

## **Síndrome de la cuenca urbanizada vs dinámica morfológica fluvial: Un caso práctico**

### **Urban stream syndrome vs fluvial morphological dynamic: A case study**

Carrero Díez, Leticia<sup>1\*</sup>; Atiénzar Pertusa, Irene<sup>2</sup>; Martínez Santa-María, Carolina<sup>1</sup>;  
Magdaleno Mas, Fernando<sup>3</sup>; Merino de Miguel, Silvia<sup>2</sup>; Fernández Yuste, J. Anastasio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Grupo de Investigación Ecología y Gestión Forestal Sostenible. ECOGESFOR-UPM. E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Avda. Ramiro de Maeztu, s/n. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid.*

<sup>2</sup>*E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. UPM. Avda. Ramiro de Maeztu, s/n. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid.*

<sup>3</sup>*CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Calle Alfonso XII, 3. 28014 Madrid.*

Autor para correspondencia: [leticia.carrero@upm.es](mailto:leticia.carrero@upm.es)

---

## Resumen

El cambio de uso del suelo debido a la urbanización puede generar importantes efectos sobre los sistemas fluviales. El más apreciable e inmediato es la alteración del régimen hidrológico el cual, provoca a su vez cambios en los regímenes sedimentológicos que afectan a la morfología fluvial. Estas respuestas derivadas de la urbanización se han identificado como Síndrome de la Cuenca Urbanizada (SCU). En España los estudios geomorfológicos en cauces afectados por SCU son casi inexistentes, a pesar de que el 70% de la población vive en grandes áreas urbanas. Este estudio presenta el caso del arroyo de Trofa (Madrid). La cuenca de este arroyo presenta dos características que la hacen un caso perfecto para el estudio del SCU: la cabecera de cuenca ha soportado, desde finales de los años setenta, un importante desarrollo urbanístico, y sin embargo, el tercio inferior de la cuenca se encuentra intacta en lo referente a modificaciones directas humanas. Este trabajo presenta la caracterización de la dinámica geomorfológica en planta y sección de un tramo del arroyo mediante la aplicación de parámetros morfométricos, e identifica y cuantifica los efectos del SCU en la morfología fluvial y su dinámica.

**Palabras clave:** Alteración hidro-geomorfológica, incisión, desplazamiento lateral, cauce activo, altura de *bankfull*.

## Abstract

Urbanization processes can generate important effects on fluvial systems as a consequence of the increase of the impermeable surface. The most appreciable and immediate effect is the flow regimes alteration. This change causes variations in the sedimentological processes that affect fluvial morphology. The responses derived from urbanization have been identified with the name of Urban Stream Syndrome (USS). In Spain the 70% of the population lives in large urban areas. Nevertheless, there are almost any geomorphological studies in channels affected by USS. The study of this syndrome is presented using the case of Trofa stream (Madrid). The basin of this stream has two characteristics that make it a perfect study case of USS effects. On one hand since the late seventies the headwaters basin has supported an important urban development. On the other hand, a third of the basin, closed to the confluence and with a restricted use, keep itself intact of human activities. This work address the characterization of the geomorphological dynamics in the plant and section of the stream by the application of morphometric parameters, and identifies and quantifies the effects of the USS on the fluvial morphology and its dynamics.

**Keywords:** Hydro-geomorphological alteration, channel migration, lateral channel change, active channel, incision, vertical distance bankfull.

---

## 1. Introducción

Los ecosistemas acuáticos siempre han estado ligados al desarrollo humano (Meyer, 2009). El uso de los recursos que ofrecen los ecosistemas acuáticos continentales genera cambios en sus condiciones naturales, siendo más dramáticos en ambientes urbanos (Karr & Chu, 2000; Reid *et al.*, 2008). Actualmente el 54% de la población mundial reside en áreas urbanas y se estima que para 2050 llegará al 66% (United Nations, 2014), por lo que es previsible un incremento del impacto antrópico.

En el ámbito científico, se denomina con el término “*Urban stream syndrome*” (Síndrome de la cuenca urbanizada (SCU)) a la degradación encontrada en los ecosistemas fluviales de cuencas urbanas (Walsh *et al.*, 2005; Booth *et al.*, 2016). Uno de los primeros efectos apreciables en las cuencas con SCU es la alteración de los regímenes hidrológicos y la calidad del agua. Esta alteración del régimen hidrológico provoca a su vez cambios en los regímenes sedimentológicos (Cianfrani *et al.*, 2006), alterando los procesos de erosión, transporte y sedimentación, y produciendo severas modificaciones en la geomorfología y estabilidad del cauce (Deng *et al.*, 2015).

Trabajos precedentes han tratado de relacionar la urbanización en la cuenca con desplazamientos laterales del cauce (Shields *et al.*, 2000; Magdaleno, 2011), así como con procesos de incisión (Hardison *et al.*, 2009). En todo caso, la falta de datos geomorfológicos históricos y de una metodología específica es un grave impedimento para realizar este tipo de estudios, habiendo propuesto algunos autores comparar cuencas similares en el mismo periodo de tiempo (Galster *et al.*, 2008), o utilizar la misma cuenca hidrográfica dividiéndola en áreas con diferentes niveles de urbanización (Krhoda & Kwambuka, 2016).

El río Manzanares, en Madrid, es un claro ejemplo de río que sufre los efectos del SCU. Con el objetivo de conseguir su recuperación ambiental, en el año 2016 se diseñó un ambicioso proyecto de restauración fluvial “Restauración fluvial del río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo (MADRID)” (<http://restauracionfluvialriomanzanares.es/>), enmarcado dentro del Plan PIMA-Adapta (Plan de Impulso al Medio Ambiente para la adaptación al Cambio Climático en España). Este trabajo se encuadra dentro de dicho proyecto, con el objetivo de plantear una metodología novedosa para caracterizar, cuantificar y evaluar los efectos vinculados al SCU en el arroyo de Trofa con el fin de contestar a la pregunta ¿existen diferencias significativas en la dinámica morfológica del arroyo de Trofa antes y después de que se consolidara el proceso urbanizador de la cuenca?

## 2. Materiales y métodos

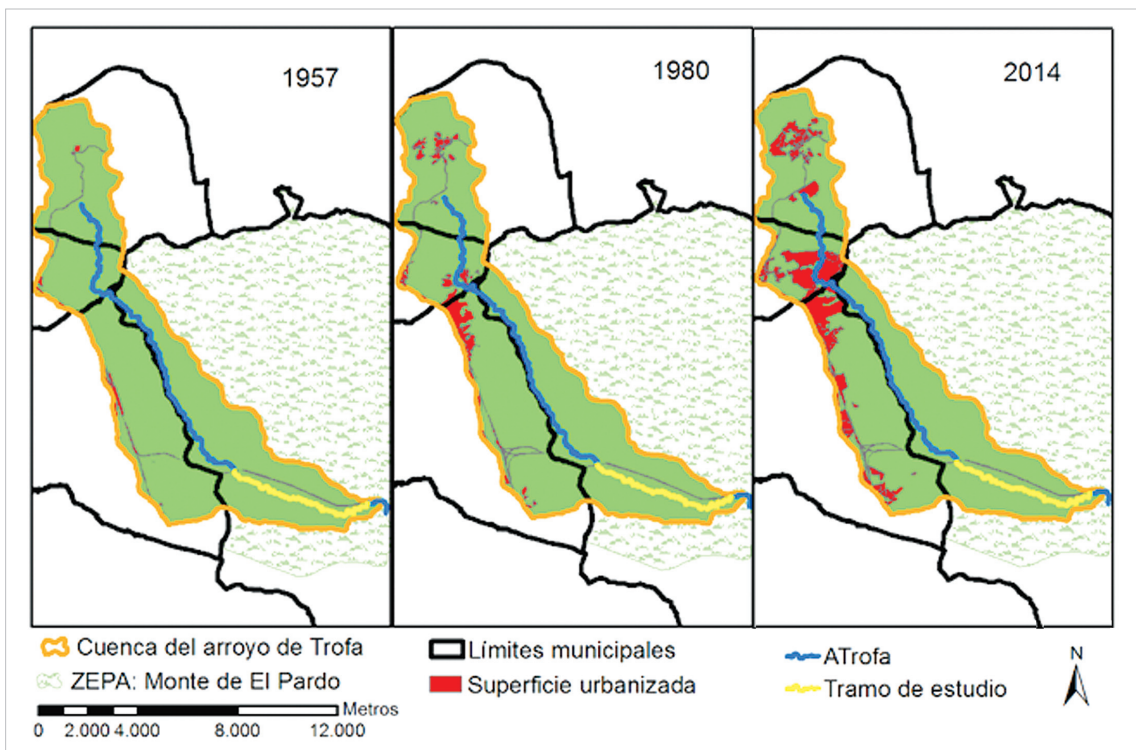
### 2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a un tramo del cauce del arroyo de la Trofa. Este arroyo nace en la Sierra de Hoyo de Manzanares (Madrid) y sus 20,6 km discurren

por la margen derecha del río Manzanares hasta desembocar en éste poco antes de que entre en el casco urbano de la ciudad de Madrid.

Este arroyo está considerado como una única masa de agua con código ES030MSPF0436010, la cual pertenece al ecotipo 1 recogido en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH), y está clasificada como río natural, con estado ecológico final “peor” que bueno (CHT, 2015b), siendo los elementos de calidad biológicos e hidromorfológicos los responsables de dicha evaluación.

La cuenca que vierte al arroyo de la Trofa cubre una superficie de 72,5 km<sup>2</sup> repartida entre los municipios de Hoyo de Manzanares y Torrelodones en su cabecera, y Las Rozas y Madrid en su parte media y baja. El proceso de urbanización ha supuesto que la cuenca pasase de tener un área impermeable total (AIT) del 1,8% en 1957 a un 5,7% en 1980, alcanzando un 13,8% en el año 2014 (*Figura 1*), lo que le supone su calificación como sistema degradado (Schueler, 2000).



**Figura 1.** . Evolución de la superficie urbanizada en la cuenca del arroyo de Trofa entre los años 1957, 1980 y 2014.

El tramo de estudio seleccionado se sitúa en la cuenca media-baja, dentro del Monte de El Pardo. Este tramo, con una longitud de 7,6 km, está delimitado aguas arriba por el puente de la línea ferroviaria Madrid-Ávila-Segovia y aguas abajo por el puente del Camino de la Zarzuela. En condiciones naturales o mínimamente alteradas, la morfología en planta se corresponde a un cauce trenzado que en el tramo final presenta un macro-cauce con un patrón meandriforme, junto con una importante zona aluvial sin elementos que condicionen su movilidad.

## 2.2. Material y métodos

El periodo de grandes cambios seleccionado son los años 70 y 80 del siglo XX. En este periodo la cuenca sufrió un importante desarrollo urbanístico, a la vez que se dejaron de realizar descastes del ganado salvaje, generando la situación de superpoblación actual.

Para estudiar la dinámica temporal de los procesos morfológicos se fotointerpretaron series históricas de imágenes aéreas, ortorrectificadas, y se analizó el modelo digital del terreno (MDT) de la zona.

Los vuelos elegidos para este estudio fueron:

- El vuelo americano serie B (1956-1957) en B/N con escala de vuelo 1/32000.
- El vuelo interministerial (1973-1986) también en B/N con escala de vuelo 1/18000.
- Como vuelo actual, el PNOA 2014 ya en color con una escala de vuelo tal que se garantiza un tamaño de píxel de 0,5 metros.

Se caracterizó la dinámica morfológica del arroyo entre los años 1957 y 1980 (periodo pre-urbanización, P.PRE) y entre los años 1980 y 2014 (periodo post-urbanización, P.POST).

El Modelo Digital del Terreno (MDT) fue proporcionado por la empresa INCLAM, encargada de realizarlo para el estudio de “Restauración fluvial del río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo (MADRID)” en el año 2016. Este MDT fue elaborado a partir de nubes de puntos LiDAR del PNOA 2009, con un paso de malla de 1 metro y resolución altimétrica de 0,3 m.

Siguiendo a Ollero y Romeo (2007), se realizó un análisis diacrónico de la dinámica morfológica comparando parámetros representativos de la geomorfología del cauce. Este análisis tuvo por objeto determinar si el cauce había sido capaz de desarrollar un trabajo geomorfológico suficientemente activo, dando lugar a alteraciones inducidas por el SCU.

Este trabajo incorporó 3 novedades frente a otros estudios previos:

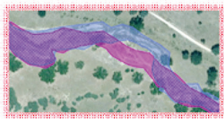
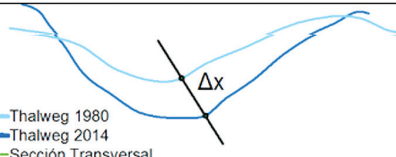
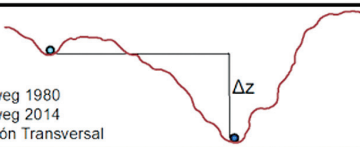
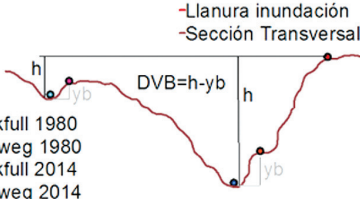
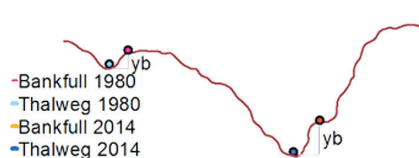
- Se caracterizaron y cuantificaron no sólo parámetros representativos de la morfología en planta como son: área ocupada por el cauce activo (ACA) y desplazamiento en planta ( $\Delta x$ ), sino que se incorporaron 3 parámetros representativos de la geomorfología en sección: incisión ( $\Delta z$ ), distancia vertical al *bankfull* (DVB) y altura del *bankfull* ( $y_b$ ).
- El análisis diacrónico empleó 127 secciones transversales no elegidas con criterio experto, sino trazadas automáticamente con el programa HEC-GeORAS, siguiendo las recomendaciones propuestas por el manual de HEC-RAS (Usace HEC, 2010). Al automatizar e incrementar el número de seccio-

nes analizadas se mejoró la modelización del cauce y las llanuras de inundación.

- A partir de las fotografías aéreas, y con el apoyo del MDT, se digitalizaron para los años de referencia especificados aquellas líneas que reflejan una característica morfológica del cauce, como son: el *thalweg*, los límites de la superficie de cauce activo, los límites del *bankfull* y una línea de referencia en la llanura de inundación. Esta tarea se realizó con el programa ArcGIS. Posteriormente, de cada punto de corte de dichas líneas con las secciones transversales, se obtuvo la coordenada *x* respecto al origen de la sección y la cota asociada del MDT. Los resultados fueron posteriormente analizados estadísticamente con el programa SPSS.

La *Tabla 1* muestra un resumen de los parámetros geomorfológicos usados en este estudio, clasificados en función de la alteración morfológica que describen y de los datos de partida que necesitan para su estimación.

**Tabla 1.** Tabla resumen de los parámetros utilizados para evaluar la alteración morfológica.

	Parámetro Unidades		Información de partida
Alteración en planta	Área ocupada por el cauce activo (ACA) ha	 <ul style="list-style-type: none"> <li>● Cauce activo 2014</li> <li>● Cauce activo 1980</li> </ul>	Cauces activos en 1980 Cauces activos en 2014
	Desplazamiento en planta ( $\Delta x$ ) m	 <ul style="list-style-type: none"> <li>— Thalweg 1980</li> <li>— Thalweg 2014</li> <li>— Sección Transversal</li> </ul>	Thalweg en 1957 Thalweg en 1980 Thalweg en 2014
Alteración en sección	Incisión ( $\Delta z$ ) m	 <ul style="list-style-type: none"> <li>— Thalweg 1980</li> <li>— Thalweg 2014</li> <li>— Sección Transversal</li> </ul>	Thalweg en 1980 Thalweg en 2014
	Distancia vertical al bankfull (DVB) m	 <ul style="list-style-type: none"> <li>— Llanura inundación</li> <li>— Sección Transversal</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Bankfull 1980</li> <li>● Thalweg 1980</li> <li>● Bankfull 2014</li> <li>● Thalweg 2014</li> </ul>	Thalweg en 1980 Thalweg en 2014 Bankfull en 1980 Bankfull en 2014 Llanura de inundación
	Altura del bankfull ( <i>y<sub>b</sub></i> ) m	 <ul style="list-style-type: none"> <li>● Bankfull 1980</li> <li>● Thalweg 1980</li> <li>● Bankfull 2014</li> <li>● Thalweg 2014</li> </ul>	Thalweg en 1980 Thalweg en 2014 Bankfull en 1980 Bankfull en 2014 Llanura de inundación

La existencia de cambios significativos entre las dos fechas analizadas (1980 y 2014) en cada uno de los parámetros utilizados para la caracterización del cauce ( $\Delta x$ ,  $\Delta z$ , DVB e  $y_b$ ) se contrastó mediante:

- Pruebas t-student, ANOVA y Bonferroni, en el caso de parámetros que cumplieran la hipótesis de normalidad.
- Pruebas para dos muestras independientes de Mann-Whitney, en el caso de los parámetros no normales. La normalidad de cada parámetro se contrastó previamente mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk para muestras pequeñas. Todos los análisis se realizaron mediante SPSS 13.0.1.

### 3. Resultados y discusión

El área ocupada por el cauce activo aumentó, pasando de 18,29 ha en 1980 a 21,27 ha en 2014, lo que supone un incremento del 20,1%. La superficie común en ambos años equivale a un 54%, mientras que el ACA perdida es del 16% y el ACA ganada es del 30%. Este parámetro indica que se ha producido una pérdida de dinamismo morfológico en planta, ya que el valor del ACA común es alto (Magdaleno, 2011). El ACA perdida menor que el ACA ganada indica una tendencia al ensanchamiento generalizado del cauce activo.

La gran dispersión que mostraron los datos del resto de parámetros no ofrecía ningún resultado claro lo que obligó a considerar la posibilidad de que algún factor no contemplado permitiera explicar más adecuadamente esa variabilidad. El trabajo de campo permitió identificar tramos con patrones morfológicos distintos (*Figura 2*) y se formuló la hipótesis de que las variables analizadas tendrían comportamientos distintos en cada uno de los tipos identificados.

En la *Tabla 2* se presentan los resultados para los distintos parámetros en función de si el análisis estadístico ha tenido en cuenta todos los datos (tramo completo) o por tipo morfológico (T1, T2 o T3).



**Figura 2.** Localización de los diferentes tipos de tramo en función de su patrón morfológico.

**Tabla 2.** Tabla resumen que muestra el estadístico mediana para cada parámetro estudiado

Parámetro	Tramo	Periodo	
		PRE	POST
Desplazamiento en planta ( $\Delta x$ )	Completo	9 m	9 m
	T1	6,2 m	17,9 m
	T2	16,1 m	1,9 m
	T3	9,3 m	7,3 m
Incisión ( $\Delta z$ )	Completo		0,8 m
	T1		1,16 m
	T3		0,55 m
Distancia vertical al bankfull (DVB)	Fecha		1980      2014
	T1		3,2      3,8
	T3		1,7      2,4
Altura del bankfull (yb)	Fecha		1980      2014
	T1		1,7      2,6
	T3		2,3      3,0

En el tramo Tipo 1, los resultados revelaron un mayor desplazamiento en planta en el P.POST (17,9 m) que en el P.PRE (6,2 m), además de presentar valores de incisión elevados (1,16 m). Esta tipología se caracteriza por presentar movimientos laterales y verticales significativos. Los resultados arrojados por los parámetros DVB e yb indicaron que el lecho del cauce y la cota del *bankfull* se encuentran desconectados mientras que el *bankfull* con respecto a la llanura de inundación no ha sufrido grandes cambios desde 1980. Estos resultados coinciden con las características de esta tipología y nos indican que en esta zona el arroyo ha experimentado un aumento del desplazamiento lateral y vertical en el último periodo.

En el tramo Tipo 2, se observó una reducción drástica de movimientos laterales en el P.POST pasando de 16,1 m a 1,9 m, señal de encajonamiento. La incisión no se pudo evaluar debido a que la reducida movilidad lateral hace imposible que los datos de cota del MDT del 2014 sean extrapolados a 1980. Durante el P.PRE el río presentaba una morfología en planta correspondiente a un cauce trenzado, sin embargo el encajonamiento sucesivo en el P.POST ha limitado la movilidad lateral.

El tramo Tipo 3 presentó una similitud en mediana en el parámetro  $\Delta x$  en los P.PRE y P.POST, junto con los valores bajos e incisión (0,55 m). Estos resultados



concuerdan con las características encontradas en esta tipología, la cual presenta movimiento lateral significativo y un movimiento vertical no significativo. Aunque en magnitud la incisión no es elevada, los valores de DVB e yb muestran que el proceso de incisión se está produciendo en bloque, es decir que se está desconectando tanto la llanura de inundación como el *bankfull* al unísono. La explicación de este comportamiento hay que buscarla en que las secciones que lo representa se localizan en la zona más cercana a la confluencia con el Manzanares. La estabilidad del cono aluvial que se manifiesta en esa confluencia limita los procesos de incisión, favoreciendo los de sedimentación, y la forma en planta se presenta como un macrocauce.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos confirmaron la alteración de la dinámica morfológica del arroyo de Trofa debida al SCU, aunque si bien esa alteración no se produjo de forma homogénea en todo el tramo. Así, los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas entre el periodo pre-urbanización y post-urbanización como constata los valores de incisión de más de un metro de la cota de lecho con respecto al *bankfull* en el tramo Tipo 1, o la reducción del 11,8% de movilidad lateral en el Tramo tipo 2, constatando la estrecha relación entre el tipo y magnitud del efecto y el patrón morfológico del cauce.

Nuestra propuesta metodológica intenta solucionar el gran problema de la falta de datos de campo para los estudios de geomorfología fluvial, utilizando los MDT de precisión centimétrica. Por ello, se propone la utilización MDTs obtenidos a partir de restitutiones de fotografías históricas, con el fin de disponer de datos de cota adecuados. En este sentido, cabe reseñar que en nuestro caso de estudio solo se pudieron obtener datos de cota fiables para dos de los años de referencia (1980 y 2014), lo que impidió evaluar el periodo P.PRE (1957-1980) para los parámetros que caracterizan la incisión del cauce.

La metodología desarrollada es fácilmente aplicable a otras cuencas, lo que abre nuevas líneas de investigación, siendo una de ellas el analizar cuencas con características similares a nuestro caso de estudio, pero sin afección por el SCU, con el fin de comparar los resultados.

#### 5. Bibliografía

- Booth, D.B.; Roy, A.H.; SMITH, B.; Capps, K.A.; 2016. Global perspectives on the urban stream syndrome. *Freshwater Science*, 35(1): 412-420. <https://doi.org/10.1086/684940>
- Cianfrani, C.M.; Hession, W.C.; Rizzo, D.M.; 2006. Watershed imperviousness impacts on stream channel condition in southeastern Pennsylvania. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(4): 941-956. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04506.x>

- CHT. 2015b. *Inventario de presiones y evaluación del estado de las masas de agua*. Anejo 7 de la Memoria del Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. Confederación Hidrográfica del Tajo. Madrid.
- Deng, X.; Xu, Y.; Han, L.; Song, S.; Yang, L.; Li, G.; Wang, Y.; 2015. Impacts of Urbanization on River Systems in the Taihu Region, China. *Water*, 7: 1340-1358. <https://doi.org/10.3390/w7041340>
- Galster, J.C.; Pazzaglia, F.J.; Germanoski, D.; 2008. Measuring the Impact of Urbanization on Channel Widths Using Historic Aerial Photographs and Modern Surveys. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(4): 948-960. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00193.x>
- Hardison, E.C.; O'Driscoll, M.A.; Deloatch, J.P.; Howard, R.J.; Brinson, M.M.; 2009. Urban land use, channel incision, and water table decline along coastal plain streams, North Carolina. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(4): 1032-1046. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00345.x>
- Karr, J.R.; CHU, E.W.; 2000. Introduction: Sustaining living rivers. Assessing the *Ecological Integrity of Running Waters*, 422/423: 1-14. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4164-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4164-2_1)
- Krhoda, G.O.; Kwambuka, A.M.; 2016. Impact of urbanization on the morphology of Moina/Ngong River Channel, Nairobi River basin, Kenya. *Journal of Geography and Regional Planning*, 9(4): 36-46. <https://doi.org/10.5897/JGRP2015.0528>
- Magdaleno Mas, F.; 2011. *Evolución hidrogeomorfológica del sector central del río Ebro a lo largo del siglo XX: implicaciones ecológicas para su restauración* (Tesis Doctoral, E. T.S.I.Montes (UPM)). Madrid.
- Meyer, J.L.; 2009. *Urban Aquatic Ecosystems*. In: Likens GE, *Encyclopedia of Inland Waters*. Elsevier, Inc. 367-377. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00236-2>
- Ollero, A.; Romeo, R.; 2007. *Las alteraciones geomorfológicas de los ríos. Mesas de trabajo de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Reid, H.E.; Gregory, C.E.; Brierley, G.J.; 2008. Measures of physical heterogeneity in appraisal of geomorphic river condition for urban streams: Twin Streams Catchment, Auckland, New Zealand. *Physical Geography*, 29(3): 247-274. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.29.3.247>
- Shields JR,F.D.; Simon, A.; Steffen, L.J.; 2000. Reservoir effects on downstream river channel migration. *Environmental Conservation*, 27(1): 54-66. <https://doi.org/10.1017/S0376892900000072>
- Schueler, T.; 2000. *The Importance of Imperviousness: The Practice of Watershed Protection*. Center for Watershed Protection. Ellicott City, MD. Pages 7-18.
- United Nations, 2014. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights* (ST/ESA/SER.A/352). Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Washington.
- Usace HEC, January 2010. *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual Version 4.1*. 790 pp., Downloadable <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.aspx>
- Walsh, C.J.; Roy, A.H.; Feminella, J.W.; Cottingham, P.D.; Groffman, P.M.; Morgan II, R.P.; 2005. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3): 706-723. <https://doi.org/10.1899/04-028.1>