



Estudi hidrològic de la conca Pla de Sant Jordi T.M. de Palma de Mallorca

**Modelització hidràulica superficial en dues dimensions
i model piezomètric d'aigües subterrànies**

Consultor



Abril 2010



ÍNDEX

DOCUMENT NÚM. 1. MEMÒRIA i ANNEXOS

Memòria

DOCUMENT NÚM. 2. PLÀNOLS



DOCUMENT NÚM. 1. MEMÒRIA I ANNEXOS



ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	3
2. OBJECTE	4
3. ANTECEDENTS	5
3.1. Antecedents administratius	5
3.2. Antecedents tècnics.....	5
4. METODOLOGIA	6
4.1. Metodologia estudi hidrològic	6
4.1.1. Divisió de la zona fluvial en subconques.....	6
4.1.2. Caracterització de les subconques	6
4.1.3. Estudi pluviomètric	7
4.1.4. Simulació hidrològica	7
4.2. Metodologia estudi hidràulic en dues dimensions	8
4.2.1. Justificació del model bidimensional	8
4.2.2. Determinació dels paràmetres de simulació.....	8
5. BASES TOPOGRÀFIQUES.....	9
5.1. Construcció del model digital del terreny (MDT)	9
6. CÀLCUL DELS CABALS D'AVINGUDA TORRENT DE SANT JORDI.....	12
6.1. Determinació de les subconques d'estudi	12
6.2. Característiques de les conques	13
6.3. Paràmetres hidrològics	13
6.4. Paràmetres pluviomètrics	14
6.5. Cabals resultants	15
7. MODEL HIDRÀULIC D'INUNDABILITAT	18
7.1. Paràmetres de la simulació	18
7.2. Resultats de la simulació T=500 anys	19
7.3. Resultats de les simulacions T=50, 25, 10 i 5 anys	20
7.4. Resultats simulació amb hidrograma continu de T=50 anys	20
7.5. Càlcul de volums d'aigua d'inundació	21



8. MODEL PIEZOMÈTRIC D'INUNDABILITAT	22
8.1. Dades inicials	22
8.2. Escenaris estudiats	23
8.3. Model piezomètric.....	24
8.4. Zones inundades i volums d'aigua embassats	24
9. CONCLUSIONS.....	25

1. INTRODUCCIÓ

El Pla de Sant Jordi es troba 3km al sud-est de la ciutat de Palma de Mallorca i envolta l'actual aeroport comercial de l'illa, Son Sant Joan. Es tracta d'una zona costanera, sense relleus importants que antigament constituïa una plana d'aiguamolls. Durant el segle XVIII fou dessecada i parcel·lada per a l'explotació agrícola i ramadera.

Aquesta zona ha patit en els darrers vint anys un progressiu augment dels nivells piezomètrics com a conseqüència de la combinació de diversos factors socioeconòmics i físics. El creixement urbanístic, la construcció d'infraestructures bàsiques i el canvi de tipologia d'explotació agrària han provocat una important disminució de la seva capacitat de drenatge.

El torrent de Sant Jordi constitueix el curs fluvial principal que recull les aigües superficials del Pla i les condueix cap al mar on desguassa prop de la platja de s'Arenal. Aquest torrent rep les aigües des Siquió que hi conflueix pel marge dret. Aquest afluent amb cabals discontinus i efímers recull gran part del drenatge de la zona aeroportuària de Son Sant Joan. El conjunt fluvial del torrent de Sant Jordi està catalogat dins del Pla Hidrològic de les Balears com a zona potencialment vulnerable per risc d'inundació.

2. OBJECTE

L'objectiu d'aquest estudi és doble:

- En primer lloc el càlcul dels cabals d'avinguda del torrent de Sant Jordi i del torrent des Siquió per als períodes de retorn que es considerin significatius i que seran degudament justificats en aquesta memòria. Amb aquests cabals es generarà un model hidràulic bidimensional d'avinguda superficial a la conca del Pla de Sant Jordi per a cada període de retorn a estudiar. Els resultats obtinguts ajudaran a:
 - o Per una banda estimar la capacitat màxima de transport d'avingudes a través dels torrents de Sant Jordi i des Siquió i alhora delimitar les àrees amb majors problemes d'inundabilitat (per possible desbordament de lleres) i dificultats de drenatge. Sobre aquestes àrees caldrà concentrar les actuacions.
 - o Per altra banda calcular els volums retinguts en el terreny que no són evacuables per vies naturals i que quedaran retinguts en forma d'aigües estancades. L'estimació d'aquests volums d'aigua ha de permetre dimensionar correctament les actuacions de drenatge a proposar.
- En segon lloc l'estimació dels nivells piezomètrics de la zona i del model de flux subterrani a partir de les dades de control disponibles. Aquest segon objectiu permetrà conèixer la influència dels nivells freàtics sobre la problemàtica existent i quantificar el volum d'aigua d'inundació d'origen subterrani.

3. ANTECEDENTS

3.1. Antecedents administratius

L'Agència Balear de l'Aigua i de la Qualitat Ambiental convoca en concurs de procediment obert el contracte per a la realització del servei per a la redacció del projecte: *“Estudi hidrològic de la conca del Pla de Sant Jordi, T.M. de Palma”*, del qual resulta adjudicatària l'empresa Hidrologia i Qualitat de l'Aigua, SL el 15 de maig de 2009.

3.2. Antecedents tècnics

S'han consultat els estudis previs següents:

- “Estudi de caracterització del règim extrem de precipitacions a les illes Balears” encarregat pel Govern Balear. Any 1992.
- “Modelización del acuífero del Pla de Palma de Mallorca” encarregat pel Govern Balear a l'empresa Yacu. Any 1999.
- “Estudio hidrológico de cuencas (caudales de cálculo)” encarregat pel Govern Balear a l'empresa Yacu. Anys 2000-2001.
- “Estudi hidrològic del Pla de Palma, torrent Gros i riera de na Bàrbara (TM de Palma de Mallorca)” encarregat per l'Agència Balear de l'Aigua i la Qualitat Ambiental a la UTE Hqa-Estiu. Any 2007.

La informació relativa a cabals d'avinguda ha estat extreta de la combinació dels estudis encarregats pel Govern Balear als anys 1992 i 2001, treballs que defineixen les precipitacions màximes i la metodologia de càlcul emprada per obtenir, a partir de les dades de pluja, els cabals al torrent de Sant Jordi per a diferents períodes de retorn.

El darrer estudi encarregat per ABAQUA a la UTE Hqa-Estiu aplica la metodologia descrita en l'estudi hidrològic de conques de risc dels anys 2000-2001 al càlcul d'avinguda en els torrents Gros i de na Bàrbara, de la mateixa manera com s'ha aplicat al torrent de Sant Jordi en aquest estudi.

4. METODOLOGIA

4.1. Metodologia estudi hidrològic

A continuació s'exposa de forma resumida la metodologia a emprar en l'estudi hidrològic de conques, que ha de donar com a resultat els cabals d'avinguda a modelitzar per als diferents períodes de retorn estudiats.

4.1.1. Divisió de la zona fluvial en subconques

La zona d'estudi comprèn les conques del torrent de Sant Jordi i del torrent des Siquió amb una superfície de conca de 147,7Km².

Amb l'objectiu d'obtenir regions de característiques físiques més homogènies i amb unes superfícies menors, s'ha procedit a la divisió en 4 subconques que compleixin els requisits mínims per a la correcta aplicació dels mètodes de càlcul pluviomètric i de cabals.

4.1.2. Caracterització de les subconques

Es consideren com a paràmetres característics de les subconques aquells que defineixen la resposta de cada zona davant d'un episodi de precipitacions de gran intensitat.

Els paràmetres considerats es poden agrupar en dues categories:

- Paràmetres morfològics, tals com la superfície, el pendent i la longitud de la llera que ens permeten calcular el temps de concentració de cada conca.
- Paràmetres hidrològics, tals com la geologia, les condicions d'humitat inicials i els usos del sòl que ens permeten, juntament amb alguns paràmetres morfològics, calcular el número de corba. Aquest paràmetre ens informa de la capacitat d'infiltració de la conca.

Finalment i a partir de la combinació d'ambdós grups de paràmetres s'aconsegueix definir, mitjançant valors matemàtics, les característiques de cada subconca.

4.1.3. Estudi pluviomètric

Les característiques pluviomètriques de les conques d'estudi s'han extret dels treballs que el Govern Balear finalitzà l'any 1992 i publicà sota el títol "Estudi de caracterització del règim extrem de precipitacions a les illes Balears". Aquest treball ha estat revisat i actualitzat durant l'any 2003 amb la incorporació de noves dades i millora de les tècniques estadístiques.

El hietograma de disseny es va calcular seguint el mètode de Huff que estudia les tempestes històriques produïdes i enregistrades en els diferents pluviògrafs de la zona, classificant-los en funció del moment en el qual es produeix la pluja màxima i posteriorment generant les diferents famílies de corbes en funció de la probabilitat d'excedència de la pluja acumulada, del percentatge de precipitació i de la durada del succés.

4.1.4. Simulació hidrològica

S'ha emprat un model de simulació per al càlcul de cabals d'avinguda com a mètode més recomanat de forma general. En concret l'ús d'aquesta mena de programes informàtics té els avantatges següents:

- Permet l'aprofitament de totes les dades disponibles, tant les dades associades amb el règim meteorològic com els valors característics de cada subconca.
- Fa ús d'eines estadístiques en el cas concret de les dades pluviomètriques que, d'altra banda, no poden ser estudiades per mètodes deterministes.
- Permet la modificació de dades (per exemple per a càlculs de diferents escenaris de futur) amb molta facilitat i rapidesa.
- Proporciona com a resultats l'hidrograma complet d'avinguda i no solament un valor de cabal màxim. Això és fonamental per tenir en compte els efectes de la laminació de cabals per al disseny d'obres d'infraestructura.

El model emprat en aquest estudi es basa en l'adopció del programa de càlcul HEC-HMS, desenvolupat i actualitzat pel Centre d'Enginyeria Hidrològica de l'Exèrcit dels Estats Units. Amb total seguretat es pot afirmar que aquest model és el més emprat arreu del món i ofereix els resultats més contrastats.

La construcció del model té en compte el conjunt de dades definits en els apartats anteriors.

En estudis similars fets anteriorment a les Illes Balears s'ha usat com a mètode de comprovació i validació de resultats la comparació de les sortides de cabals obtinguts amb el HEC-HMS amb estudis estadístics d'aforaments en diverses estacions de mesura.

Els resultats extrets d'aquesta comparativa animen a emprar aquest mètode de càlcul per a l'obtenció dels cabals d'avinguda de torrents a les Illes Balears.

4.2. Metodologia estudi hidràulic en dues dimensions

4.2.1. Justificació del model bidimensional

L'orografia de la zona d'estudi és pràcticament plana, sense grans desnivells, amb cotes altimètriques que oscil·len entre 0 i 2 metres majoritàriament i sempre inferiors als 10 metres per sobre del nivell del mar. Aquesta mena de terreny sense variacions fortes en les elevacions aconsella l'ús d'eines de càlcul que tinguin en compte la component bidimensional en el moviment del flux.

Els efectes produïts per aquesta tipologia de flux (movent-se alhora en sentit longitudinal i transversal) poden ser de molta rellevància sobretot per a l'estudi de fenòmens com la laminació de cabals, la generació de bosses d'aigua estancada (amb velocitat nul·la) en zones deprimides i l'aparició de fluxos en forma de braços divergents i independents els uns dels altres inundant zones fora del canal principal.

És evident que tota aquesta fenomenologia no pot ser calculada ni interpretada a partir dels models unidimensionals clàssics.

4.2.2. Determinació dels paràmetres de simulació

Els paràmetres del model hidràulic en dues dimensions a definir són els següents:

- Calat mínim o calat a partir del qual el fluid pot entrar en moviment dins el model de cel·les calculat a partir de la topografia i el model digital del terreny. Habitualment i sempre que no es digui el contrari es pren aquest valor igual a 0,01 metres.
- Condicions inicials o condicions essencials en el moment d'inici de la simulació. Per exemple, la situació de la llera (seca, amb un cabal mínim, etc), el calat mínim existent en una zona determinada del terreny (per exemple en simulacions de zones de llacunes), etc.
- Condicions de contorn aigua amunt i aigua avall, per tenir en compte totes les possibilitats de règims hidràulics existents durant la simulació del model. Es tracta de condicions sobre calats o cabals.

5. BASES TOPOGRÀFIQUES

La cartografia disponible fins a la data a la zona d'estudi és la següent:

- Cartografia a escala 1:5.000 de l'illa de Mallorca. Fulls 698 i 699 corresponents al Pla de Sant Jordi. Cartografia vectorial amb data d'edició 1995-1996, actualitzada amb un vol de l'any 2006.
- Cartografia a escala 1:1.000 i equidistància entre corbes d'entre 0,5 i 1 metre propietat d'AENA. Comprèn la zona aeroportuària de son Sant Joan i entorns propers. Cartografia vectorial amb data d'edició 2005.
- Cartografia a escala 1:1.000 i equidistància entre corbes de 0,5 metres de l'Ajuntament de Palma de Mallorca. Cartografia vectorial realitzada per l'IMI dins del terme municipal de la ciutat de Palma. Data d'edició 2006.
- Model LIDAR de l'illa de Mallorca, amb valors per cada cel·la quadrangular d'1 metre de costat. Dóna cobertura a les conques més importants de les illes. Inclou la conca del torrent de Sant Jordi (vall baixa). Data d'edició 2005.

Per a la construcció del model digital del terreny, base per a la modelització hidràulica bidimensional, s'han emprat les cartografies de l'Ajuntament de Palma de Mallorca (IMI) i el model LIDAR del torrent de Sant Jordi.

La resta de cobertures cartogràfiques s'han tingut en compte com a suport cartogràfic per a la representació de plànols i esquemes i també com a cobertures de contrast de la bondat del model digital resultant.

5.1. Construcció del model digital del terreny (MDT)

Les bases topogràfiques triades a l'hora de generar el model digital del terreny han estat per una banda el model LIDAR de la conca del torrent de Sant Jordi amb un ample de cel·la d'1 metre i altimetria de precisió centimètrica. I per una altra banda la cartografia vectorial 1:1.000 i sensibilitat 0,5 metres de l'Ajuntament de Palma que ha completat el model anterior en aquelles zones sense cobertura.

Finalment, el model resultant ha estat contrastat amb la topografia facilitada per AENA en aquelles àrees on hi ha solapaments areals. També s'han comprovat certs detalls d'infraestructures amb la cobertura vectorial 1:5.000 de l'illa de Mallorca.

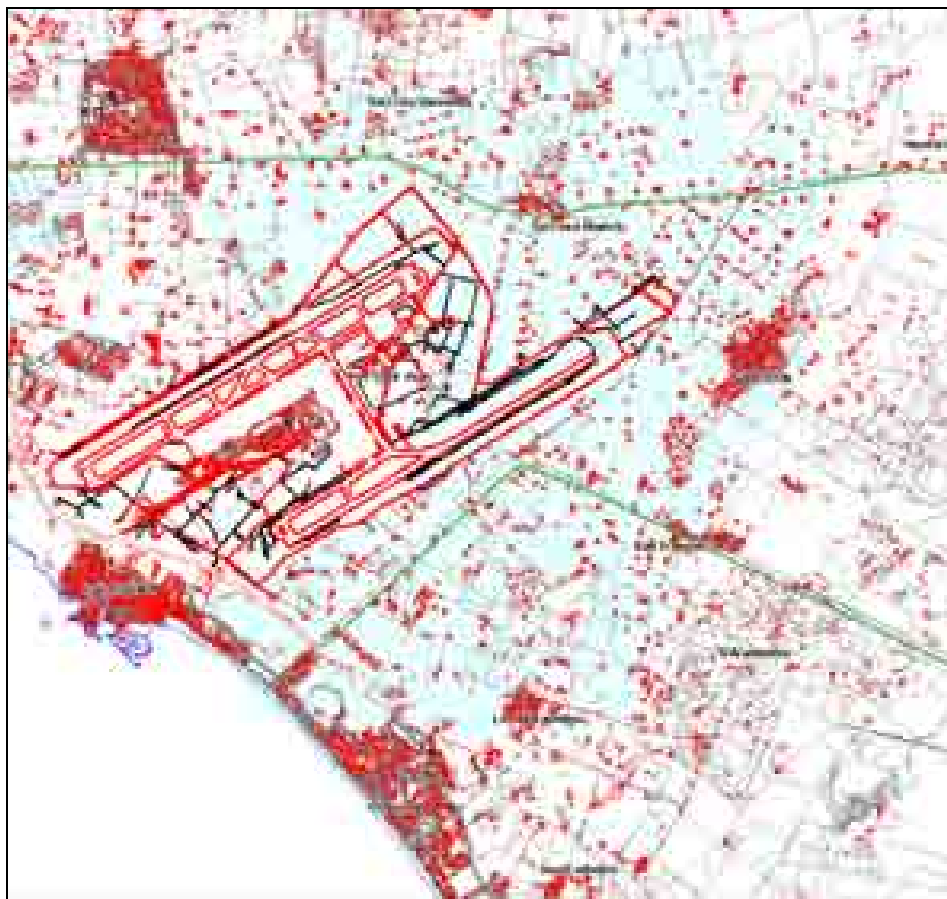


Figura 1. Planta general de la zona d'estudi, en blau zona amb topografia LIDAR.

En la figura anterior s'aprecia l'abast del model LIDAR sobre la conca del torrent de Sant Jordi. Com es pot apreciar, cobreix àmpliament la zona d'estudi. Deixa sense cobertura la zona aeroportuària de son Sant Joan.

L'abast de la topografia municipal se circumscriu al terme de Palma de Mallorca, per tant, també cobreix tota la zona d'interès per al nostre estudi.

La figura següent mostra el resultat final del model digital del terreny que s'ha emprat per al càlcul hidràulic següent.

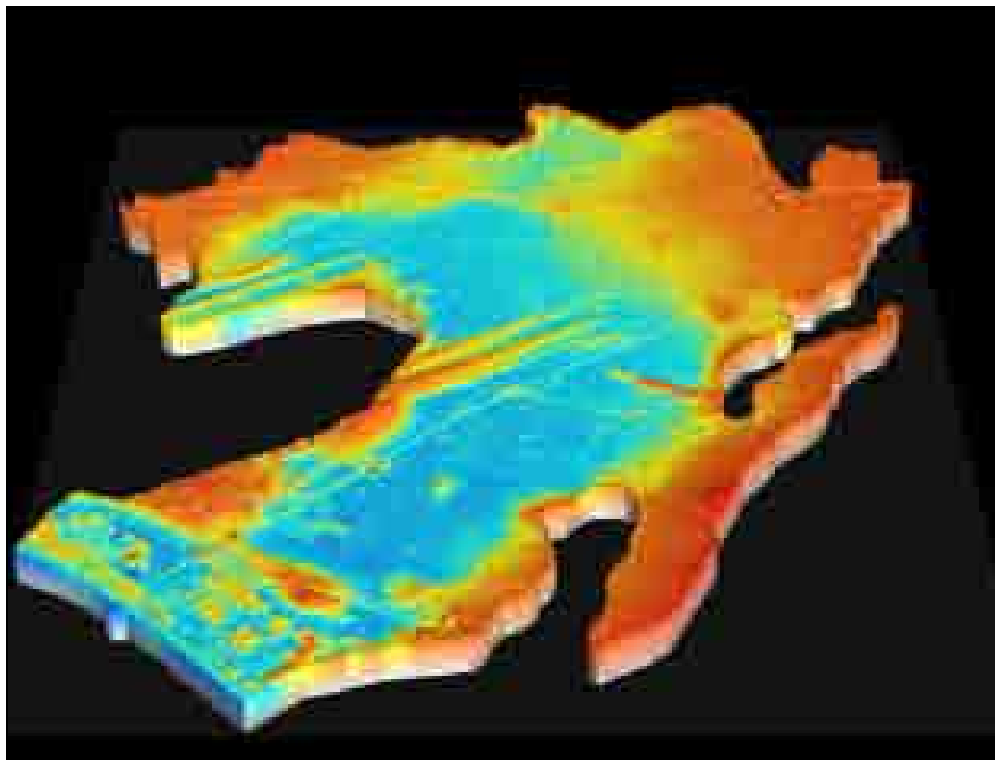


Figura 2. Planta general de la zona d'estudi renderitzada en 3D.

A la figura superior s'aprecia el model digital del terreny en 3 dimensions tal i com s'ha emprat en el model hidràulic en dues dimensions.

En primer terme s'aprecien les dues zones de reg del Pla de Sant Jordi, sector nord i sector sud (zones baixes representades amb colors blavosos). També són visibles les traces de les dues pistes d'aterratge de l'Aeroport de Son Sant Joan (representats en colors grocs i ataronjats). A la zona oest de la figura s'aprecia el traçat de l'autopista de Palma a s'Arenal i la zona urbanitzada en primera línia de costa.

L'escala vertical de representació en tres dimensions ha estat augmentada 5 vegades per millorar la visualització del relleu, atès que es tracta d'una zona amb poca variació altimètrica.

6. CÀLCUL DELS CABALS D'AVINGUDA TORRENT DE SANT JORDI

6.1. Determinació de les subconques d'estudi

S'ha delimitat la conca global del torrent de Sant Jordi en quatre subconques en funció de la topografia i el tram de torrents afluents existent. El resultat ha estat la definició de les conques següents:

- Torrent d'Algaida
- Torrent des Pla
- Torrent de son Gual
- Torrent de Sant Jordi (inclou el torrent des Siquió)

A la figura següent es representen en planta les subconques esmentades juntament amb els cascos urbans més importants i que donen nom a les subconques.



Figura 3. Planta general de les conques d'estudi (en tram vermell). En línia blava discontinua es mostra el traçat dels principals cursos fluvials.

6.2. Característiques de les conques

Àrea de cada conca, longitud màxima de la llera, cotes màxima i mínima de cada conca, pendent mitjà, temps de concentració amb la fórmula de Témez (t_c), temps de retard (t_r) i coeficient d'emmagatzematge de Clark (R).

Subconca (torrents)	Àrea (Km ²)	Longitud (Km)	Cota Màxima (m)	Cota Mínima (m)	Pendent (m/m)	t_c (h)	t_r (h)	R
T. d'Algaida	46,05	17,89	220	18	0,0113	6,30	3,78	16,83
T. des Pla	9,94	5,98	148	7	0,0236	2,38	1,43	3,89
T. de Son Gual	26,66	1,90	265	7	0,0237	3,75	2,25	7,08
T. de Sant Jordi T. des Siquió	65,05	11,95	130	0	0,0109	4,66	2,80	11,45
TOTALS	147,7	37,72	265	0	0,0174	-	-	-

6.3. Paràmetres hidrològics

Númers de corba per subconca, trànsit dels hidrogrames amb el mètode de Muskingum (paràmetres K i X).

Subconca (torrents)	NC	Trasllat Muskingum	
		K	X
T. d'Algaida	67,52	0,34	0,25
T. des Pla	68,20	-	-
T. de Son Gual	66,50	-	-
T. de Sant Jordi T. des Siquió	75,50	-	-

6.4. Paràmetres pluviomètrics

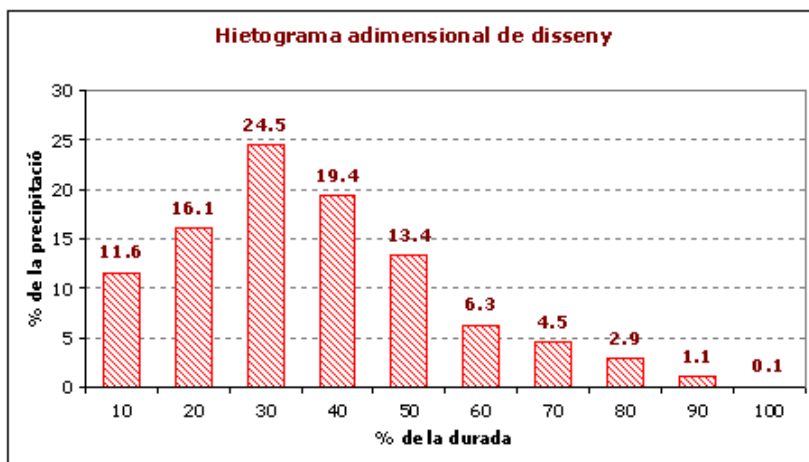
Per als càlculs de la pluja màxima i per tenir en compte la distribució espacial de les tempestes es pren el coeficient de simultaneïtat proposat per Témez amb la fórmula següent:

$$FRA = 1 - (\log_{10}(S) / 15)$$

On S és la superfície total de la conca.

Pel que respecta a les hipòtesis d'humectació inicial, a les Illes Balears les tempestes observades habitualment són de curta durada, fet que permet la recuperació de les condicions d'infiltració entre episodis tempestuosos. Per aquest motiu es descarta la hipòtesi de sòl saturat (AMC-III) i s'opta per l'opció intermèdia d'humitats mitjanes (AMC-II) en el moment d'inici de la tempesta.

Subconca (torrents)	Pluja diària màxima (mm) per als períodes de retorn indicats (anys)									
	2,33	5	10	25	50	100	250	500	1000	5000
T. d'Algaida	57,6	72,7	85,1	101,0	112,9	125,0	141,4	154,1	167,3	199,6
T. des Pla	52,7	66,6	78,0	92,4	103,1	113,9	128,3	139,4	150,8	178,2
T. de Son Gual	57,0	72,7	85,9	102,8	115,7	128,8	146,7	160,7	175,2	211,1
T. de Sant Jordi T. des Siquió	47,6	59,8	69,7	82,1	91,3	100,5	112,9	122,4	132,0	155,3
TOTALS (mm)	214,9	271,8	318,7	378,3	423,0	468,2	529,3	576,6	625,3	744,2



6.5. Cabals resultants

Finalment, a partir de les dades de pluja i de les característiques físiques i hidrològiques de les conques, obtenim els cabals màxims resultants per a cada període de retorn analitzat a les conques dels torrent de Sant Jordi i es Siquió (afluent pel marge dret).

Conca	Cabal màxim (m ³ /s) per als períodes de retorn indicats (anys)									
	2,33	5	10	25	50	100	250	500	1000	5000
Torrent de Sant Jordi	5.8	13.6	21.9	34.5	45.1	56.9	73.9	87.9	102.9	142.1
Torrent des Siquió	1.2	2.6	4.4	6.7	9.0	11.3	14.5	17.31	20.4	27.9

Els períodes de retorn emprats per al càlcul del model hidràulic han estat de 5, 10, 25, 50 i 500 anys. Els períodes baixos (inferiors a 100 anys) són els que ens ajudaran a dimensionar les obres de drenatge necessàries per a remeiar els problemes de les avingudes ordinàries. El període de retorn de 500 anys defineix la zona inundable, segons la llei d'urbanisme, i s'empra de forma general per al dimensionament de la major part d'obres de fàbrica per a pas de fluxos d'aigua. Per aquest motiu s'ha cregut oportú disposar dels resultats de la inundació per aquest cabal.

Prenent cadascun d'aquests períodes de retorn i amb les dades de cabal màxim i l'hietograma de disseny obtenim els hidrogrames de càlcul de les figures següents (figures 4 i 5).

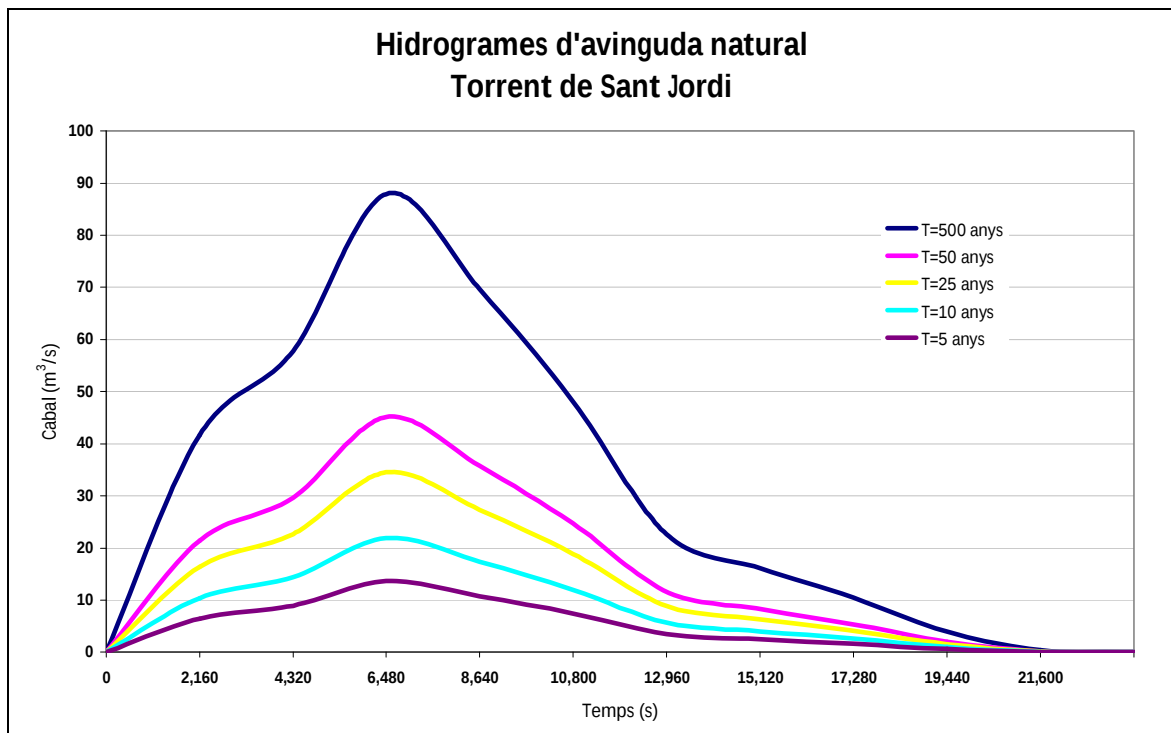


Figura 4. Hidrogrames d'avinguda natural per diversos períodes de retorn al Torrent de Sant Jordi.

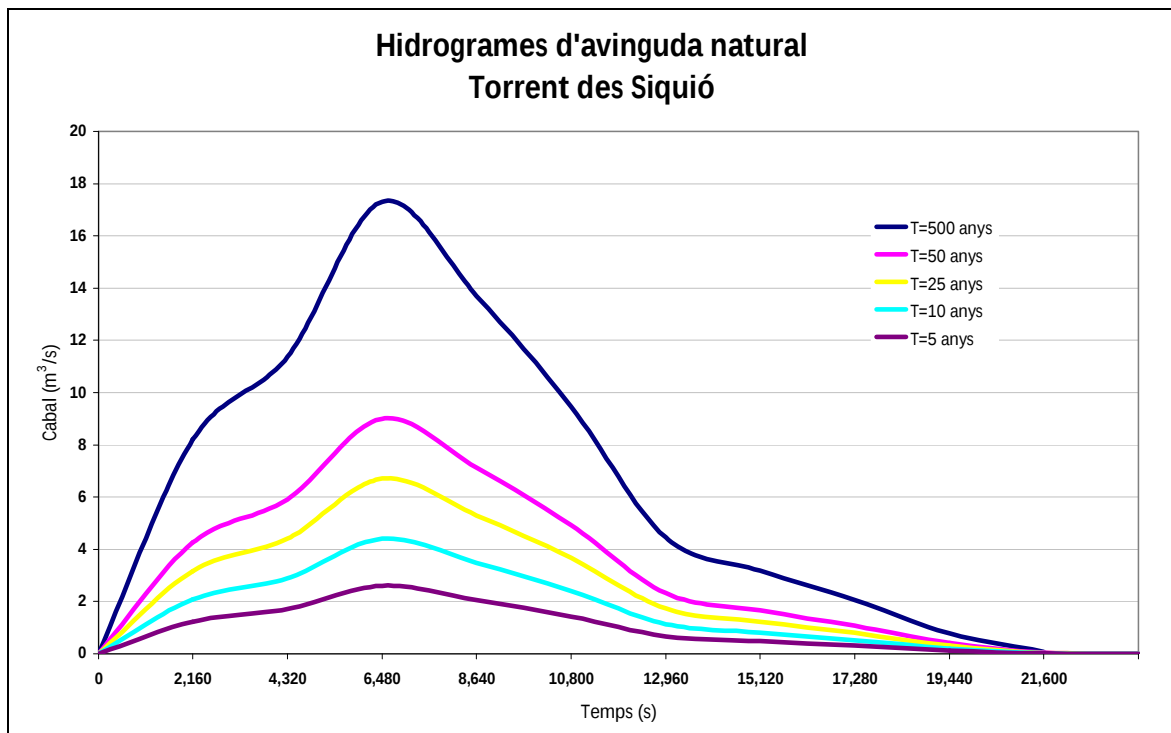


Figura 5. Hidrogrames d'avinguda natural per diversos períodes de retorn al Torrent des Siquió.

Aquests hidrogrames anteriors corresponen a la resposta de la conca a una tempesta de disseny de 6 hores de durada. En previsió que aquesta situació pugui resultar insuficient per assolir el desguàs al mar dels torrents, s'ha implementat la simulació d'un nou escenari amb cabals constants, prenent com a referència el màxim valor de l'hidrograma de 50 anys de període de retorn. Es tracta d'una situació hidrològica no real que es té en compte amb l'objectiu de calcular el volum de pluja necessari per assolir el desguàs dels torrents al mar.

Aquest hidrograma queda representat en la figura següent.

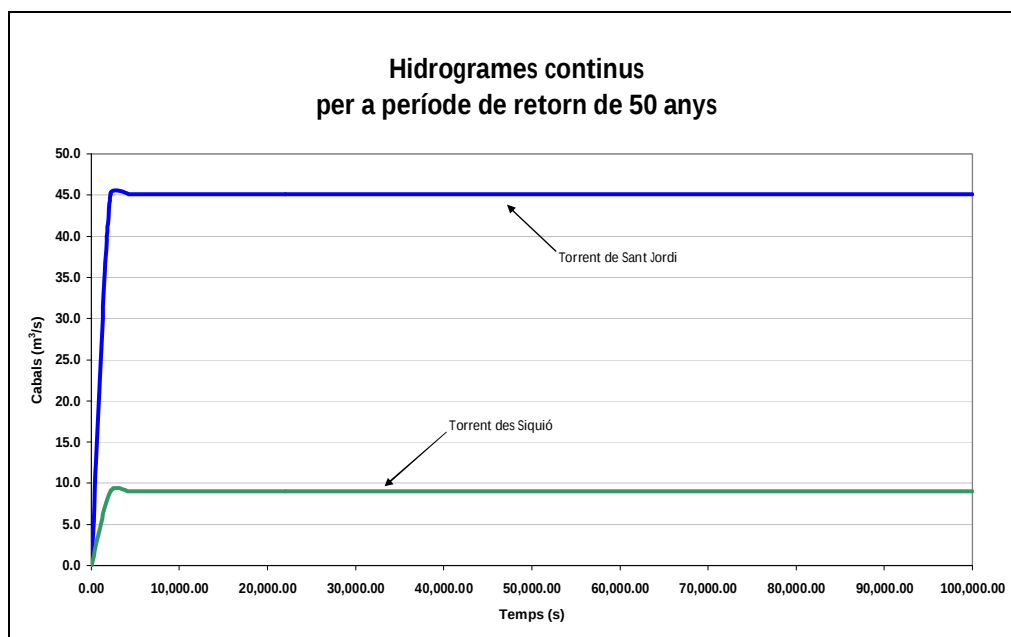


Figura 6. Hidrogrames continus ficticis dels torrents de Sant Jordi i es Siquió per als màxims cabals de 50 anys de període de retorn.

7. MODEL HIDRÀULIC D'INUNDABILITAT

7.1. Paràmetres de la simulació

El model hidràulic GUAD en dues dimensions parteix d'un conjunt de paràmetres que defineixen l'estat inicial i les premisses per executar el càlcul dels calats i velocitats en cada cel·la del model digital del terreny.

En primer lloc la topografia és triangularitzada en funció de dos paràmetres que es defineixen a continuació:

- Error màxim permès en els valors altimètrics. S'ha pres l'error màxim igual a 0,2m en coherència amb la precisió de les dades topogràfiques.
- Longitud màxima de costat dels triangles interpolats. Es pren el valor de 50m, ja que es tracta d'una zona molt plana.

A continuació, i un cop realitzada la triangularització del model digital del terreny, s'entra a definir les condicions de contorn del model:

- Condicions de contorn aigua amunt: s'usen els hidrogrames d'avinguda natural corresponents als torrents de Sant Jordi i des Siquió en els punts més alts d'aquests dos cursos fluvials.
- Condició de contorn aigua avall: s'usa el calat crític en la zona de desguàs al mar del torrent de Sant Jordi, prop de ses Fontanelles.

Seguidament es defineixen les condicions inicials del model amb l'aplicació de l'estat sec del terreny en el primer instant de càlcul.

El model de rugositat emprat ha estat una cobertura uniforme amb número de Manning igual a 0,06 que deixa els resultats del costat de la rugositat, atès que es tracta d'una zona amb cultius intensius de regadius i sense excessiva cobertura arbòria.

També s'introdueixen el temps de càlcul (27 hores) i el pas de temps per l'extracció de resultats (cada hora).

Finalment el programa GUAD-2D estima els paràmetres necessaris per a l'aplicació òptima del mètode numèric de càlcul: el número màxim d'iteracions, les toleràncies de càlcul i el calat mínim necessari per l'existència de transferència de flux entre cel·les.

7.2. Resultats de la simulació T=500 anys

Després d'un temps de simulació de més de 72 hores, el programa GUAD-2D finalitza el càlcul dels calats i velocitats en cada cel·la per al cas d'avinguda de 500 anys de període de retorn.

Els cabals d'avinguda introduïts en els torrents de Sant Jordi i des Siquió superen àmpliament la capacitat de les lleres i endegaments existents en l'estat actual inundant els camps adjacents i produint braços de fluxos independents entre si.

L'antiga carretera de Palma a Lluçmajor produeix una barrera al flux d'aigua desbordat de la llera del torrent de Sant Jordi que viatja de nord a sud per la zona agrícola. Aquesta infraestructura actua d'obstacle i atenua la virulència de la inundació al sector de reg sud tot reduint la velocitat del flux i els calats d'inundació produïts.

Tant la zona aeroportuària de Son Sant Joan com les instal·lacions de l'EDAR Palma-I queden fora de la zona inundable. Ambdues infraestructures s'assenten al damunt de plataformes elevades entre 1 i 4 metres per sobre del nivell normal del Pla de Sant Jordi. Aquests terraplens d'origen antròpic foren construïts expressament amb aquesta finalitat atès que ambdós serveis es consideren d'especial singularitat i requereixen una elevada protecció enfront de fenòmens naturals. A més a més, la zona de pistes de l'Aeroport de Palma compta amb un extens sistema de drens superficials i subterranis que aconsegueix desguassar els pluvials en situació de tempestes de forta intensitat.

De la mateixa manera el nou polígon industrial de son Oms no es veu afectat per la inundació, atès que es troba emplaçat sobre d'una plataforma elevada que el protegeix dels efectes produïts per l'avinguda de 500 anys de període de retorn. La ubicació del polígon entre el torrent de Sant Jordi i les pistes de l'Aeroport de Palma motiva que aquesta infraestructura generi una barrera a l'expansió del flux pel marge dret del torrent cap a l'aigua avall.

7.3. Resultats de les simulacions T=50, 25, 10 i 5 anys

Les inundacions de 5, 10 i 25 anys de període de retorn no assoleixen el desguàs a mar de les rieres, atès que el cabal queda laminat per desbordament a l'àrea nord de reg i la inundació no aconsegueix un gradient suficient per arribar a la zona de desembocadura. Les zones del torrent de Sant Jordi en contrapendent tampoc no faciliten el trànsit de l'avinguda per la llera i generen trams amb aigües estancades.

Les afeccions per inundació en aquests dos períodes de retorn es concentren a la zona nord de l'àrea de reg, per sobre de la carretera de Palma a Lluçmajor i a la zona nord de les pistes de l'Aeroport de Palma, prop del nucli de Casablanca.

La inundació per a T=50 anys de període de retorn aconsegueix desguassar part del cabal d'avinguda al mar a través de la llera del torrent de Sant Jordi. Malgrat tot, el torrent es veu sobrepassat de capacitat i desborda a les àrees nord i sud de la zona de reg, generant grans bosses d'aigües retingudes que no poden ser drenades de forma natural per manca de gradient hidràulic i existència de zones en contrapendent.

7.4. Resultats simulació amb hidrograma continu de T=50 anys

La zona inundada amb l'hidrograma fictici estacionari amb un cabal màxim de 50 anys de període de retorn aconsegueix desguassar al mar i inundar àmpliament la zona sud del reg per desbordament del torrent de Sant Jordi en aquest tram.

El volum d'aigua necessari per assolir el desguàs al mar succeeix a l'hora 10 des de l'inici de l'avinguda. Això suposa un volum total de $1,77\text{Hm}^3$. Per tant, segons aquest càlcul, caldrà l'acumulació d'una quantitat d'aigua superior a $1,77\text{Hm}^3$ (en un o més d'un episodis de tempesta) per aconseguir drenatge eficient al torrent de Sant Jordi fins al mar.

7.5. Càlcul de volums d'aigua d'inundació

Els volums d'aigua retinguts en cadascuna de les avingudes han estat calculats a partir de les envelopants de calats d'inundació a la zona d'estudi. Aquesta metodologia de càlcul és clarament conservadora i majora els resultats en un 35% aproximadament, atès que l'envelopant dels calats no representa cap situació d'inundació real, sinó la maximització dels valors de calats en cada cel·la tenint en compte tots els instants de càlcul de la inundació.

La taula següent exposa els volums màxims d'aigua assolits per les avingudes naturals dels períodes de retorn esmentats.

Període de retorn (anys)	Cabal Màxim Sant Jordi i es Siquió (m ³ /s)	Volum total inundació en sec (m ³)	Volum total inundació amb calat previ 10cm en zones baixes (m ³)
5	16,2	239.820	408.923
10	26,3	360.276	529.379
25	41,2	538.980	708.083
50*	54,1	732.840	901.943
500	105,2	1.490.600	1.659.703

* S'escullen els resultats de la simulació hidràulica amb hidrogràfica de 6 hores.

Taula 1. Volums màxims d'inundació en situació inicial seca o bé amb el model d'avinguda suposant una inundació prèvia de les zones més baixes de 10cm de calat.

Cal tenir en compte que aquests volums d'aigua corresponen a les inundacions produïdes per una tempesta de 6 hores de durada (considerada òptima per al disseny de passos d'infraestructures), però que podria no ser la millor opció per al càlcul dels volums embassats sense possible drenatge natural. Per tant, cal ser prudents a l'hora d'interpretar les dades.

8. MODEL PIEZOMÈTRIC D'INUNDABILITAT

A partir de les dades piezomètriques facilitades per l'Agència Balear de l'Aigua i la Qualitat Ambiental s'ha construït un model de nivells piezomètrics de l'aquífer del Pla de Sant Jordi.

En aquest apartat es descriurà la xarxa piezomètrica de control emprada per a la construcció del model així com la qualitat de les mesures preses i el període d'anys i quantitat de dades existents.

A partir de l'anàlisi detallat de les dades existents es plantejaran un seguit de tres escenaris possibles (any secs, any humits i situació mitjana) que es modelitzaran i representaran mitjançant mapes d'isopiezes.

Finalment s'exposaran els resultats obtinguts del creuament de les dades dels diferents escenaris estudiats amb la cartografia actual i es delimitaran i quantificaran els volums d'aigua aflorants en superfície.

8.1. Dades inicials

Les dades de partida consisteixen en una xarxa de piezòmetres propietat del Govern Balear i gestionats pel Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídrics.

S'ha escollit la xarxa de piezòmetres del Pla de Palma i entorns propers, atès que mesuren els nivells de l'aquífer objectiu i masses d'aigua subterrànies adjacents. En concret s'han seleccionat 166 piezòmetres dins dels octants 698-3, 698-4, 698-7 i 698-8.

Cadascun d'aquests piezòmetres constitueix un punt de medició del nivell freàtic amb periodicitat teòrica mensual. Les mesures més antigues daten de l'any 1968 (50 piezòmetres) i els pous més recents es van mesurar per primer cop entre els anys 2000 i 2003 (19 piezòmetres).

Un bon gruix de la xarxa de piezòmetres ofereixen mesures des de l'any 1991 (42 piezòmetres). També existeixen piezòmetres que s'han deixat de mesurar per problemes tècnics i que han estat substituïts per punts de mesura contigus (8 casos).

8.2. Escenaris estudiats

La periodicitat de les mesures piezomètriques hauria de ser mensual en condicions òptimes. Tanmateix els problemes per accedir als punts de mesura i la inexistència de dades en alguns períodes de temps fan que les sèries de mesures siguin incompletes.

Per tant, no és possible fer un estudi estacional basat en les oscil·lacions mensuals de tots els piezòmetres i per aquest motiu s'opta per estudiar-ne els valors mitjans i extrems deduïts del conjunt de dades existents.

Això fa que es defineixin tres escenaris d'estudi:

- Any hidrològic mitjà: situació normal que té en compte les mitjanes de tots els valors dels piezòmetres entre els anys 1969 i 2007.
- Any humit: situació extrema que té en compte els màxims nivells piezomètrics de cadascun dels punts de mesura entre els anys 1969 i 2007.
- Any sec: situació extrema que té en compte els mínims nivells piezomètrics de cadascun dels punts de mesura entre els anys 1969 i 2007.

Ambdós escenaris extrems (sec i humit) constitueixen situacions límit superior i inferior que no s'han arribat a produir mai en sentit estricte, perquè són el resultat d'escollir la dada més extrema en cada punt de mesura independentment de la data en què es produeix. Malgrat tot, són escenaris interessants per estudiar els topalls superior i inferior de l'aquífer del Pla de Sant Jordi.

8.3. Model piezomètric

A partir d'aquests tres escenaris es calcula la superfície piezomètrica resultant mitjançant l'ús d'eines SIG (Sistemes d'Informació Geogràfica) i l'aplicació de models d'interpolació i representació gràfica en forma de mallat de punts i de corbes d'igual nivell piezomètric (isopiezes).

Els models extrems mostren una distribució piezomètrica similar:

- Existència d'un mínim piezomètric a la zona entre la EDAR de Palma I, la carretera de Palma a Lluçmajor i una de les pistes de l'Aeroport de Son Sant Joan (la més propera al torrent de Sant Jordi).
- Existència de tres màxims piezomètrics a les zones properes a s'Aranjassa, son Oms i Casablanca, respectivament.

Aquesta configuració força l'aparició de dos fluxos subterranis: un en sentit est-oest a la zona central i sud del reg i un altre en sentit nord-sud al sector nord del regadiu.

8.4. Zones inundades i volums d'aigua embassats

Creuant la superfície del nivell piezomètric amb la superfície del terreny, mitjançant eines SIG, s'obtenen les zones amb aflorament d'aigües freàtiques en superfície i els calats d'inundació resultants.

Escenari	Superfície inundada (Ha)*	Volum total d'inundació (m ³)*
Any sec	6,73	62.000
Any humit	51,76	1.620.000
Any hidrològic normal	9,14	553.000

* No es té en compte l'àrea de ses Fontanelles, actualment zona d'aiguamolls d'interès ambiental.

Taula 2. Superfícies i volums d'inundació per als tres escenaris plantejats de situació dels nivells piezomètrics de l'aquífer del Pla de Sant Jordi.

9. CONCLUSIONS

El model d'avingudes superficials per als diferents períodes de retorn aporta informació significativa sobre el comportament dels torrents de Sant Jordi i es Siquió a la zona d'estudi:

- Tots dos torrents desborden a la zona nord del regadiu del Pla de Sant Jordi com a conseqüència de la manca de capacitat de la llera actual, en molts punts sense endegar i amb els talussos de terres en mal estat.
- La carretera de Palma a Lluçmajor obstaculitza el pas de la inundació superficial cap al sud de la zona de reg i atura la inundació per als períodes de retorn més baixos (inferiors a 50 anys).
- Algunes obres de pas sota de carreteres o autopistes són insuficients per absorbir les avingudes naturals de 50 anys de període de retorn i superiors. Les infraestructures afectades són:
 - Autopista de Llevant: passos del torrent de Sant Jordi al sud de son Oms i reg des Pil·larí.
 - Carretera de Palma a Lluçmajor, en l'encreuament cap a s'Aranjassa.
- Les zones inundades sense drenatge natural queden delimitades perfectament en els resultats de cada model. Aquestes zones se situen pràcticament sempre al sector nord del regadiu del Pla de Sant Jordi.

El model piezomètric extret de les dades disponibles de mesures de nivells dóna com a resultat una hipòtesi de flux subterrani amb les característiques següents:

- Un mínim de nivells piezomètrics a la zona central del Pla de Sant Jordi (prop de s'Aranjassa)
- Tres màxims de nivells piezomètrics situats a son Oms, sa Casablanca i a l'entorn de l'EDAR-I de Palma.
- El gradient hidràulic resultant del model genera un flux subterrani que alimenta la zona centre del Pla de Sant Jordi (vora s'Aranjassa).

El càlcul de tres hipòtesis d'estat de l'aquífer serveix per definir dues situacions extremes (any sec i any humit) i caracteritzar una situació intermèdia (any hidrològic normal). El creuament de la piezometria amb el terreny delimita les zones que queden inundades per elevats nivells piezomètrics. Aquestes zones es concentren en dues àrees:

- La major part de la inundació afecta el sector sud del reg amb una extensió variable en funció dels escenaris, però sempre inundant completament la zona de ses Fontanelles i unes parcel·les deprimides entre l'Autopista de Llevant i el nord de s'Arenal.
- També hi ha afecció greu per inundació d'aigües subterrànies a la confluència des Siquió amb el torrent de Sant Jordi.
- En període humit apareix una zona inundada al sector nord del reg del Pla de Sant Jordi, en concret al sud de sa Casablanca en parcel·les limítrofs a la zona aeroportuària de Palma.

Finalment, s'ha quantificat el volum d'aigua que quedaria estancat sense possible drenatge natural provinent tant per la inundació produïda per avinguda fluvial com per inundació generada per elevats nivells piezomètrics de l'aquífer plioquaternari del Pla. A grans trets la inundació fluvial afectaria més el sector nord del regadiu, mentre que la inundació causada per elevats nivells freàtics té lloc en major freqüència al sector sud del regadiu.

Prenent l'avinguda de 25 anys de període de retorn i les sèries piezomètriques d'un any hidrològic normal, s'estimen els volums a desguassar següents.

Causa de la inundació	Volum total d'inundació (m ³)*
Inundació per avinguda fluvial de T=25 anys	538.980
Inundació per elevats nivells piezomètrics en any hidrològic normal	553.000
TOTALS	1.091.980

* No es té en compte l'àrea de ses Fontanelles, actualment zona d'aiguamolls d'interès ambiental.

Taula 3. Volums d'aigua retinguts en el terreny com a conseqüència d'avinguda fluvial de T=25 anys i piezometria en any hidrològic normal.

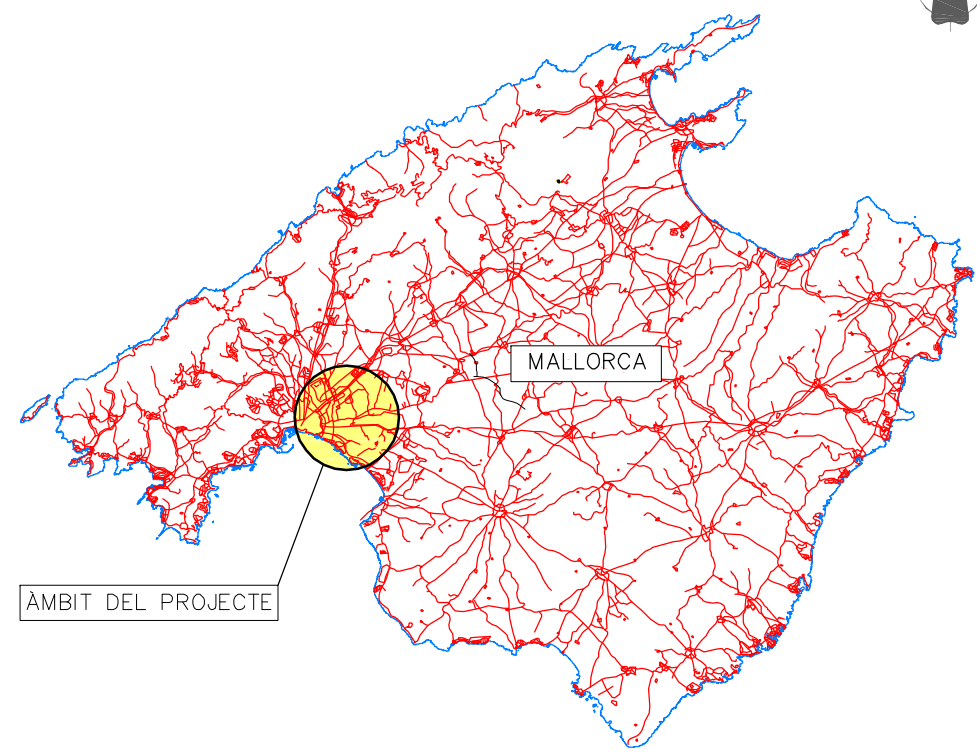


ÍNDIX

- 1 Situació
- 2 Plantes d'inundació per avingudes naturals
 - 2.1 Període de retorn de 5 anys
 - 2.2 Període de retorn de 10 anys
 - 2.3 Període de retorn de 25 anys
 - 2.4 Període de retorn de 50 anys
 - 2.5 Període de retorn de 500 anys
 - 2.6 Hidrograma continu amb Q (T=50 anys)
- 3 Plantes de piezometria
 - 3.1 Isopiezes per a any humit
 - 3.2 Isopiezes per a any sec
 - 3.3 Isopiezes per a any hidrològic normal
- 4 Plantes d'inundació per aigües subterrànies
 - 4.1 Període humit
 - 4.2 Període sec
 - 4.3 Període hidrològic normal



S/E



ÍNDEX

- 1 Situació
- 2 Plantes d'inundació per avingudes naturals
 - 2.1 Període de retorn de 5 anys
 - 2.2 Període de retorn de 10 anys
 - 2.3 Període de retorn de 25 anys
 - 2.4 Període de retorn de 50 anys
 - 2.5 Període de retorn de 500 anys
 - 2.6 Hidrograma continu amb Q (T=50 anys)
- 3 Plantes de piezometria
 - 3.1 Isopiezes per a any humit
 - 3.2 Isopiezes per a any sec
 - 3.3 Isopiezes per a any hidrològic normal
- 4 Plantes d'inundació per aigües subterrànies
 - 4.1 Període humit
 - 4.2 Període sec
 - 4.3 Període hidrològic normal



LLEENDA

 ÀREA INUNDABLE

 TORRENTS



LLEGENDA

AREA INUNDABLE

TORRENTS



LLEGENDA

AREA INUNDABLE

TORRENTS



LLEGENDA

AREA INUNDABLE

TORRENTS



LLEGENDA

AREA INUNDABLE

TORRENTS



LLEGENDA

AREA INUNDABLE

TORRENTS



LLEENDA ISOPIEZES

- 1.6
- 0.3
- 2.2
- 4.1
- 6.0





**LLEGENDA
ISOPIEZES**

- 2.5
- 1.1
- 0.3
- 1.7
- 3.1
- 4.5



LLEENDA

ÀREA INUNDABLE

TORRENTS





LLEENDA

ÀREA INUNDABLE

TORRENTS