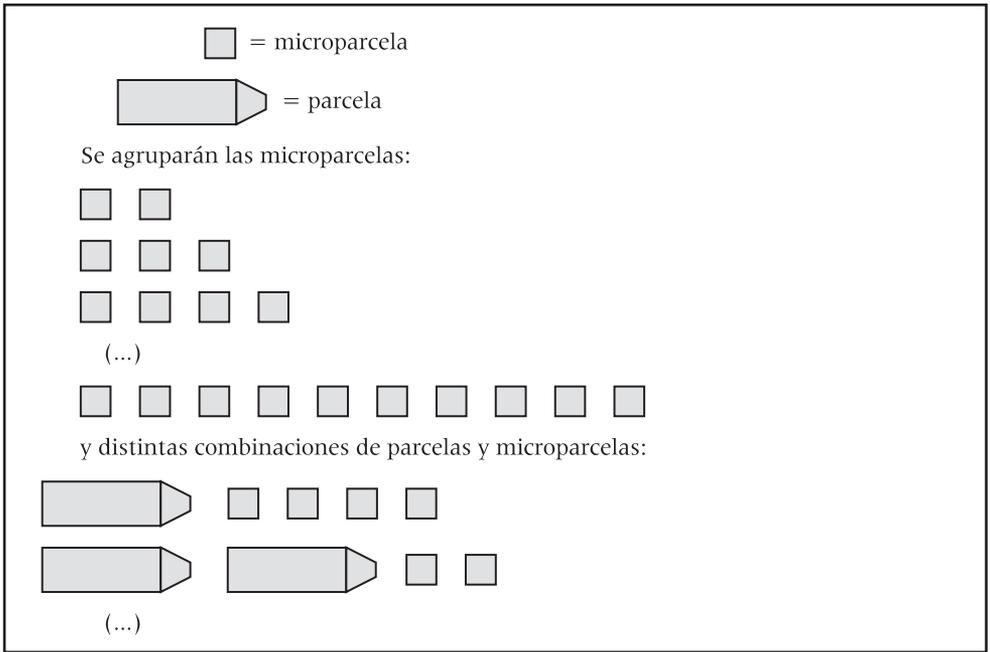


Figura 6: La varianza de estas combinaciones reflejará cuáles están comprendidas en un dominio de escala.

dada, siempre y cuando esté comprendida dentro de un dominio establecido. Identificados los parámetros de control que determinan los procesos hidrológicos a cada escala, y definidos los dominios y los límites de los mismos, la tercera etapa es comprobar hasta que punto la extrapolación de una escala a otra es consistente o no. Puesto que también se conocerá la variabilidad espacial de los parámetros que regulan los procesos, se podrá deducir su efecto en la heterogeneidad de la respuesta hidrológica dentro de cada una de las escalas, y que rango de las mismas es el que ofrece una mayor predictibilidad.

4. CONCLUSIONES

La gran mayoría de los sistemas que se presentan en la naturaleza están operando dentro de un rango de escalas más o menos amplio según el sistema que se trate. En el caso de los procesos hidrológicos, este rango es muy amplio: desde 1 m² hasta millones de kilómetros cuadrados.

Para comprender como ocurren estos procesos, y el porqué de la respuesta hidrológica de ciertas zonas, hay que conocer la dinámica del sistema que

regula dicha respuesta en un rango más o menos amplio de escalas. Este conocimiento será igualmente útil a la hora de extrapolar los resultados obtenidos en pequeñas escalas (las más fácilmente medibles) a mayores escalas. Si se establecen los límites de extrapolación (dominios de escalas), se identifican los factores que regulan la respuesta hidrológica en cada escala, y se estima la variabilidad espacial de dichos factores, se sabrá hasta que punto es posible predecir el comportamiento hidrológico de una zona a partir de los datos obtenidos en una determinada escala de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto «PROHIDRADE: Procesos hidrológicos en áreas mediterráneas de cabecera frágiles o degradadas (AMB95-0986-C02-01)» financiado por la CICYT (Plan Nacional de I+D).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bergkamp, G.** (1996): *Mediterranean Geocosystems: Hierarchical organisation and degradation*. Tesis Doctoral. Universidad de Amsterdam, 238 pp.
- Beven, K.J.** (1991): Scale considerations. En: Bowles, D.S. & O'Connell, P.E. (eds.) *Recent Advances in the modelling of Hydrological Systems*. Kluwer, Dordrecht, 357-371.
- Beven, K.** (1995): Linking parameters across scales. En: Kalma, J.D & Sivapalan, M. (eds.) *Scale Issues in Hydrological Modelling*, Wiley, Chichester, 263-282.
- Beven, K.** (1996): The limits of splitting: Hydrology. *The Science of the Total Environment*, 183, 89-97.
- Blöschl, G. & Sivapalan, M.** (1995): Scales issues in hydrological modelling: A review. En: Kalma, J.D & Sivapalan, M. (eds.). *Scale Issues in Hydrological Modelling*, Wiley, Chichester, 9-48.
- Dooge, J.C.I.** (1982): Parameterisations of hydrologic processes. En: Eagleson, P.S. (ed.). *Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models*. Cambridge University Press, London, 243-288.
- Gupta, V.K., Rodríguez-Iturbe, I. & Wood, E.F.** (1986): *Scale Problems in Hydrology*. D. Reidel, Dordrecht, 246 pp.
- Jarvis, P.G. & McNaughton, K.G.** (1986): Stomatal control of transpiration: scaling up from field to region. *Adv. Ecol. Research*, 15, 1-49.
- Kalma, J.D & Sivapalan, M.** (1995): *Scale Issues in Hydrological Modelling*, Wiley, Chichester, 489 pp.
- Klemes, V.** (1983): Conceptualisations and scale in hydrology. *Journal of Hydrology*, 65, 1-23.
- Levin, S.A.** (1992): The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73(6), 1943-1967.
- MacKay, R. & Riley, M.S.** (1991). The problem of scale in the modelling of groundwater flow and transport processes. En: *Chemodynamics of Groundwater*, Proc. Workshop November, 1991, Moint Sainte-Odile, France. EAWAG, EERO, PIR «Environment» of CNRS, IME. University Louis Pasteur, Strasbourg, 17-51.
- Meentemeyer, V.** (1989): Geographical perspectives of space, time and scale. *Landscape Ecology*, 3(3), 163-173.

- O'Neill, R.V.** (1988): Hierarchy theory and global change. En: Rosswall, T., Woodmansee, R.G. & Reiser, P.G. (eds.): *Scales and Global Change*. John Wiley & sons, Chichester, 29-45.
- O'Neill, R.V., DeAngelis, D.L., Waide, J.B. & Allen, T.F.H.** (1986): *A Hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 253 pp.
- Rodríguez-Iturbe, I. & Gupta, V.K.** (1983): Scale Problems in Hydrology. *Journal of Hydrology*, 65 (spec. issue).
- Sivapalan, M.** (1993): Linking hydrologic parameterisations across a range of scales: hillslope to catchment region. En: *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*, Yokohama Symposium, July 1993. IAHS Publ. núm. 212, 115-123.
- Turner, M.G., O'Neill, R.V., Gardner, R.H. & Milne, B.T.** (1989): Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 3(3), 151-162.
- Wiens, J.A.** (1989): Spatial scaling in ecology. Essay review. *Functional Ecology*, 3, 385-397.
- Wood, E.F., Sivapalan, M. Beven, K. & Band, L.** (1988): Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling. *Journal of Hydrology*, 102, 29-47.