

Anàlisi de la modelització hidrològica com a eina per la predicció d'inundacions i la gestió del territori

Sergio Gil Villalba

Projecte dirigit per: Dr. Albert Folch Sancho^a

a) Departament de Geologia. Universitat Autònoma de Barcelona

Juny 2011

Resum

Les inundacions són actualment les catàstrofes naturals més recurrents i les que generen un major nombre de danys i víctimes arreu del món. La ocupació de les zones inundables a les lleres del riu és la causa principal d'aquests desastres naturals. En aquest article es descriu la realització de models hidrològics com a mecanisme per la predicció d'inundacions i la gestió del territori. S'han estudiat les conques de la Riera de Santa Coloma (Catalunya) i del riu San Francisco (Guatemala) mitjançant els programes HEC-HMS i HEC-RAS, dels quals s'avalua la seva capacitat com eina per a la gestió del territori. S'ha analitzat l'efecte de la urbanització en el risc d'inundació en el cas de la Riera de Santa Coloma en base a la previsió del Pla d'Ordenament Urbanístic Municipal. S'han determinat les zones inundables resultants de episodis de precipitació extrems al Riu San Francisco per als episodis de les tempestes Stan(2005) i Agatha(2010).

Paraules clau: Modelització hidrològica, inundacions, HEC-HMS, HEC-RAS, Panajachel, Riera de Santa Coloma.

Resumen

Las inundaciones son, en la actualidad, las catástrofes naturales más recurrentes i las que generan un mayor número de daños y víctimas en todo el mundo. La ocupación de las zonas inundables en los cauces de los ríos es la causa principal de estos desastres naturales. En este artículo se describe la realización de modelos hidrológicos como mecanismo para la predicción de inundaciones i la gestión del territorio. Se han estudiado las cuencas de la Riera de Santa Coloma (Catalunya) mediante los programas HEC-HMS i HEC-RAS, de los cuales se ha evaluado su capacidad como herramienta para la gestión territorial. Se ha analizado el efecto de la urbanización en el riesgo de inundación en el caso de la Riera de Santa Coloma en base a la previsión del Plan de Ordenación Urbanístico Municipal. Se ha delimitado las zonas inundables resultantes de episodios de precipitación extremos en el Río San Francisco para los episodios de las tormentas Stan (2005) i Agatha (2010).

Palabras clave: Modelización hidrológica, inundaciones, HEC-HMS, HEC-RAS, Panajachel, Riera de Santa Coloma

Abstract

Nowadays, floods are the most frequent natural disasters, causing lots of damage and fatalities all around the world. Building on the flood plane is the main cause that make this disasters happen. In this paper, the performance of hydrologic models at flood prediction and land use management is assessed. Models have been performed for Riera de Santa Coloma (Catalonia) and Rio San Francisco (Guatemala) catchments, through HEC-HMS and HEC-RAS platform, whose capability as land management tool is tested. The effects of urbanization in flood events have been assessed in Riera de Santa Coloma catchment, based on the forecast made on the Municipal Zoning Plans. The flooded zones for extreme precipitation events have been defined on San Francisco river, corresponding to Stan (2005) and Agatha (2010) storms.

Keywords: Hydrologic modelling, floods, HEC-HMS, HEC-RAS, Panajachel, Riera de Santa Coloma.

1. Introducció

Les inundacions són actualment les catàstrofes naturals més recurrents i les que generen un major nombre de danys i víctimes arreu del món. Malgrat estar catalogades com risc natural, no es pot negar que les catàstrofes causades per les inundacions tenen un component humà important. La urbanització i fins i tot l'establiment de nuclis urbans sencers a la zona inundable d'un riu són un preludi de catàstrofe quan el riu ocupi l'espai que en principi li pertany. Un cop s'assumeix que la gestió duta a terme per l'ésser humà té bona part de culpa en les catàstrofes naturals més importants de les darreres dècades cal reflexionar què s'està fent malament per poder canviar la situació actual.

En aquest projecte s'ha dut a terme una simulació hidrològica, mitjançant models informàtics, que ha permès delimitar les zones inundables i observar quins efectes tenen les zones urbanes en els episodis d'inundació.

S'han generat models hidrològics a dues conques diferents:

A la Riera de Santa Coloma (Catalunya):
Per avaluar els efectes que provoca el

increment de la zona urbanitzada en la generació d'escorrentiu superficial durant un episodi d'inundació. S'ha tractat el cas real del municipi de Santa Coloma de Farners, a partir de la previsió de creixement establert al Pla d'Ordenació Urbana Municipal (POUM) aprovat l'any 2010. També s'ha modelitzat l'efecte de l'augment de la superfície urbanitzada en els cabals d'avinguda.

Al Riu San Francisco (Guatemala): Per avaluar els efectes generats per episodis d'inundació vinculats a fenòmens extrems. S'han estudiat les zones inundades corresponents als huracans Stan (2005) i Agatha (2010), i com afecta la planificació territorial o en altres paraules, la exposició, als impactes generats en ambdós episodis.

2. Metodologia

Per l'estudi de les dues conques, s'ha generat un model hidrològic a partir de Models Digitals del Terreny (MDT), delimitant les conques i dividint-les en subconques per incrementar la precisió dels models.

2.1 Riera de Santa Coloma

i. Precipitació

S'ha establert la precipitació per cada subconca per als períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys, a partir dels mapes d'isomàximes proporcionats per l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA). S'ha caracteritzat la conca en funció del relleu, la litologia i els usos del sòl per obtenir valors de precipitació neta, a partir dels quals s'han generat els hidrogrames de precipitació corresponents a cada subconca, en base a les equacions Intensitat-Durada-Freqüència.

ii. Cabal generat

Introduint el model de la conca generat inicialment i els hietogrames calculats per cada subconca, el programa HEC-HMS, realitza una simulació precipitació-escorrentiu proporcionant el cabal generat a cada subconca. Per la propagació de les avingudes s'ha fet servir el mètode de Muskingum, calibrant-ne els paràmetres amb dades de cabals de l'ACA (ACA, 2002).

iii. Estudi de l'efecte de la urbanització segons el POUM

En base al model generat i prèviament calibrat, s'han introduït els canvis en els usos del sòl previstos al terme municipal de Santa Coloma de Farners, recollits al

POUM. S'han efectuat les modificacions a la cartografia actual i s'ha tornat a fer córrer el model.

iv. Estudi de la influència del percentatge d'urbanització al cabal

S'ha considerat la subconca W160 independentment de la resta de la conca. S'ha establert una ocupació del territori i geologia homogènies, corresponents a les característiques predominants de la subconca: sòl forestal i litologia tipus B segons la classificació del Soil Conservation Service (SCS). Partint de la superfície urbanitzada actual (5.65%), s'ha incrementat el percentatge d'urbanització als valors de 15, 25, 50, 75 i 100%.

2.2 Conca del Riu San Francisco

i. Precipitació

S'ha obtingut la precipitació màxima diària per les tempestes Stan i l'Agatha a partir dels registres de l'estació pluviomètrica *El Tablón*, situada a la capçalera de la conca. S'ha caracteritzat la conca en funció del relleu, la litologia i els usos del sòl per obtenir valors de precipitació neta, a partir dels quals s'han generat els hidrogrames de precipitació corresponents a cada subconca, en base a les equacions Intensitat Durada Freqüència.

ii. Cabal generat

Introduint el model de la conca generat inicialment i els hietogrames calculats per cada subconca, el programa HEC-HMS, realitza una simulació precipitació-escorrentiu proporcionant el cabal generat a cada subconca. Per al trànsit de les avingudes, degut a la manca de registres de dades per calibrar el model, s'ha fet servir el mètode del temps de retard (T_{lag}).

iii. Estudi de la zona inundada

A partir dels cabals pic d'avinguda obtinguts per cadascun dels fenòmens, s'ha realitzat mitjançant el programa HEC-RAS, una representació de les zones inundades. A partir d'aquestes zones inundades s'ha pogut determinar fins a quin punt són adients les mesures de contenció actuals i quines errades s'han comès a nivell de gestió urbanística.

3. Resultats i discussió

3.1 Estudi de la Riera de Santa Coloma

i. Calibratge del model

Partint de les dades de cabal en funció del període de retorn publicades per l'ACA, s'han establert tres punts de control (Figura 1). S'ha ajustat el

paràmetre K de la fórmula de Muskingum per calibrar els cabals màxims proporcionats pel models amb els cabals de l'ACA. El resultat ha estat satisfactori, amb una diferència de cabal inferior a l'1%. (Taula 1).

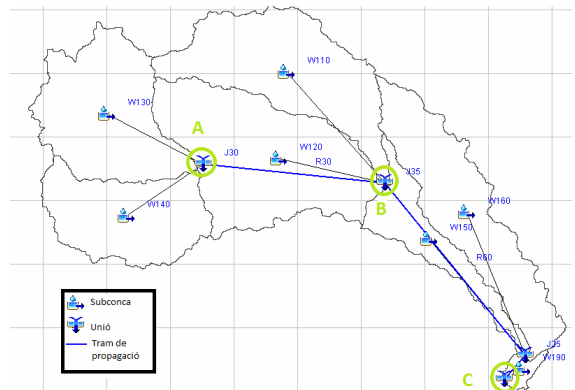


Figura 1. Punts de control del cabal establerts en la conca de la Riera de Santa Coloma (cercles verds).

Taula 1. Cabals obtinguts, amb el model calibrat, respecte les dades calculades per l'ACA.

T_R	K	Q	Q	Error	
		Model	ACA		
50	A	3.1	498.2	499.01	0.16%
	B	0.8	496	520.87	4.77%
	C	1.4	452.8	448.5	-0.96%
100	A	3.8	601.6	601.33	-0.04%
	B	0.7	623.8	641.46	2.75%
	C	1.5	544.2	542.19	-0.37%
500	A	5.8	880.2	877.78	-0.28%
	B	0.85	903	902.43	-0.06%
	C	1.6	757	751.1	-0.79%

ii. Urbanització segons el POUM

El POUM de Santa Coloma de Farners preveu un creixement de la superfície urbanitzada de 200ha. Aquesta superfície s'ha inclòs als paràmetres de model hidrològic. Els resultats mostren que l'efecte aigües avall, respecte el cabal màxim previ a la urbanització és molt petit (Taula 2). Assumint que el calibratge del model s'ha dut a terme amb un error de l'1%, la diferència de cabal generada estaria per sota del marge d'error associat al model.

Taula 2. Cabal màxim de l'avinguda de la Riera de Santa Coloma al punt C, abans i després de la urbanització prevista al POUM.

Temps de Retorn (anys)	Cabal sense urbanització (m3/s)	Cabal amb urbanització (m3/s)
50	452.8	457.2
100	544.2	549.2
500	757	763.3

iii. Efectes de la urbanització al cabal d'avinguda

Per determinar quins efectes suposa el percentatge de superfície urbanitzada d'una conca en el cabal màxim d'avinguda que generarà aquesta s'ha aïllat la subconca W160 i s'ha simulat el cabal generat per percentatges d'urbanització de 5.65, 15, 25, 50, 75 i 100%. Els resultats indiquen que

l'increment de la superfície urbanitzada afecta dos paràmetres. En primer lloc a la precipitació neta, que incrementa de manera pràcticament lineal amb l'increment de la superfície urbanitzada (Figura 2) i en segon lloc al cabal màxim generat que augmenta de manera exponencial a mesura que augmenta la proporció de superfície urbanitzada (Figura 3). Tanmateix, la velocitat que triga en assolir-se el cabal màxim disminueix, reduint el temps de resposta davant d'un episodi d'inundació.

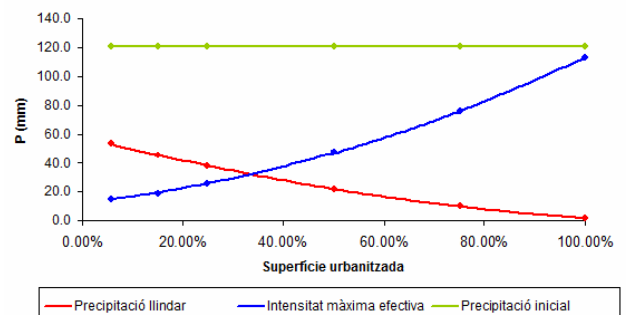


Figura 2. Evolució de la precipitació neta (blau), la Precipitació llindar (vermell) i la precipitació inicial en funció al percentatge d'urbanització de la conca.

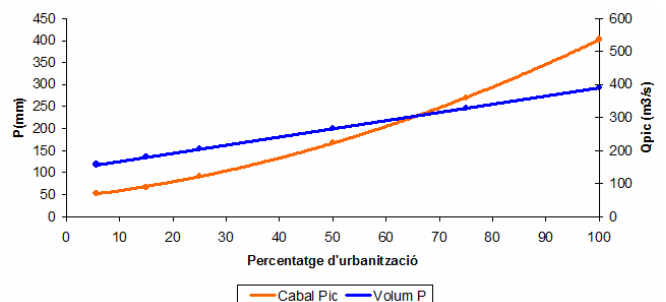


Figura 3. Evolució del cabal pic (taronja) i el volum total de precipitació (blau) respecte al percentatge d'urbanització de la conca.

Els resultats demostren, que la baixa afectació al cabal pic d'avinguda a la Riera de Santa Coloma, per la urbanització prevista al municipi de Santa Coloma de Farners, és deguda la petita proporció de superfície urbanitzada respecte a l'àrea total de la conca. Els efectes de la urbanització serien molt majors si es tractés d'una conca amb unes dimensions inferiors.

3.2 Conca del Riu San Francisco

i. Resultats del model

Degut a la manca de registres de cabals màxims en la zona d'estudi, no s'ha pogut realitzar el calibratge del model, per tant, s'ha fet servir el mètode del temps de retard per estimar el temps de propagació de les avingudes, en funció del pendent de la conca i la longitud de la llera. Els cabals màxims obtinguts han estat del 355m³/s en el cas de l'Stan i de 533m³/s en l'Agatha. (Figura 4).

ii. Càlcul de la zona inundada

S'ha construït un sistema de canals a partir del relleu del riu i s'ha introduït al programa HEC-RAS. S'ha modelitzat a aquest sistema el cabal màxim generat a cada subconca introduint prèviament el coeficient de Manning, indicador de la rugositat de la llera del riu. Davant la dificultat d'assignar correctament un valor aquest paràmetre, s'han realitzat diversos càlculs atorgant en

cada cas valors diferents, compresos entre els valors més comuns per les lleres naturals i representatius de les característiques observades per aquesta conca (0.04-0.07).

També s'han inclòs al model els murs de canalització que van ser construïts l'any 1949 (Figura 5), els quals pràcticament no van ser desbordats en cap dels dos episodis. Finalment, el resultat de la modelització mostra que el cabal introduït s'ajusta força bé a la llera del riu (Figura 6) i, en el tram baix, només desborda els murs en alguns punts concrets fet del qual també se'n té constància.

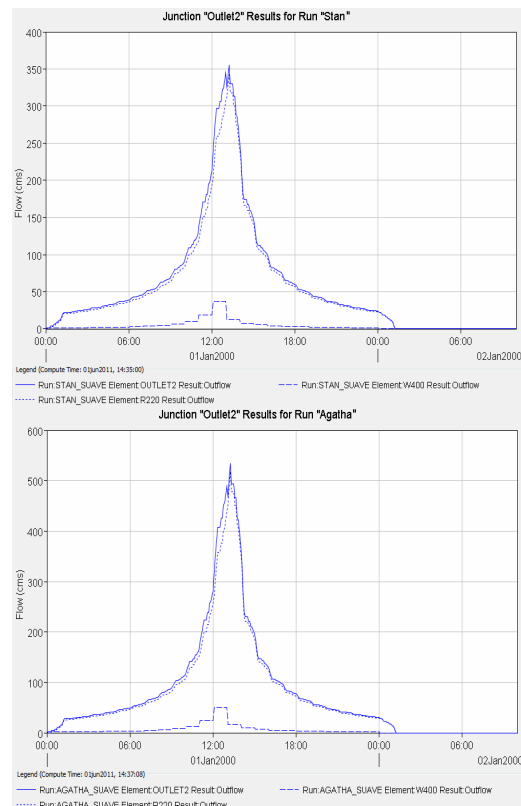


Figura 4. Hidrogrames obtinguts a la desembocadura del riu San Francisco per als episodis del Stan i l'Agatha.

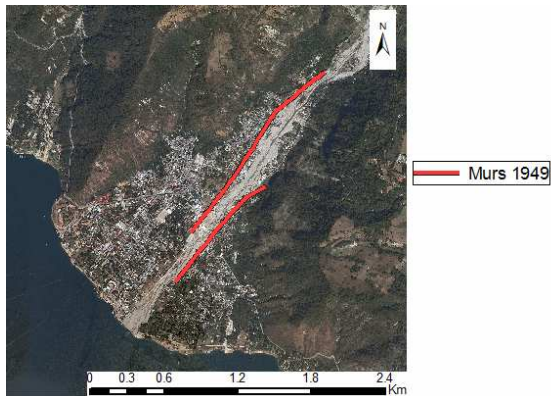


Figura 5. Delimitació dels murs de canalització construïts l'any 1949. (Serra, G. 2011).

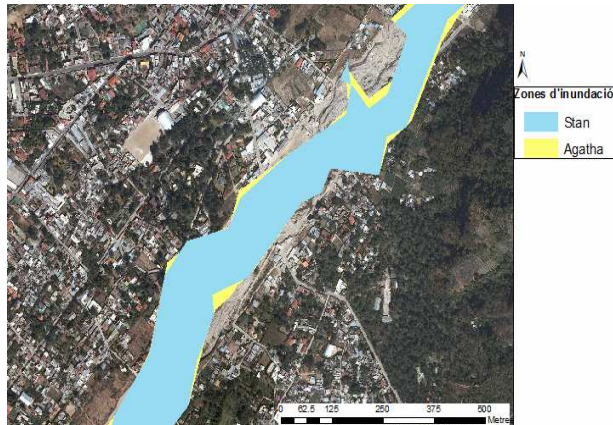


Figura 6. Superfícies d'inundació a prop de la desembocadura corresponents a l'Stan (blau) i a l'Agatha (groc), obtingudes amb un coeficient de Manning de 0.04.

Tot i que la precisió de l'MDT és baixa (20x20), el model generat és suficientment precís per mostrar com a les zones inundades, entre els murs de canalització construïts, s'hi ubiquen diferents habitatges, fet que demostra una manca de planificació

urbanística o manca de control de la ocupació del territori.

iii. Determinació de la velocitat

La velocitat és un factor molt important per conèixer la magnitud d'una avinguda ja que determina la capacitat erosiva de la mateixa. Partint l'equació de Manning i amb el rang de valors del paràmetre n introduïts, s'han establert tres punts de control de la velocitat en la conca, un a la part alta del riu (A), una abans d'arribar al ventall al·luvial (B) i la tercera a la desembocadura (C). S'ha determinat la velocitat en el pic de cabal de l'avinguda per cadascun d'aquests punts de control (Taula 3).

Taula 3. Velocitat del flux (m/s) obtinguda amb l'HEC-RAS, segons el coeficient de Manning introduït

	Stan		Agatha	
Manning n	0.04	0.07	0.04	0.07
A	5.07	4.28	5.41	4.68
B	4.57	3.63	4.99	4.11
C	4.03	2.71	4.66	3.23

Donada la magnitud dels episodis d'inundació i d'acord amb altres estudis de la zona (Serra, G. 2011) els resultats més lògics corresponen a valors del coeficient de Manning propers a 0.04.

4. Discussió i Conclusions

A partir dels diferents models realitzats s'ha pogut constatar que a l'hora de planificar la distribució territorial un dels paràmetres que cal tenir en compte són els riscos naturals associats al territori que es vol ocupar. En aquest sentit, en referència al risc d'inundacions s'ha de tenir en compte:

La delimitació de les zones inundables a les riberes fluvials, per tal d'evitar la construcció a zones inundables i minimitzar l'exposició de les activitats humanes a les avingudes.

En quant als efectes generats aigües avall per la impermeabilització d'una superfície degut a la urbanització, s'ha comprovat que l'increment del percentatge de superfície urbanitzada d'una conca pot generar efectes importants fins i tot si aquesta es construeix lluny de les lleres del riu, ja que incrementa el cabal generat, augmentant el risc d'inundació a la part baixa del riu.

Quan es treballa amb models hidràulics, cal conèixer, en tot moment les suposicions que implica cadascuna de les equacions que conforma el model. Només d'aquesta manera serà possible interpretar correctament els resultats del mateix.

La realització de models hidrològics precisos és una feina feixuga, que requereix la obtenció i administració d'una gran quantitat de dades. Aquestes dades, alhora,

han de presentar la major precisió possible. S'ha observat, per exemple, que el MDT que s'ha fet servir en el model de Panajachel presenta una resolució massa petita, tot i que aquesta és de 20x20metres. La determinació de les zones inundables, generalment a zones planeres, requereix una gran precisió de les dades, i això no sempre és possible d'aconseguir. D'altra banda s'ha de tenir molta cura amb el tractament de les dades estadístiques, especialment amb les dades de precipitació, ja que representen l'entrada d'aigua al sistema hidrològic. Una determinació errònia de les dades de precipitació generarà resultats erronis.

L'increment de la urbanització en una conca determinada genera un doble efecte; per una banda redueix l'evaporació i la infiltració de l'aigua precipitada, incrementant el volum de precipitació efectiva i esorrentiu superficial. Per altra banda, la urbanització en zona inundable suposa una canalització de la llera i una reducció de la secció d'inundació, fet que incrementa la velocitat de l'avinguda, així com el nivell assolit per la làmina d'aigua. Els resultats dels models de la Riera de Santa Coloma indiquen que els efectes generats en l'avinguda per l'increment del percentatge de superfície urbanitzada no només genera un creixement del cabal generat sinó que a més desemboca en un

augment significatiu de la velocitat. Una avinguda amb major velocitat, fins i tot si el cabal no incrementa de manera significativa, té major capacitat erosiva, agreujant els efectes generats a la zona inundada. A més, el fet que es redueixi el temps que triga a arribar-se al cabal màxim redueix les possibilitats d'aplicació de plans d'emergència i/o evacuació en un episodi d'inundació.

Malgrat això, en base als models generats la urbanització prevista al Plà d'Ordenament Urbanístic Municipal del municipi de Santa Coloma de Farners no generarà canvis apreciables en el risc d'inundació aigües avall, ja que el percentatge de superfície que s'urbanitza respecte el total de la conca estudiada és de tan sols el 2%.

El problema de la urbanització, radica en el percentatge de la conca que s'impermeabilitza. Una mateixa superfície urbanitzada provocarà un increment significatiu del cabal d'avinguda a una conca petita mentre que a una conca de majors dimensions, l'impacte sobre el cabal màxim serà menor.

En el cas del Riu San Francisco, hi ha dos factors que multipliquen el risc associat a les avingudes: l'exposició al risc, causada per una deficiente planificació territorial, donada la ubicació de construccions a la

mateixa llera del riu i la major vulnerabilitat per la baixa qualitat de les edificacions associada a la pobresa de la zona.

Com a conclusió final, s'ha d'entendre el sistema fluvial respectant-ne l'espai que ocupa, atorgant a les lleres i zones inundables usos del sòl que no multipliquin els efectes de les avingudes aigües avall. La manca de legislació en aquest sentit o la manca de control del compliment de la mateixa, quan n'hi ha, esdevé un fet determinant en els impactes causats per les inundacions. Es pot concloure que el fet que les inundacions representin una de les catàstrofes naturals que genera més víctimes i més danys és resultat d'una gestió del territori deficiente, que no ha respectat els límits que genera cada riu.

5. Bibliografia

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2001. Delimitació de zones inundables per a la redacció de l'INUNCAT. Conques internes de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2002. Planificació de l'espai fluvial de la conca de la Tordera. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2003. Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

CALLOW J. N., VAN NIEL K. P., BOGGS G. S. 2007. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis?. *Journal of Hydrology*, 332 (1-2), p. 30-39.

CHOW, V. T. ; Maidment, D. R.; Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill International editions

COOK A., MERWADE V. 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), p. 131-142

MOPU. 1999. Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Ministerio de Fomento. Madrid.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD). 2007. Plan de reconstrucción y reducción de

riesgos del Departamento de Sololá. Proyecto GUA 03/005 12788.

PONCE V. M. 1989. *Engineering hydrology. Principles and practices*. New Jersey. Ed. Prentice Hall.

SERRA, G. 2011. Estudio de inundabilidad en la zona norte del lago Atitlán (Guatemala). Treball de recerca. Màster en geologia (riscos geològics).

SURIYA S., MUDGAL B.V. 2011. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology*

TÉMEZ, J. R. 1978. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. MOPU. Madrid.