



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**Universidad
del Tolima**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA DEL AGUA Y MEDIO AMBIENTE - IIAMA
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA HIDRÀULICA I MEDI AMBIENT

UNIVERSIDAD DEL TOLIMA

FACULTAD DE INGENIERÍA FORESTAL

ESCALAMIENTO DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO EN EL RÉGIMEN DE CRECIDAS A ESCALA DE CUENCA APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA (SURAMÉRICA)

TESIS DOCTORAL

LUIS EDUARDO PEÑA ROJAS

Director por la Universidad Politécnica de Valencia

DR. FÉLIX FRANCÉS GARCÍA

Director por la Universidad del Tolima

DR. MIGUEL IGNACIO BARRIOS PEÑA

IBAGUÉ (CO) / VALENCIA (ES), MAYO DE 2017

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a los profesores Félix Francés y Miguel Barrios por permitirme aprender de ellos y de quienes he construido un modelo a seguir por sus calidades como investigadores y seres humanos. Todas sus observaciones y orientaciones han sido determinantes para desarrollar esta tesis doctoral. Así mismo, agradezco a los profesores de la Universidad del Tolima, por sus aportes durante esta etapa de mi formación como investigador.

Así mismo quiero agradecer a Ilona Vaskôva, cuya tesis doctoral fue una importante guía en el desarrollo de esta investigación. A mis compañeros del doctorado en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas de la Universidad del Tolima y del Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental de la Universitat Politècnica de València por su amistad y apoyo durante la realización de este trabajo.

Al programa de Becas de Doctorados Nacionales de Colciencias –Colombia- (Convocatoria 567) por la financiación como becario para la realización de esta tesis, que también ha sido parcialmente subvencionada por la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Ibagué a través del proyecto (12-262-COL00). Por parte de la Oficina de Investigaciones de la Universidad del Tolima, a través del proyecto (Código 1300213), por parte de la Oficina de Relaciones Internacionales y Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima, en ayudas para la movilidad. Por parte de la Facultad de Tecnologías en el levantamiento de información de campo durante la realización del proyecto “Batimetrías en zonas potencialmente inundables del Río Combeima”. Por parte de la Universidad Politécnica de Valencia, mediante los proyectos de investigación españoles ECO-TETIS (Ref. CGL2011-28776-C02-01) y el proyecto TETIS-MED (Ref. CGL2014-58127-C3-3-R).

A mis amigos, compañeros de estudio y de trabajo por todos sus buenos deseos y apoyo, especialmente a Juan Camilo Múnera Estrada por su amistad y todas sus enseñanzas con el modelo TETIS y a mi amigo Mario Alberto Zapata Peláez por sus orientaciones y revisiones de idioma, también a Arnulfo Alvares por sus enseñanzas y apoyo en el uso de los sistemas de información geográfica.

Finalmente y no menos importante, agradezco a Dios por su respaldo y misericordia reflejados en el amor y apoyo de mis padres, mi hermana y por la bendición de darme un hogar tan maravilloso conformado por quienes dan motivación a mi vida: mi esposa Angélica Sandoval y mis hijos José Santiago y Juan Pablo.

PUBICACIONES

Los resultados de la presente tesis doctoral han sido presentados parcialmente en cinco eventos internacionales con tres presentaciones orales y dos posters. Así mismo, se publicaron dos artículos en revista internacional indexada, tal como se indica a continuación:

Presentación oral en congreso internacional

- Peña L.E., García A.A., Caviedes I. (2012). **Methodological Alternative for Monitoring Rivers and Floods Warning**. 8th Alexander von Humboldt International Conference: Natural Disasters, Global Change, and the Preservation of World Heritage Sites, Cusco, Perú, 12-16 November (poster-oral presentation). <http://meetingorganizer.copernicus.org/AvH8/AvH8-18.pdf>
- Peña L.E., Francés F., Barrios M.I. (2015). **Effects of the change of land use in discharge patterns using distributed hydrological modelling in a tropical watershed**. Oral presentation at The Third International Conference on Water, Energy and Environment ICWEE2015, American University of Sharjah, Sharjah - United Arab Emirates, 24-26 March 2015. Abstract ISBN 978-9948-22-718—2, Pp 49.
- Peña L.E., Francés F., Barrios M.I. (2017). **Scaling behavior in the relationship between land use changes and annual Volume**. The 3rd International conference on water resource and Environmental (WRE2017), Qingdao, Republic of China, 26 -29 June – July 2017. Abstracts 2151 Oral presentation / invited Speaker. Session 5 Soil, Groundwater and Hydrology WRE2151 , Wednesday, 28 June 2017, 14:45-15:00. <http://www.wreconf.org/file/WRE2017--conference%20guide.pdf>

Presentación poster en congreso internacional

- Peña L.E., Francés F., Barrios M.I. (2015). **Scaling the flood regime with the soil hydraulic properties of the catchment**. European Geosciences Union, General Assembly 2015, Vienna, Austria, 12-17 April 2015. Geophysical Research Abstracts, Vol 17, EGU2015-7833, ISSN: 1029-7006. Poster presentation. Session HS5.7, Thursday, 16 April 2015, 17:30-19:00. Poster R75. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-7833-2.pdf>
- Peña L.E., Francés F., Barrios M.I. (2015). **Scaling behavior in the relationship between land use changes and flood regime**. International Union of Geodesy and Geophysics, 26th IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech Republic, 22 June – July 2 2015. Hydrologic Non-Stationarity and Extrapolating Models to Predict the Future, Abstracts HS02p-31, ISSN:. Poster presentation. Session HS02 Category IAHS (Hydrology), Saturday, 27 June 2015, 15:00-16:30. Poster HS02p-031. <https://www.czech-in.org/cm/IUGG/CM.NET.WebUI/CM.NET.WEBUI.scp2/SCPFunctionDetail.aspx?confID=05000000-0000-0000-0000-000000000053&sesID=05000000-0000-0000-0000-0000000003203&absID=07000000-0000-0000-0000-0000000019265>

Publicaciones en revista indexada internacional

- García, B., Peña, L. E., Barrios, M., & Múnera, J. (2016). **Uncertainty of discharge estimation in high-grade Andean streams. Flow Measurement and Instrumentation**, Flow Measurement and Instrumentation Journal, 48, 42–50. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2016.02.005
 - Peña, L.E., Barrios M., Francés F. (2016). **Flood quantiles scaling with upper soil hydraulic properties for different land uses at catchment scale**, Journal of Hydrology Hydrology, 541, 1258–1272. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.031>
-

RESUMEN

Se ha reconocido la importancia de conocer el efecto de los cambios de usos del suelo sobre el régimen de caudales en cuencas hidrográficas. En este sentido, se han desarrollado investigaciones para evaluar dicho efecto desde diferentes enfoques como el análisis no estacionario, la simulación hidrológica y la observación de cuencas pareadas, entre otros. De manera que esta investigación contribuye a describir el efecto de cambios de uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de las cuencas, considerando la variación propiedades hidráulicas de los suelos, las cuales se relacionan con el tipo de suelo y cobertura vegetal. Esta investigación se desarrolló en la cuenca del Río Combeima en Colombia-Suramérica, donde a partir de la modelación hidrológica distribuida, se describe el efecto de cambios históricos de usos del suelo como bosques, cultivos y pastizales, sobre la magnitud de los caudales máximos y volúmenes medios anuales de escorrentía. Para el desarrollo de este análisis, se relacionaron los cambios en el uso del suelo con las propiedades hidráulicas del suelo, específicamente, el contenido de agua en el suelo en zona de raíces o almacenamiento estático H_u y la conductividad hidráulica saturada K_s . La variación de los valores de H_u y K_s relacionados con cada uso del suelo, condujo a cuantificar el efecto de los cambios en las coberturas vegetales sobre los caudales pico en el régimen de crecidas del Río Combeima. Los resultados obtenidos, sugieren que valores bajos de H_u y K_s , se asocian con coberturas como pastos, las cuales se caracterizan por presentar infiltraciones bajas, mientras que altos valores de H_u y K_s , se relacionan con los bosques. Así mismo, se identifica que la disminución de la capacidad de infiltración en la cuenca produce incrementos en la magnitud de los caudales pico, y el aumento de la capacidad de infiltración y retención de agua en el suelo contribuye a la atenuación de los caudales máximos.

Por otra parte, se ha demostrado que los cambios en el uso del suelo, son una fuente de no estacionariedad en las series de caudales y puede ser identificada mediante los cambios, positivos o negativos, en la tendencia de las series temporales. Esta tesis se enfocó en probar la hipótesis de la aplicación de estimación conjunta de la teoría de escala, mediante la realización de pruebas en las que es posible identificar que las propiedades de invarianza de las propiedades hidráulicas del suelo, las cuales están relacionadas con el régimen de crecidas y volúmenes medios anuales de escorrentía. El análisis se centró principalmente en dos parámetros: el almacenamiento estático H_u y la conductividad hidráulica saturada K_s . En este contexto, esta investigación no se

desarrolló en torno a explicar el problema de la no estacionariedad, sino que propone introducir las propiedades de escalabilidad de las propiedades hidráulicas del suelo para predecir caudales como respuesta hidrológica en escenarios de cambios de uso del suelo. Para lograrlo, se realizaron simulaciones en una cuenca hipotética basada en la información de la cuenca del Río Combeima, en donde se plantearon escenarios de variación espacial de los usos del suelo en relación con las propiedades hidráulicas, para evaluar su efecto sobre las propiedades de escalabilidad de los parámetros Hu y Ks en relación con los caudales máximos. Así mismo, se realizaron pruebas en donde se consideró la distribución espacial homogénea de la lluvia, para evaluar sus potenciales efectos sobre la escalabilidad de las propiedades hidráulicas del suelo en el régimen de crecidas.

Así mismo, se evaluaron las propiedades de invarianza en escala, de los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad: GEV y Gumbel, en escenarios de cambios de uso del suelo, considerando la relación entre los parámetros Hu y Ks , y la magnitud de los cuantiles de crecidas. Adicionalmente, se realizó un análisis similar para el régimen de volúmenes anuales medios de esorrentía, mediante la aplicación de la función LogNormal.

El efecto de los cambios de uso del suelo sobre la no estacionariedad de las series de caudales en la cuenca del Combeima se evaluó mediante un análisis no estacionario lineal y no lineal, cuyos resultados permitieron identificar la conveniencia de introducir la hipótesis de no estacionariedad en el análisis de frecuencia de caudales máximos.

Los resultados obtenidos, indican que la incorporación de la teoría fractal en la relación entre las propiedades hidráulicas del suelo y el comportamiento de los caudales en cuencas hidrográficas, tiene potenciales aplicaciones prácticas en la ingeniería y la planificación de cuencas, dada su sencillez, ya que se expresa como una relación de potencia, útil para realizar estimaciones de los efectos de los cambios en los usos del suelo sobre el régimen de caudales.

ABSTRACT

The importance of the effect of land use changes on watersheds has been widely acknowledged. Several studies have evaluated this effect through various approaches including non-stationary analysis, hydrological simulation and the observation of paired watersheds. The present study aims to describe the effect of land use changes on the hydrological response of watersheds considering the variation of the hydraulic properties of soil, which are related to the soil type and vegetal cover. This investigation was conducted in the watershed of Combeima River, Colombia, South America. By using distributed hydrological modelling, the effect of historical land use changes – including forest, crops and grasslands – on the magnitude of peak flows and mean annual runoff volumes was described. The analysis was carried out by relating land use changes to the hydraulic properties of soil, namely, the soil water content in the root zone or static storage (Hu) and the saturated hydraulic conductivity (Ks). Variation of the Hu and Ks values with respect to each soil type allowed quantifying the effect of changes in vegetal covers on the peak flows of flood events in Combeima River. Results of the analysis indicate that low Hu and Ks values are associated with land covers such as grasslands, which are characterized by having low infiltration, while high Hu and Ks values are more characteristic of forests. It was also identified that a decrease in the watershed infiltration capacity results in an increase in the magnitude of peak flows, while an increase in the infiltration capacity and soil water retention contributes to the attenuation of peak flows.

Land use changes have been demonstrated to be a source of non-stationarity in the flow series, which can be identified through changes, positive or negative, in the time series trend. The hypothesis of the joint application of scale theory was tested in this study, showing that the invariance properties of the soil hydraulic properties are related to the flood regime and mean annual runoff volumes. The analysis focused mainly on two parameters: the static storage Hu and the saturated hydraulic conductivity Ks ; therefore, this study did not attempt to explain the problem of non-stationarity, but rather to introduce the scalability properties of the soil hydraulic properties to predict flows, as a hydrological response to scenarios of land use change. Scenarios of spatial variation of land uses with respect to soil hydraulic properties were set up to assess the effect of those changes on the scalability properties of Hu and Ks and peak flows. Likewise, tests were conducted to evaluate the potential effects of the homogeneous distribution of precipitation on the scalability of the soil hydraulic properties during flood events.

Properties of scale invariance were evaluated for the parameters of two probability distribution functions: GEV and Gumbel, for scenarios of land use change, considering the relationship between Hu and Ks and the magnitude of the flood quantiles. A similar analysis was carried out for the regime of mean annual runoff volumes through the application of the LogNormal distribution.

The effect of land use changes on the non-stationarity of Combeima River flow series was evaluated using linear and non-linear stationary analysis, whose results verified the convenience of introducing the non-stationarity hypothesis in the frequency analysis of peak flows.

Results of this study indicate that the incorporation of fractal theory to relate the hydraulic properties of soil and flow behavior in a watershed has potential practical applications in engineering and watershed management, given its simplicity as a power relation and usefulness to estimate the effects of land use changes on the flood regime.

RESUM

S'ha reconegut la importància de conèixer l'efecte dels canvis d'usos del sòl sobre el règim de cabals en conques hidrogràfiques. En aquest sentit, s'han desenvolupat recerques per a avaluar aquest efecte d'ones de diferents enfocaments com l'anàlisi no estacionària, la simulació hidrològica i l'observació de conques pareadas, entre uns altres. De manera que aquesta recerca contribueix a descriure l'efecte de canvis d'ús del sòl sobre la resposta hidrològica dels conques, considerant la variació propietats hidràuliques dels sòls, els quals és relacionen amb el tipus de sòl i cobertura vegetal. Aquesta recerca és va desenvolupar en la conca del riu Combeima a Colòmbia - Sud-Amèrica, on a partir de la modelació hidrològica distribuïda, és descriu l'efecte de canvis històrics d'usos del sòl com a boscos, cultius i pasturatges, sobre la magnitud dels cabals màxims i volums mitjans anuals de vessament. Per al desenvolupament d'aquesta anàlisi, és van relacionar els canvis en l'ús del sòl amb els propietats hidràuliques del sòl, específicament, el contingut d'aigua en el sòl en zona d'arrels o emmagatzematge estàtic Hu i la conductivitat hidràulica saturada Ks . La variació dels valors de Hu i Ks relacionats amb cada ús del sòl, va conduir a quantificar l'efecte dels canvis en els cobertures vegetals sobre els cabals pique en el règim de crescudes del riu Combeima. Els resultats obtinguts, suggereixen que valors baixos de Hu i Ks , s'associen amb cobertures com a pastures, els quals és caracteritzen per presentar infiltracions baixes, mentre que alts valors de Hu i Ks , és relacionen amb els boscos. Així mateix, s'identifica que la disminució de la capacitat d'infiltració en la conca produeix increments en la magnitud dels cabals pique, i l'augment de la capacitat d'infiltració i retenció d'aigua en el sòl contribueix a l'atenuació dels cabals màxims.

D'altra banda, s'ha demostrat que els canvis en l'ús del sòl, són una font de no estacionariedad en els sèries de cabals i pot ser identificada mitjançant els canvis, positius o negatius, en la tendència dels sèries temporals. Aquesta tesi és va enfocar a provar la hipòtesi de l'aplicació d'estimació conjunta de la teoria d'escala, mitjançant la realització de proves en els quals és possible identificar que els propietats de invarianza dels propietats hidràuliques del sòl, están relacionades amb el règim de crescudes i volums mitjans anuals de vessament. L'anàlisi és va centrar principalment en dos paràmetres: l'emmagatzematge estàtic Hu i la conductivitat hidràulica saturada Ks . En aquest context, aquesta recerca no és va desenvolupar entorn d'explicar el problema de