



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

MODELITZACIÓ NUMÈRICA DEL PROCÉS DE DESHIDRATACIÓ DE FANGS DE
DEPURADORA MITJANÇANT AIGUAMOLLS ARTIFICIALS

Autor

Albert Argilaga Claramunt

Tutors

Joan García Serrano i Enrica Uggetti

Departament

Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

Intensificació

Enginyeria Sanitària i Ambiental

Data

juliol de 2011

Contingut

| | |
|---|----|
| Resum..... | 2 |
| Abstract | 3 |
| Introducció i Antecedents | 4 |
| Objectius | 6 |
| Revisió Bibliogràfica | 7 |
| Programa de sanejament de les aigües residuals urbanes de Catalunya: línia de fangs | 7 |
| Criteris de qualitat per la reutilització agrícola de fangs..... | 8 |
| Deshidratació de fangs de depuradora mitjançant aiguamolls artificials | 10 |
| Criteris d'operació i models de deshidratació existents | 12 |
| Teoria de la consolidació unidimensional (Terzaghi and Fröhlich, 1936) | 14 |
| Consolidació secundària | 18 |
| Evapotranspiració: equació de Penman-Monteith | 18 |
| Materials i mètodes | 21 |
| Adaptació de la teoria de consolidació a la deshidratació amb sistemes d'aiguamolls..... | 21 |
| Ajust dels paràmetres del medi | 23 |
| Mètodes numèrics: discretització de les equacions..... | 25 |
| Sortida numèrica de la implementació | 28 |
| Obtenció de dades..... | 34 |
| Descripció de la planta pilot..... | 34 |
| Dades sondes d'humitat | 35 |
| Dades meteorològiques..... | 41 |
| Calibratge i validació..... | 44 |
| Resultats | 46 |
| Calibratge i validació..... | 46 |
| Resum Validacions..... | 54 |
| <i>Case Study</i> | 55 |
| Resultats mitjana a la profunditat 0,3-0,5 H | 56 |
| Resultats mitjana a tota la profunditat H | 60 |
| Derivada de l'evolució d'humitat en zona superficial i mitjana temporal $\sum(\text{deriv}(1:T)/T)$. | 64 |
| Tractament dades <i>Case Study</i> | 66 |
| Conclusions | 70 |
| Recomanacions | 71 |
| Bibliografia | 72 |
| Annexes | 74 |

Resum

MODELITZACIÓ NUMÈRICA DEL PROCÉS DE DESHIDRATACIÓ DE FANGS DE DEPURADORA MITJANÇANT AIGUAMOLLS ARTIFICIALS

Autor: Albert Argilaga Claramunt Tutors: Joan García Serrano i Enrica Uggetti

En els processos de depuració d'aigües residuals es genera un residu consistent en un fang amb un gran contingut d'aigua. La gestió d'aquest fang suposa un important cost econòmic estimat entre el 20% i el 60% del cost total de depuració. Donada la importància de la gestió d'aquest residu es plantegen sistemes naturals per tal de reduir els costos energètics i millorar la integració en l'entorn; un d'aquests sistemes naturals consisteix en la utilització d'aiguamolls artificials. *Des del punt de vista econòmic, s'estima que l'operació d'aquests sistemes en poblacions petites (fins 2000 habitants equivalents) és favorable front de sistemes convencionals com les centrífugues o el transport del fang sense deshidratació prèvia.*

Els aiguamolls construïts consisteixen en una excavació en el terreny, o una obra de formigó, que conté un medi drenant constituït per diferents capes de graves, que permetin unes condicions de filtre, amb una última capa d'arenes a la superfície en la que es planten macròfits (*Phragmites australis* o *Typha sp.*) quan aquests macròfits estan completament desenvolupats la seva xarxa radicular d'arrels es distribueix per tota la capa d'arena i part de les graves. El funcionament d'aquests aiguamolls consisteix en anar alimentant la superfície amb dosificacions de fang fresc amb uns determinats períodes i volums i deixar que la percolació i l'evapotranspiració de les plantes redueixi el contingut d'aigua. La capa de fang va augmentant d'espessor durant la vida útil dels aiguamolls i la xarxa radicular dels macròfits s'estén per aquesta afavorint el procés de deshidratació. Aquesta capa de fang pot assolir uns nivells de deshidratació i mineralització significatius en comparació als sistemes mecànics (centrífugues, filtres banda) utilitzats tradicionalment. Quan la capa de fangs ha assolit el nivell del resguard es deixa reposar el sistema durant un període llarg en el que no es produeixen alimentacions i finalment es retira el fang deshidratat per tornar a iniciar el procés.

La falta d'uns criteris d'operació estandarditzats fa necessària l'elaboració d'un model numèric per tal d'obtenir unes directrius per determinar els períodes i volums d'alimentació que maximitzin els rendiments del sistema. En aquesta tesina es planteja desenvolupar un model numèric per simular la deshidratació dels fangs consistent en el mètode de les diferències finites (MDF) que utilitza l'equació de la difusió amb un terme font com a equació constitutiva. A partir de dades de sondes instal·lades en plantes pilot i plantes reals es calibren i validen els paràmetres del model, amb aquests paràmetres calibrats es realitza un *Case Study* considerant diferents espessors de la capa de fang i zones climàtiques que comporten diferents valors d'evapotranspiració. A partir dels resultats del *Case Study* es determinen uns valors òptims del període i volum de les alimentacions.

Els resultats obtinguts mostren una correlació important entre l'espessor de la capa de fangs i la distribució temporal de la deshidratació, capes de fangs més primes comporten disminucions d'humitat més acusades en els moments inicials, capes de fang més desenvolupades tenen una deshidratació que es prolonga més en el temps. Pel que fa als valors absoluts de la deshidratació s'observa que aquests són funció principalment de l'evapotranspiració. A partir d'aquests resultats s'obté una expressió numèrica que relaciona període òptim entre alimentacions i espessor de la capa així com el volum corresponent en funció del període i l'evapotranspiració i es conclou proposant una periodificació de les alimentacions compatible amb els horaris laborals, s'obtenen així uns intervals del valor de l'espessor de la capa, per a cadascun dels quals es dona un període i un volum d'alimentació.

Abstract

NUMERICAL MODELING OF WASTEWATER TREATMENT PLANT SLUDGE DEWATERING USING CONSTRUCTED WETLANDS

Author: Albert Argilaga Claramunt Tutors: Joan García Serrano i Enrica Uggetti

Wastewater processes generates a waste consisting of a clay with a high water content. The management of this clay implies an important economic cost estimated between 20% and 60% of the total cost of treatment. Given the importance of managing this waste there are proposed some natural systems to reduce energy costs and improve integration in environment, one of these systems are the constructed wetlands.

From the economic point of view, it is estimated that the operation of these systems in small towns (population equivalent to 2000) is good deal of conventional systems such as centrifugal or to transport mud without prior dehydration.

The constructed wetlands consist of an excavation in the ground or a concrete structure, which contains a draining medium comprising different layers of gravel, who allows filter conditions, with a final layer of sand in the surface with macrophytes planted in (*Phragmites australis* and *Typha* sp.) when macrophytes are fully developed their root network is distributed throughout the layer of sand and gravel. The functioning of these wetlands consists in feeding the surface with dosages of fresh mud with certain periods and volumes and let the percolation and evapotranspiration of plants reduce water content. The clay layer thickness keeps increasing during the life of the wetlands and the network of roots of macrophytes extends through the layer promoting the dehydration process. This layer of mud can achieve significant levels of dehydration and mineralization compared to mechanical systems (centrifuges, filter band) traditionally used. When the layer of sludge has reached the wetland capacity is left to rest in for a long period without feeds and finally removed for restarting the process.

The lack of standardized operational criteria makes necessary the development of a numerical model to obtain guidelines to determine the feed periods and amounts to maximize system performance. This dissertation focuses on developing a numerical model to simulate the dehydration of sludge consisting in the finite difference method (FDM) using the diffusion equation with a source term as a constitutive equation. Based on data from sensors installed in pilot plants and real plants are calibrated and validated the model parameters, with these parameters calibrated a *Case Study* is carried out considering different thicknesses of the layer of mud and climate zones involving different values of evapotranspiration. Based on the results of the *Case Study* we determine optimal values of feeds period and volume.

The results show a significant correlation between the thickness of the layer of sludge and temporal distribution of dehydration, thinner layers of sludge show more marked decreases humidity in the initial moments, thicker layers of mud has a dehydration that extends more over time. absolute values of dehydration are function of evapotranspiration.

With these results we obtain a numerical expression that relates optimum period between feeds and thickness of the layer and the corresponding volume depending on the period and evapotranspiration and concludes proposing timing of feeds compatible with labor calendar, thickness intervals are obtained and for each one is given a period and a volume supply.

Introducció i Antecedents

En l'activitat de les societats humanes ja siguin domèstiques o industrials es generen aigües residuals, aquestes aigües residuals són el resultat d'afegir diversos contaminants a l'aigua durant els seus usos.

L'objectiu dels processos de depuració és retornar l'aigua al medi en les millors condicions possibles de quantitat i qualitat per evitar el deteriorament dels recursos naturals.

En una planta depuradora alguns dels processos tenen la finalitat de separar els contaminants mitjançant la seva decantació. Aquests processos generen un fang que consisteix en part de l'aigua residual amb una gran concentració de matèria en suspensió, habitualment entre 0,5-15% (Von Sperling and Gonçalves, 2007). El problema que comporta aquest residu és que té un gran volum a causa del contingut en aigua que encareix i dificulta el seu transport i abocament.

En els darrers anys s'han instal·lat una gran quantitat d'estacions depuradores d'aigües residuals a Catalunya, aquestes depuradores han representat un fet cabdal per la millora de les condicions ambientals dels rius, però ha generat un nou problema que és el gran volum de fangs que es produeixen (Figura 1. Producció de fangs de depuradora a Catalunya. Font: Agència Catalana de l'Aigua, Programa d'actuacions per a la gestió dels fangs de depuració d'aigües residuals urbanes de Catalunya, 1995.), cal tenir en compte que una planta moderna de tractament d'aigües residuals genera aproximadament 30 kg de fangs secs per persona i any (Mata, 2008).

EVOLUCIÓ DE LA PRODUCCIÓ DE FANGS A CATALUNYA (1998-2007)

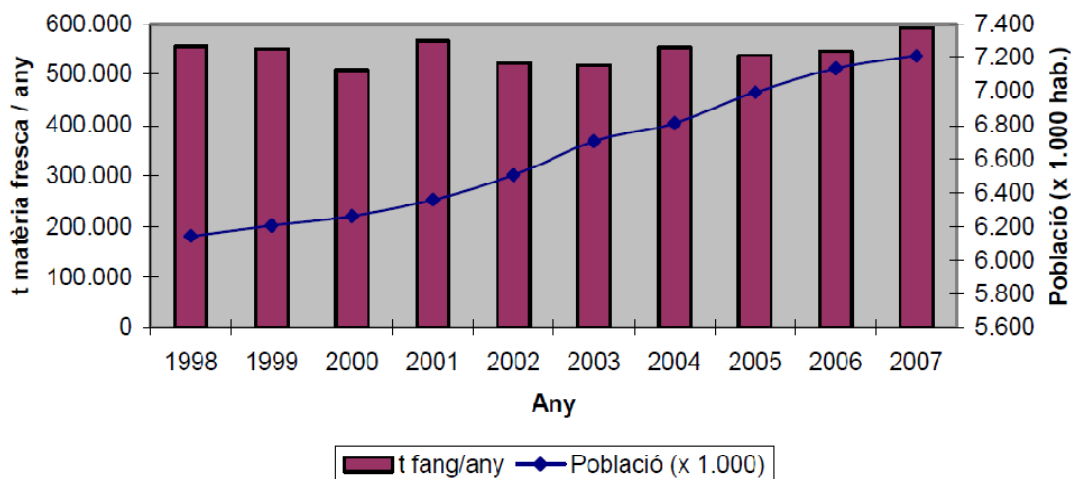


Figura 1. Producció de fangs de depuradora a Catalunya. Font: Agència Catalana de l'Aigua, Programa d'actuacions per a la gestió dels fangs de depuració d'aigües residuals urbanes de Catalunya, 1995.

Tradicionalment els sistemes per reduir el contingut d'aigua dels fangs han estat de tipus mecànic com sotmetre els fangs a centrifugació o premsar-los en filtres banda, o tèrmics per tal d'evaporar l'excés d'aigua. Un cop reduït significativament el contingut d'aigua els fangs

que ara ja no tenen consistència líquida es poden transportar de manera més econòmica i disposar-los en abocadors controlats o valoritzar-los per ser utilitzats en altres usos com processar-los com adob agrícola, aprofitament del poder calorífic amb finalitats energètiques i digestió anaeròbia per obtenció de gas.

Un inconvenient dels processos físics i tèrmics és el seu gran cost pel consum energètic que comporten així com per requerir una inversió en maquinària, el consum energètic és cada cop un factor més negatiu pels problemes d'insostenibilitat que causa la seva generació i per l'augment de preu dels combustibles fòssils.

El tractament dels fangs produïts en els processos de depuració d'aigües residuals representa entre el 20% i el 60% del cost total de depuració (Wei et al.,2003; Von Sperling and Gonçalves, 2007). A causa dels costos tan elevats, és habitual que les petites plantes depuradores no disposin de línia de tractament de fangs, aquestes emmagatzemen els fangs i periòdicament els transporten fins a plantes més grans que disposin de línia de tractament de fangs. El gran contingut d'aigua dels fangs sense tractar acreix els volums i conseqüentment els costos del seu transport; d'aquí la importància d'estudiar els mecanismes de deshidratació d'aquests fangs.

És per aquest motiu que es planteja la deshidratació de fangs mitjançant mètodes naturals amb un baix o nul consum energètic, una tècnica que ja s'utilitza amb èxit en la línia d'aigua de depuradores. Concretament es planteja la utilització d'aiguamolls construïts (també coneguts com llits de macròfits) sobre els que es disposa el fang que s'obté com a residu del procés de depuració. Aquests aiguamolls actuen com un medi drenant sobre el que es disposa el fang de manera similar a una era d'assecat, però amb la particularitat de contenir macròfits (*Phragmites australis* o *Typha sp.*) que, amb la succió de les arrels i subseqüent evapotranspiració, contribueixen en el procés de deshidratació permetent assolir continguts en matèria seca del fang més elevats.

L'operació dels sistemes és un aspecte molt important perquè determina la freqüència de buidat del sistema per una banda i els seus rendiments d'assecatge per l'altra. Una bona operació del sistema es tradueix en uns correctes temps d'alimentació i repòs, que determinaran la sequedat del fang i la velocitat a què augmenta la capa de fang dins dels llits. Com més sec estigui el fang, més lentament augmentarà la capa i més llarga serà la vida útil dels llits, que s'hauran que buidar amb menor freqüència reduint consegüentment els costos d'exploració. Tot i això, segon el nostre coneixement, no existeixen estudis de modelització de la deshidratació del fang dins dels llits.

D'aquí la importància de tenir un model capaç de predir els temps de deshidratació del fang que pugui ser utilitzat per l'exploració del tractament. En el present estudi es modelitza numèricament la deshidratació de la capa de fangs dipositats dins dels llits de macròfits utilitzant les equacions de la percolació d'aigua a través del fang i l'evapotranspiració dels macròfits. D'aquesta manera es permet determinar els temps de deshidratació dels fangs i, conseqüentment, millorar els criteris d'exploració dels sistemes.

Aquest model es calibrarà amb dades experimentals de plantes pilot, es validarà amb dades de plantes reals de diferents llocs i èpoques de l'any i finalment es realitzarà un *Case Study* consistent en portar a terme una simulació amb el calibratge resultant per tal d'estimar els rendiments d'eliminació d'humitat sota diverses condicions.

Objectius

La finalitat és desenvolupar, calibrar i validar un model numèric que permeti predir de manera analítica la deshidratació del fang en els aiguamolls en funció de les variables meteorològiques i les característiques del sistema. Una vegada desenvolupat el model es pretén:

- Determinar el temps òptim entre alimentacions de fang al sistema que maximitzi el rendiment. Determinar el volum adequat de fang durant les alimentacions.
- Donar tota una sèrie de recomanacions d'exploració de sistemes d'aiguamolls de fangs per tal de millorar la seva gestió en sistemes a gran escala.

Revisió Bibliogràfica

Programa de sanejament de les aigües residuals urbanes de Catalunya: línia de fangs

El document PSARU 2005 relaciona una llista d'actuacions en sistemes existents exigibles per la Directiva marc de l'aigua per a l'any 2015, la resta d'actuacions sobre sistemes existents s'ordenen donant prioritats a aquelles que siguin de compliment obligatori i afectin la contaminació concreta del medi i alguns usos prioritaris, en aquesta ordenació trobem les obres de millora per a la gestió dels fangs.

Segons Pérez (1994), els aspectes clau dels fangs generats en els processos de depuració es poden resumir en:

- La correcta eliminació dels fangs té una rellevància tècnica i econòmica d'abast, com a mínim, semblant a la depuració de les aigües residuals.
- El destí final dels fangs s'hauria de considerar com un condicionant en el disseny de les estacions depuradores d'aigües residuals.
- L'acceptació social dels processos de gestió dels fang té un paper important en la valoració de les alternatives.
- S'ha de tenir especial consideració pel que fa als impactes ambientals que produeixen els diferents processos d'eliminació dels fangs, l'impacte existeix i s'ha de tractar en termes relatius.
- L'evolució tecnològica condiona la validesa temporal de les alternatives.
- Importància del seguiment continuat als efectes de cadascuna de les solucions adoptades.

Els criteris bàsics per a la selecció de la línia de fangs són els següents:

- Minimització de l'impacte ambiental.
- Reducció de la quantitat de fang produït.
- Optimització del cost econòmic de l'eliminació de fangs.
- Adopció de tecnologies contrastades.
- Simplificació del transport de fangs.
- Compliment de la legislació vigent.
- Acceptació social de les solucions plantejades.

Les alternatives de destinació del fang històricament han estat: abocament al mar, abocament en abocadors específics, co-abocaments en abocadors de residus sòlids urbans i aplicació al sòl agrícola, altres alternatives incipients o poc implantades són la utilització com a matèria primera en materials de construcció o com a combustible de baixa qualitat. L'abocament al mar, una tècnica àmpliament utilitzada durant molts anys queda desestimada ja que el marc legal actual la prohibeix, l'abocament en abocadors específics queda supeditada a disposar d'emplaçaments adequats i a l'execució de les obres d'enginyeria civil necessàries, d'igual manera, el co-abocament en abocadors de residus sòlids urbans presenta problemes similars ja que requereix de l'existència prèvia d'instal·lacions en el marc territorial per a la gestió d'aquest residu.

L'alternativa d'aplicació al sòl ja sigui com a fertilitzant o com a correcció sembla ser l'alternativa més atractiva a Catalunya donats els inconvenients de l'abocament o co-abocament. Catalunya presenta unes característiques climatològiques especialment aptes per a l'aplicació de fangs, la principal limitació es refereix a la qualitat del fang, disponibilitat de terrenys aptes i complexitat de les tasques de gestió.

A nivell global la disponibilitat de terrenys agrícoles no acostuma a ser un limitant, fins i tot assumint ràtios d'aplicació molt conservadors el requeriment de terrenys és petit en relació a la disponibilitat, el principal condicionant de l'aplicació al sòl és la desigual distribució territorial, ja que els principals focus productors es concentren en zones amb més densitat de població mentre que la major disponibilitat de terres es troba en les zones amb baixa densitat de població, aquest fet confereix una complexitat addicional a la gestió.

Existeix una estreta relació entre les quantitats de fang a tractar i la idoneïtat del procés, així com en plantes de grans aglomeracions urbanes el procés idoni és digestió anaeròbia, deshidratació i emmagatzematge on predominen les economies d'escala, en petites plantes de zones rurals són més favorables els processos que apliquen els fangs al sòl.

Per altra banda, en poblacions en les que no es pot portar a terme un control estricte dels abocaments industrials a la xarxa, la presència de contaminants pot impossibilitar l'aplicació dels fangs al sòl, quedant les possibilitats reduïdes a l'abocament i co-abocament, de manera directa o després d'incineració, quedant aquesta última subjecta a la presència de metalls pesants volàtils (Hg i Cd) i dioxines en els fangs.

L'aplicació de fangs de depuradora al sòl només és factible quan s'han sotmès a algun procés que estableixi la seva fracció orgànica, referent a la etapa de deshidratació no hi ha limitacions en aquest aspecte, només pel que fa a les facilitats de maneig i aplicació segons els equips i maquinària utilitzats i a les facilitats de transport i emmagatzematge.

Pel que fa a co-abocament existeix l'exigència legal de portar-los a l'abocador amb un contingut d'humitat inferior al 65% (Pérez, 1994).

Criteris de qualitat per la reutilització agrícola de fangs

Segons Felipó (1994), l'aportació de nutrients al sòl ha estat una pràctica lligada a l'agricultura des dels seus inicis, en l'agricultura tradicional aquest aportació es podia dur a terme a partir de les restes de poda, restes vegetals i fems resultants de l'activitat de l'explotació.

Llastimosament, en l'actualitat, les explotacions intensives amb una tendència al monocultiu no són autosuficients en l'aportació de nutrients al sòl i necessiten una font externa de nitrogen i fòsfor per evitar l'empobriment de les terres i el conseqüent decreixement dels rendiments.

La reutilització de residus s'ha convertit en una pràctica habitual per suplir les necessitats de nutrients en l'agricultura, aquesta reutilització permet eliminar un residu que sovint era costós de gestionar a la vegada que redueix la dependència per part de l'agricultura dels productes agroquímics. Els fangs de depuradora són un residu a tenir en compte en aquesta reutilització donada la gran quantitat que se'n produeix (Figura 2. Destinació final dels fangs de depuradora a Catalunya, 2009 (Valors en tones de matèria seca)).

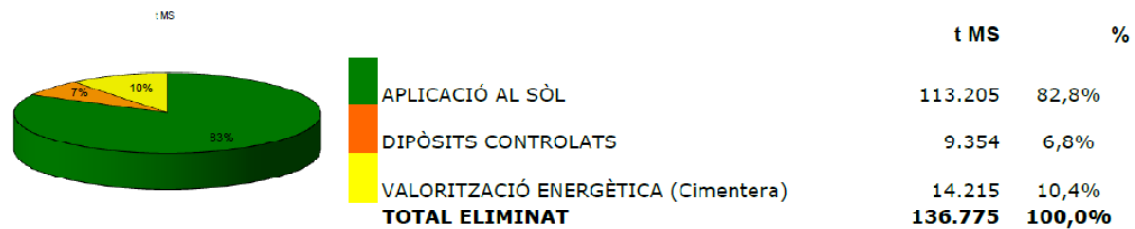


Figura 2. Destinació final dels fangs de depuradora a Catalunya, 2009 (Valors en tones de matèria seca). Font: Programa d'actuacions per a la gestió dels fangs residuals generats en els processos de depuració d'aigües residuals urbanes de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua

Per portar a terme aquesta reutilització cal valorar els riscos sanitaris i ambientals que comporta, entenent com a risc la predicció que es pugui manifestar un efecte advers sobre la població humana o el medi ambient.

La presència d'elements potencialment tòxics és inevitable en fangs de depuradora, però un contingut elevat acostuma a anar sempre relacionat a activitats industrials. La legislació relativa a reutilització de residus en agricultura fixa valors màxims de presència de metalls i altres contaminants, per tant la reutilització com a fertilitzants de fangs procedents de depuració d'aigües de certs processos industrials queda descartada.

Altres elements potencialment tòxics són els compostos orgànics, en els últims anys ha proliferat molt la presència d'aquests elements a causa d'una àmplia gamma d'usos com desinfectants, productes de neteja domèstics o productes fitosanitaris.

Tenint en compte la procedència dels fangs cal considerar la presència de microorganismes patògens, entre aquests es troben: bacteris, virus, fongs, protozous i helmints causants de malalties com: salmonel·losi, disenteria, gastroenteritis, àntrax, poliomielitis, meningitis, hepatitis, toxoplasmosis, etc.

L'assecat a l'aire de fangs durant dos mesos a més de 0°C produeix una disminució significativa dels patògens. (USEPA, 1993). D'aquesta dada es pot deduir que la deshidratació en llits de macròfits té un efecte pel cap baix igual al de l'assecat a l'aire pel que fa a eliminació de patògens ja que ateny graus de deshidratació més alts amb els mateixos temps de repòs a més d'afavorir la difusió d'oxigen que contribueix a la mineralització de la matèria orgànica.

Aquests són els tres vectors principals que poden contaminar el sòl a partir dels fangs de depuradora, però existeixen altres agents adversos de menor importància que també s'han de tenir en compte com són: excés de nutrients, salinitat, llavors, radionúclids i olors.

L'excés de nutrients que és el més significatiu dels efectes adversos pels perjudicis que pot causar en el medi (eutrofització) o en la salut (metahemoglobinèmia) no és preocupant ja que en els llits de macròfits es produeix una gran mineralització durant el temps de repòs que redueix significativament les quantitats de nitrogen i fòsfor.

La resta de factors caldrà valorar-los en cada cas, la salinitat i radioactivitat no acostumen a ser un problema per les dilucions que presenten les aigües residuals, la presència de llavors pot portar problemes de productivitat en els cultius.

Deshidratació de fangs de depuradora mitjançant aiguamolls artificials

Els aiguamolls construïts tenen la finalitat de deshidratar i mineralitzar els fangs de depuradora, habitualment els fangs entren al sistema encara amb un elevat contingut d'aigua. Consten d'un dipòsit construït, pot ser una estructura de formigó o una excavació en el terreny degudament impermeabilitzada, aquest dipòsit està ple d'un medi granular, sobre del medi granular, habitualment grava, es disposa una capa d'arena per impedir que el fang s'introdueixi en el medi i l'obstrueixi. En el medi granular hi ha plantats els macrofits típics d'entorns fluvials com el canyís (*Phragmites australis*) o la boga (*Typha sp.*) (Figura 3. Esquema d'un llit de macròfits.).

No és necessari que els fangs passin per un espessidor ja que es distribueixen millor sobre els llits si tenen un alt contingut d'aigua (98-99%) i una consistència líquida, aquest excés d'aigua percola ràpidament durant les primeres hores després de l'alimentació.

El procediment consisteix en anar alimentant els llits de macròfits amb successives dosificacions que resulten en una capa de sòlids que es va formant sobre el medi granular. Les alimentacions es porten a terme de la següent manera, s'aboca sobre el llit una quantitat de fang entorn de 10l/m², aquest fang es deixa reposar un temps (manca de criteri d'operació), en els moments inicials després de l'alimentació la percolació és ràpida, a mesura que passa el temps l'aigua cada cop percola de manera més lenta, a mesura que el fang de les alimentacions va perdent humitat la capa va reduint el seu espessor fins que es produeix una nova alimentació al cap d'un o dos dies fins a una o dos setmanes aproximadament. L'increment d'altura entre alimentacions és de l'ordre de pocs mil·límetres, amb una forta dependència de les característiques del fang, espessor total de la capa, temps entre alimentacions, etc.

Les alimentacions se succeeixen sistemàticament fins que s'ocupa tot l'espai disponible en l'aiguamoll, l'altura del resguard determina el temps d'acumulació de fangs. Un cop ple es deixa reposar durant alguns mesos (normalment 4) fins a 1 any, temps durant el qual el fang es continuarà deshidratant i experimentarà una important mineralització.

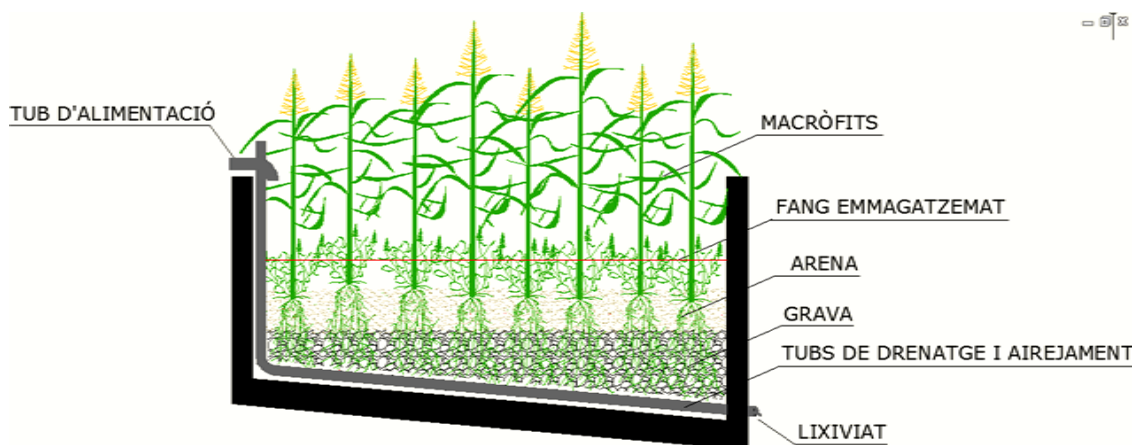


Figura 3. Esquema d'un llit de macròfits. Font: (Uggetti et al., 2010)

Un cop passat el temps de repòs, al final del tractament, el fang s'extreu i es torna a iniciar el cicle d'alimentacions sense necessitat de replantar els macròfits.

L'alimentació d'aquest tipus de sistemes és *batch*, s'alternen així períodes d'alimentació (1 o 2 dies) a períodes de repòs (4-10 dies) durant els quals es dosifica el fang a un altre llit. Com que s'alternen períodes d'alimentació i períodes de repòs és convenient disposar de diversos llits de manera que sempre hi hagi llits disponibles per efectuar les alimentacions mentre la resta està en període de repòs.

La presència de les plantes (*Phragmites australis* o *Typha sp.*) té una especial rellevància en el funcionament del procés gràcies a la evapotranspiració. Durant els primes dies la pèrdua d'humitat es produeix principalment per la percolació cap al medi filtrant ja que el fang té una alta porositat i les pressions intersticials es dissipen fàcilment, a mesura que passen els dies (1-2 setmanes) la porositat del fang va disminuint, les pressions intersticials es dissipen més lentament i la evapotranspiració passa a ser la principal responsable de la deshidratació.

En aquest sentit, les plantes utilitzades (*Phragmites australis* o *Typha sp.*) ofereixen uns bons resultats donada la seva alta capacitat d'evapotranspiració. Cal esmentar que tot i que inicialment les plantes estan plantades a la capa d'arena, durant l'operació de l'aiguamoll la xarxa d'arrels es va estenent per la capa de fang. Les arrels es distribueixen així per tota la profunditat del fang exercint una succió distribuïda sobre aquesta, a diferència d'altres sistemes com les eres d'assecat on tota l'aigua que s'evapora ha de travessar la superfície en la que se sol crear una crosta que dificulta el procés. Aquestes plantes tenen una gran resistència a diverses condicions, presència de sals, contaminants, microorganismes, etc. (Obolewski et al., 2011)

Una de les virtuts del sistema és que les arrels poden exercir grans pressions negatives (succió), de manera que durant els períodes de repòs es poden arribar a nivells de deshidratació molt més elevats que els que s'aconseguirien simplement per percolació ja que les arrels poden vèncer les pressions negatives que es generen a causa de l'acoblament del problema hidràulic-mecànic. (Fatahia et al., 2009)

Per altra banda cal destacar la gran mineralització que es produeix, durant la segona etapa de la deshidratació protagonitzada per l'evapotranspiració es forma a la superfície de la capa de fangs una crosta que, a causa del moviment de les plantes amb el vent, es trenca i produeix esquerdes que afavoreixen l'entrada d'oxigen cap a capes inferiors. Aquest oxigen permet que es degradin els nutrients i la matèria orgànica presents de manera aeròbia sense arribar a processos anaerobis (metanogènesi). També hi ha un aport d'oxigen al sistema a través de la xarxa d'arrels que durant el dia i a través de la fotosíntesi de les fulles il·luminades pel sol difonen oxigen al voltant de les arrels, es crea doncs un cultiu de bacteris aerobis a la zona radicular dels macròfits que porta a terme una gran mineralització del fang.

El producte obtingut després del temps de repòs té unes característiques similars al compost agrícola, amb una inversió energètica per a la seva obtenció molt menor tot i que amb majors requeriments d'espai i temps. De tota manera cal valorar el producte des del punt de vista de presència de contaminants i patògens abans d'equiparar-lo a un adob.

Un dels factors determinants en la valoració d'aquests sistemes és la disponibilitat de terrenys ja que els seus requeriments s'estimen entre 0,5 i 4 m²/hab-eq (De Maeseneer, 1997). Des del punt de vista econòmic, s'estima que l'operació d'aquests sistemes en poblacions petites (fins 2000 habitants equivalents) és favorable enfront de sistemes convencionals com les centrífugues o el transport del fang sense deshidratació prèvia (Uggetti et al., 2011).

Críteris d'operació i models de deshidratació existents

Els sistemes de deshidratació i mineralització de fangs mitjançant llits de macròfits s'han anat desenvolupant a partir del final dels anys 80, sobretot en països del nord d'Europa. No obstant el clima favorable a la deshidratació, aquestes sistemes no s'han utilitzat molt en països mediterranis. Actualment, a Catalunya existeixen només 7 plantes (construïdes en els últims 5 anys) utilitzant aquest tractament.

Alguns dels estudis existents se centren en valorar la viabilitat econòmica d'aquests sistemes enfront dels mètodes tradicionals de deshidratació basant-se en dades de plantes reals (Uggetti et al., 2011), altres focalitzen l'eliminació de nutrients i contaminants que es produeix en aquests sistemes (Stefankis et al., 2009). La majoria del estudis demostren bons resultats respecte la deshidratació i mineralització del fang en diferents països (Uggetti et al., 2010). Tot i així, segon el nostre coneixement, no existeixen estudis de modelització de la deshidratació del fang dins dels llits.

A la literatura es pot observar una certa disparitat en la manera d'operar les plantes (Taula 1)

| Sistema | Cicles d'alimentació | Temps repòs | Repòs final | Referència |
|-----------------------|---|--|-------------------------------------|------------------------------|
| | Temps alimentació | | | |
| Andancette, França | Puntual. | 2 setmanes. | 14 setmanes. | Troesch et al., (2009) |
| Thrace, Grècia | 1 dia. | 20 dies. | Uns quants anys. | Melidis et al., (2007) |
| Yaoundé, Camerun | Inicial: increments graduals de cabal, durant 10 mesos una o dos aplicacions a la setmana. | 5 o 6 dies | | Kengne et al. (2006) |
| Andancette, França | 2-3 dies | 20 dies màxim | No | Troesch et al., (2009) |
| Andancette, França | 5 dies | 24 dies. | No. | Vincent et al., (2010) |
| Changchun City, China | Alta càrrega durant dos setmanes, una vegada al dia. Durant 14 setmanes baixa càrrega, una vegada cada 4 dies | 4 dies | 8 mesos | Yubo C. et al., (2008) |
| Pathumtani, Thailand | Puntual. | 1 setmana | 12 setmanes | Panuvatvanich et al., (2009) |
| Xanthi, Grècia | Puntual | 2-4 setmanes | | Stefanakis et al., (2009) |
| França | Puntual | Llits A: 1 dia Llits B: 2 setmanes Llits C: 4 setmanes | Llits A: 70 dies Llits B i C: no | Liénard et al., (1995) |

Taula 1. Críteris d'operació disponibles a la bibliografia

La operació dels sistemes és un aspecte molt important perquè determina la freqüència de buidat del sistema per una banda i els seus rendiments d'assecatge per l'altra. Una bona

operació del sistema es tradueix en uns correctes temps d'alimentació i repòs, que afectaran la sequedat del fang i la velocitat d'augment de la capa de fang dins dels llits. Com més sec sigui el fang, més lentament augmentarà la capa de fang i més llarga serà la vida útil dels llits, que s'hauran de buidar amb menor freqüència reduint consegüentment els costos d'explotació. D'aquí la importància de tenir un model capaç de predir els temps de deshidratació del fang que puguin ser utilitzat per l'explotació del tractament.

En un recent estudi (Giraldi et al., 2009), es basa en unes equacions empíriques (Eq. 1 i 2) obtingudes a partir de dades d'humitat de sistemes d'aiguamolls construïts amb llits de macròfits a Itàlia, les equacions s'obtenen sumant dues exponencials negatives que s'ajusten a les dades mitjançant mínims quadrats.

$$WC_t = 0,07e^{-1.0772t} + 0,92e^{-0,0005t} \quad (\text{hivern}) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$WC_t = 0,07e^{-1.0772t} + 0,92e^{-0,0171t} \quad (\text{estiu}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Aquestes exponencials tenen per objectiu modelitzar la percolació i l'evapotranspiració respectivament. S'estableix una equació per l'estiu i una per l'hivern ja que l'exponencial que es refereix a l'evapotranspiració en la realitat té una forta dependència de la temperatura, radiació solar i humitat relativa mentre que l'única variable que contempla aquesta equació empírica és la temporal.

El principal inconvenient d'aquest model és que és merament empíric i consta de dos equacions diferents per estiu i hivern, a més a més no considera, en les variables d'entrada, les dades que intervenen en l'evapotranspiració.

Per altra banda, Tao et al., (2008) desenvolupa un model numèric que simula l'assecat convectiu de fang provinent d'aigües residuals utilitzant el mètode dels elements finits. Aquest model simula l'assecat del fang mitjançant un flux d'aire calent i sense intervenció de plantes, tot i buscar el mateix objectiu que en el nostre cas, la metodologia és sensiblement diferent ja que en tractar-se d'un assecat amb aire calent té una especial importància la formació d'una capa superficial amb esquerdes per la retracció del fang assecat. En el nostre model té més importància la percolació cap a les capes drenants de l'aiguamoll, a més de contenir el terme font que representa l'absorció de les arrels de les plantes.

Amb la informació disponible fins al moment no es tenen uns criteris d'operació dels sistemes d'aiguamolls, cal conèixer el procés de deshidratació i la influència que exerceixen sobre aquestes les variables meteorològiques per tal d'adoptar unes pautes que permetin establir els temps d'assecatge òptims. D'aquesta manera un model analític de la pèrdua d'humitat en els llits pot ser una eina útil per a la gestió dels sistemes, predient els temps necessaris per aconseguir una determinada deshidratació entre alimentacions dels aiguamolls.

Es constata de les dades disponibles de plantes pilot i plantes reals que els rendiments de deshidratació del fang tenen una gran variabilitat en funció de la climatologia, quantitat de fang acumulat, característiques del fang, etc. i un mateix temps de repòs es tradueix en una reducció en la humitat del fang molt dispar en diferents aiguamolls.

És per això que es creu necessària la confecció d'un model numèric analític que a partir de les equacions constitutives del procés i tenint en compte les condicions de contorn del nostre cas així com l'efecte de la succió de les arrels de les plantes que pugui predir l'evolució del contingut d'humitat dels fangs.

Per tal de modelitzar la deshidratació dins dels llits, es considera útil aplicar, per una banda la teoria de la consolidació unidimensional de Terzaghi and Fröhlich, (1936) que modelitza la

consolidació de la capa de fang, i per altra banda la fórmula de Penman-Monteith per estimar l'evapotranspiració de les plantes a partir de la radiació solar, temperatura, velocitat del vent i humitat relativa, també es considera la precipitació durant el període com una entrada d'aigua al sistema.

Amb tot això s'obté un model numèric amb base analítica que a partir de cinc dades meteorològiques pot predir l'evolució del contingut d'humitat en el temps.

Teoria de la consolidació unidimensional (Terzaghi and Fröhlich, 1936)

Per modelitzar el comportament de la capa de fangs que disposem sobre el medi granular hem assumit la hipòtesi que es tracta d'un sòl amb una fase sòlida i les seves corresponents característiques mecàniques i una fase líquida que ocupa tota la porositat amb les corresponents característiques hidràuliques, es tracta d'un problema amb acoblament de flux i deformació: consolidació.

En el camp de la geotècnica aquest procés és conegut com consolidació primària i es tracta de la disminució d'espessor d'un estrat d'argiles a causa de la pèrdua d'aigua intersticial dels seus porus. Aquesta pèrdua d'aigua és causada per la sobrepressió intersticial d'aquesta que ocupa tota la porositat del sòl i que es va dissipant, la sobrepressió pot ser causada per una sobrecàrrega en el sòl (pressió de consolidació) que en un primer moment es transmet íntegrament a la fase líquida per tractar-se d'un procés no drenat (drenat molt lentament), a mesura que les pressions es dissipen a causa de la sortida d'aigua del sistema les tensions es van transmetent a l'esquelet sòlid del sòl (pressions efectives), teòricament per a un temps infinit, quan tota la sobrepressió d'aigua s'ha dissipat la sobrepressió inicial és aguantada íntegrament per l'esquelet sòlid.

La dissipació de pressions intersticials, que en el moment inicial són iguals a la pressió de consolidació va transmetent la càrrega a l'esquelet sòlid (pressions efectives) que són les que governen el comportament mecànic del sòl i produeixen la consolidació (Eq.3):

$$\sigma' = \sigma - u_s \quad (\text{Eq.3})$$

On

| | |
|-----------|-------------------------|
| σ' | pressió efectiva |
| σ | pressió de consolidació |
| u_s | pressió intersticial |

A mesura que l'aigua surt del sistema les sobrepressions es fan més petites, per tant la sortida és més lenta, arribant a una asímptota quan la sobrepressió intersticial és nul·la.

Es pot fer una analogia amb un sistema format per un cilindre ple de sòl (Figura 4) amb un èmbol porós que permet aplicar càrregues al sòl a la vegada que deixa que el fluid s'escapi dels porus del sòl (a). La part (b) mostra una analogia hidrodinàmica en la que les propietats de sòl s'han idealitzat, la resistència de l'esquelet mineral del sòl està representada per un ressort helicoidal mentre que la resistència al flux de l'aigua està representada per una vàlvula tancada en l'èmbol.

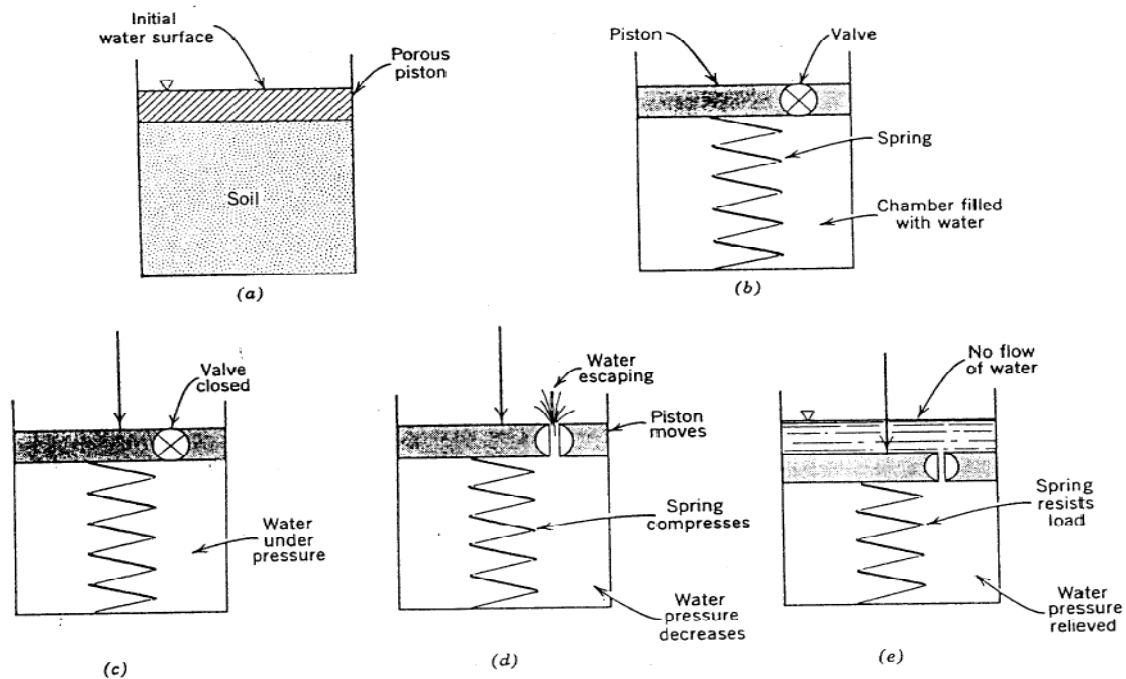


Figura 4. Analogia consolidació amb un sistema mecànic hidràulic. Font: Lambe, 1972.

Quan apliquem una càrrega al sistema (c) aquesta és repartida entre el fluid i el ressort, com que l'aigua és considerada, relativament, incompressible es pot considerar que la càrrega que s'emporta el ressort és pràcticament nul·la.

A continuació s'obre la vàlvula (d), aquesta deixa sortir l'aigua de manera que disminueix el volum i el ressort es va acurtant, i a la vegada comença a suportar una càrrega cada cop més important. Al final (e) s'ateny un estat en que tota la càrrega està suportada pel ressort i l'aigua recupera l'estat de tensions hidrostàtic inicial, un cop arribat a aquest estat l'aigua deixa de fluir per la vàlvula.

El procés de sortida de l'aigua per la vàlvula precisa d'un temps ja que la vàlvula ofereix certa resistència al flux, aquesta distribució gradual de la manera de repartir-se la càrrega s'anomena desfasament hidrodinàmic, s'il·lustra A la Figura 5.

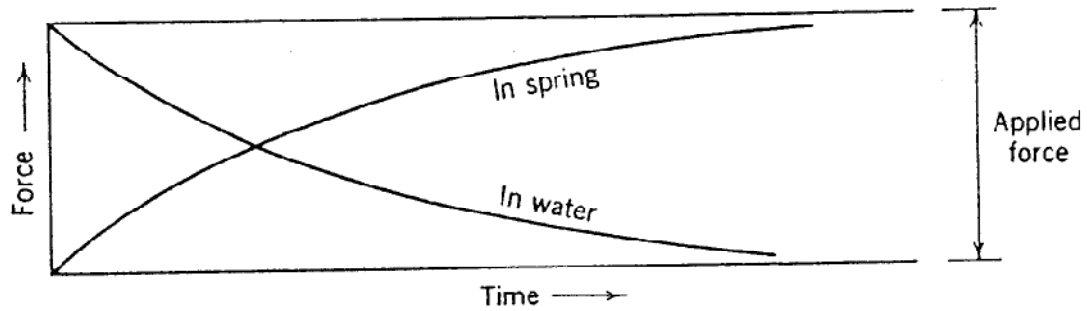


Figura 5. Repartiment de pressions en el sòl durant la consolidació. Font: Lambe, 1972.

Aquest efecte va ser descobert per Karl Terzaghi, 1920. Aquest descobriment va significar el començament de l'enginyeria de sòls moderna. Terzaghi and Fröhlich, 1936 van formular la teoria de la consolidació unidimensional per modelitzar aquest procés. Aquesta teoria es basa en la equació de la difusió (Eq. 4) on el terme difusiu C_v és aquí el coeficient de consolidació.

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{Eq. 4})$$

On:

C_v = Coeficient de consolidació ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$),

u = Sobrepressions intersticials ($\text{N m}^{-1} \text{s}^{-2}$)

z = Profunditat (m)

t = temps (s)

Adimensionalitzant les variables,

$$W = \frac{u}{\Delta\sigma}$$

$$Z = \frac{z}{H}$$

$$T = \frac{t}{\tau}$$

s'obté:

$$c_v \frac{\Delta\sigma}{H^2} \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} = \frac{\Delta\sigma}{\tau} \frac{\partial W}{\partial T}$$

Adoptant:

$$\tau = \frac{H^2}{c_v}$$

queda l'equació diferencial adimensionalitzada:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} = \frac{\partial W}{\partial T}$$

Aquesta teoria proporciona una solució analítica a l'equació diferencial (Eq. 5) a més d'existir solucions tabulades (Figura 6) per al problema diferencial adimensionalitzat.

$$W(Z,T) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4} T\right] \sin\left[\frac{(2n+1)\pi}{2} Z\right] \quad (\text{Eq. 5})$$

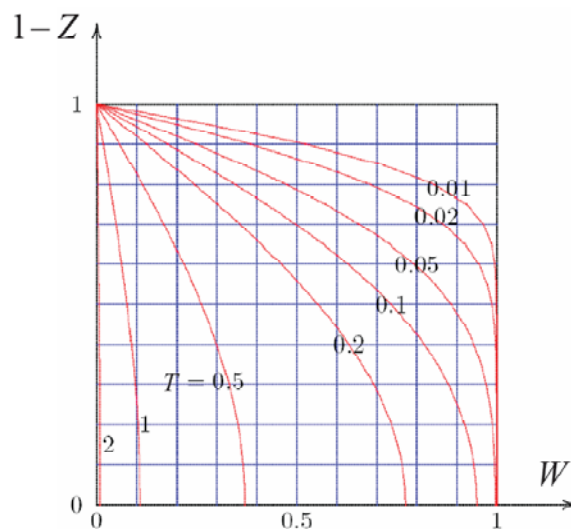


Figura 6. Solucions tabulades de l'equació diferencial. Per a T=0 (instant inicial) la pressió (W) val 1 per a tota la profunditat, en successius instants de temps posteriors (T=0,01-0,02...) la pressió es va dissipant començant pel contorn permeable (1-Z=1)

Les solucions tabulades són les d'un problema amb una condició de contorn de tipus Dirichlet=0 i l'altra de Newman=0, aquesta solució serveix per trobar-ne d'altres com la del nostre problema amb dos condicions de Dirichlet=0 donada la seva simetria.

La clau per estimar la velocitat a la que es dissipen les pressions intersticials és el coeficient de consolidació, C_v . Generalment això es realitza mitjançant un assaig edomètric en una mostra inalterada, a partir dels resultats d'aquest assaig i amb mètodes semiempírics es pot estimar el coeficient de consolidació. En el cas que ens ocupa no es realitzarà assaig edomètric ja que no es tracta d'un sòl sinó d'un fang difícil de tractar en un assaig edomètric, el valor del coeficient de consolidació es calibrarà a partir de les dades de la sonda (la sonda mesura humitat volumètrica del sòl, que mitjançant un canvi de base es pot convertir a porositat o índex de porus) de fet es poden considerar aquestes dades de la planta pilot com una sortida d'un assaig edomètric in situ.

En el subapartat *Calibratge i validació* que es troba al final del present apartat *materials i mètodes*, es fan les consideracions oportunes pel que fa a la consolidació radial.

Consolidació secundària

Poc després de la publicació de la teoria de la consolidació primària es van evidenciar diferències entre aquesta i el comportament experimental del sòl (Buisman, 1936), (Gray, 1936).

La consolidació s'ha de separar en dos fases:

1. La consolidació que es produeix durant la dissipació de les pressions intersticials (consolidació primària), que s'ha descrit en l'apartat anterior.
2. La consolidació que continua lentament després d'haver-se dissipat pràcticament les pressions intersticials (consolidació secundària). Realment han d'existir petites sobrepressions perquè l'aigua escapi del sòl, però aquesta sortida es produeix molt lentament i les sobrepressions són pràcticament inapreciables.

Com més prim sigui el sòl, més ràpidament es produeix la dissipació de sobrepressions intersticials. Si fos possible assajar una mostra infinitament prima la consolidació es donaria en dos fases separades, una consolidació instantània i una diferida. Per a mostres amb espessor finit els dos fenòmens es produeixen a la vegada durant la consolidació primària. Per a estrats de molta espessor pot ser que gran part de la consolidació que es produeix durant la dissipació de pressions sigui consolidació diferida.

La consolidació instantània i la velocitat de consolidació diferida són propietats de l'esquelet mineral del sòl. La importància relativa de la consolidació primària o secundària depèn de la velocitat de dissipació de les sobrepressions i per tant de l'espessor de la capa de sòl.

Aquesta importància relativa de la consolidació secundària també depèn del tipus de sòl, sent major en els sòls més plàstics i en els orgànics i de la relació entre tensió aplicada i existent, sent major per a un quocient petit.

La primera teoria racional que modelitza la consolidació secundària ho fa considerant l'esquelet mineral com un element viscoelàstic (Taylor, 1942). Actualment els treballs se centren en resoldre complicats models reològics mitjançant mètodes numèrics. L'existència d'aquesta consolidació diferida complica enormement el càlcul de l'evolució de la consolidació i de la magnitud final d'aquesta (Bjerrum, 1967)

Evapotranspiració: equació de Penman-Monteith

Per obtenir les equacions constitutives del model falta afegir el terme font a la teoria de la consolidació unidimensional; aquest és un dels punts més delicats del model ja que l'estimació de l'evapotranspiració sempre consta d'una part empírica, fins i tot les fórmules totalment analítiques s'han de multiplicar per un factor empíric del desenvolupament de les plantes i altres paràmetres subjectius, ja que l'evapotranspiració calculada per aquestes acostuma a ser la potencial (màxima que es pot arribar a produir).

En el cas que ens ocupa s'utilitzarà la equació de Penman-Monteith que és l'equació de referència de l'ASCE (American Society of Civil Engineers) (ASCE, EWRI, 2004). El seu objectiu és proporcionar una equació estandarditzada per a calcular els ràtios d'evapotranspiració que

es produeixen tant en agricultura com en qualsevol activitat en el terreny, enginyeria civil o ambiental.

El mètode està estandarditzat per dos tipus de vegetació de referència, una superfície d'herba de poca altura (prat) i una superfície amb plantes amb tiges de certa altura, com alfals. En el cas que ens ocupa la superfície de referència adequada és la de vegetació alta.

El mètode de Penman-Monteith estima l'evapotranspiració de referència en contraposició a la evapotranspiració potencial que habitualment estava disponible mitjançant altres mètodes. Aquesta evapotranspiració de referència es desenvolupà a la dècada dels 70 per substituir la potencial, es refereix a una superfície d'herba o d'alfals totalment desenvolupada que cobreix el terreny i amb una extensió d'almenys 100 metres, per utilitzar els resultats de la fórmula en altres tipus de vegetació o estats menys avançats de desenvolupament cal aplicar coeficients correctors.

Aquesta equació (Eq. 6) utilitza les variables temperatura, humitat relativa, radiació extraterrestre neta i velocitat del vent per als càlculs en passos de temps horaris o diaris; d'aquesta manera inclou en la modelització totes les condicions ambientals locals que influeixen en el procés.

En aquest mètode té especial importància la radiació extraterrestre neta a la superfície de les plantes ja que les condicions atmosfèriques i perturbacions meteorològiques disminueixen la quantitat total de radiació rebuda (Figura 7). En canvi altres mètodes només consideren un temps d'insolació mitjà en funció de l'època de l'any i de la latitud.

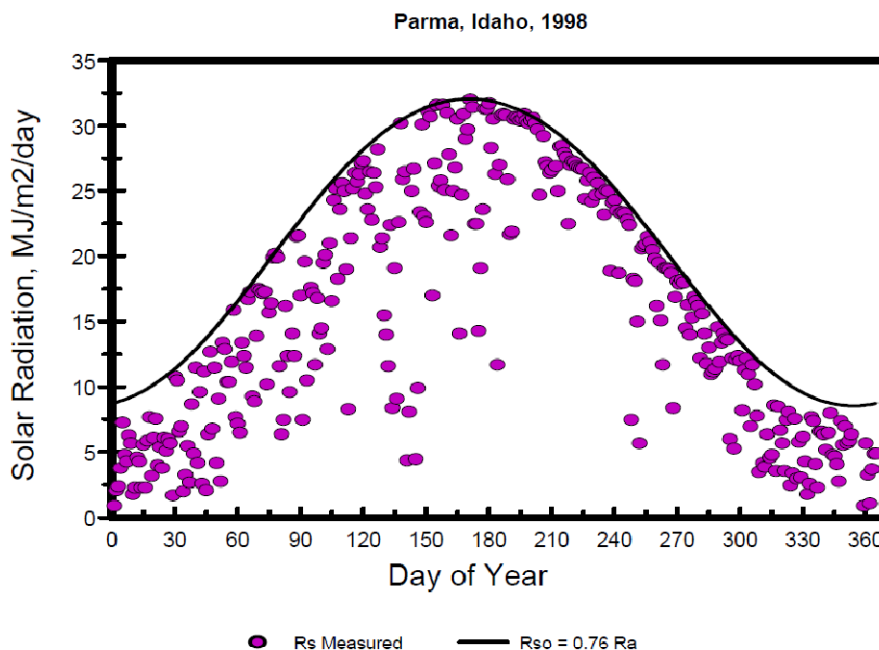


Figura 7. Radiació solar teòrica segons latitud i mesurada. Font: ASCE, EWRI, The ASCE standardized reference evapotranspiration equation.

A continuació es defineix l'equació:

$$ET_{sz} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (c_s - c_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (\text{Eq. 6})$$

on:

ET_{sz} = valor estandaritzat de l'evapotranspiració per a vegetació baixa (ETos) o alta (ETrs) (mm d⁻¹ per passos de temps diaris o mm h⁻¹ per passos de temps horaris),

R_n = Radiació neta a la superfície de les plantes (MJ m⁻² d⁻¹ per passos de temps diaris o MJ m⁻² h⁻¹ per passos de temps horaris),

G = densitat del flux de calor del sòl a la seva superfície (MJ m⁻² d⁻¹ per passos de temps diaris o MJ m⁻² h⁻¹ per passos de temps horaris),

T = Mitjanes diàries o horàries de la temperatura de l'aire a 1.5 fins 2.5 m d'altura (°C),

u_2 = Mitjana diària o horària de la velocitat del vent a 2 m d'altura (m s⁻¹),

e_s = pressió de saturació de vapor a 1.5 fins 2.5 m d'altura (kPa), calculat per als passos de temps diaris com la mitjana de la pressió de saturació de vapor a les temperatures màxima i mínima,

e_a = mitjana de la pressió de vapor actual a 1.5 fins 2.5 m d'altura (kPa),

Δ = pendent de la corba pressió de saturació de vapor - temperatura (kPa °C⁻¹),

γ = constant psicomètrica (kPa °C⁻¹),

C_n = constant numerador que canvia amb el tipus de referència i el pas de temps de càlcul (K mm s³ Mg⁻¹ d⁻¹ o K mm s³ Mg⁻¹ h⁻¹),

C_d = constant denominador que canvia amb el tipus de referència i el pas de temps de càlcul

L'ASCE proporciona els coeficients necessaris tabulats i explicita la manera de calcular les variables a partir de les dades meteorològiques disponibles.

Materials i mètodes

Adaptació de la teoria de consolidació a la deshidratació amb sistemes d'aiguamolls

La variable del model és la sobrepressió del medi que es dissipa al llarg del temps, en aquest cas és la pressió hidrostàtica causada pel pes del mateix fang. Per adaptar la teoria al nostre cas s'han imposat unes condicions de contorn de pressió nul·la als límits superior i inferior de la capa de fang (condicions de Dirichlet) ja que els dos extrems de la capa de fangs estan lliures (pressió atmosfèrica). La condició inicial correspon a una pressió hidrostàtica. En la figura següent (Figura 8) s'aprecia la solució numèrica per a successius instants de temps, per a l'instant inicial la distribució és triangular (hidroestàtica) i en els instants següents es va dissipant la pressió, més ràpidament com més pròxim estigui el contorn.

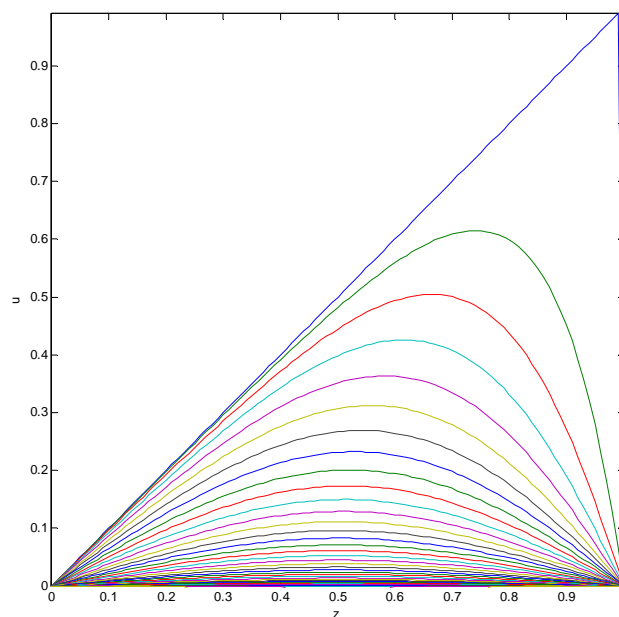


Figura 8. Solució numèrica del problema adimensional per a successius instants de temps

El nostre model té una particularitat respecte la teoria de Terzaghi i Fröhlich, i és que existeix la evapotranspiració causada per les plantes. Aquest fenomen s'inclou en l'equació diferencial en derivades parcials en forma de terme font; aquesta modificació de l'equació invalida la solució analítica i els valors tabulats de la teoria de manera que s'ha de recórrer als mètodes numèrics per resoldre-la.

Els valors que s'hauran de calibrar per ajustar el model són el coeficient de consolidació C_v [$L^2 \cdot T^{-2}$] (Eq. 7) (citada anteriorment) i el mòdul edomètric E_m [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$] (Eq. 8); el qual és la rigidesa de l'esquelet sòlid del sòl que intervé en la conversió de les dades adimensionals en el model a les unitats reals.

Generalment aquest calibratge es realitza mitjançant un assaig edomètric en una mostra inalterada, a partir dels resultats d'aquest assaig i amb mètodes semiempírics es pot estimar el coeficient de consolidació. En el cas que ens ocupa no es realitzarà assaig edomètric ja que no es tracta d'un sòl sinó d'un fang amb macròfits plantats, el valor del coeficient de consolidació es calibrarà a partir de les dades d'humitat obtingudes *in situ* a través d'una sonda.

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$E_m = \frac{1 + e_0}{a_v} \quad (\text{Eq. 8})$$

On:

e_0 índex de porus [-]

a_v coeficient de compressibilitat del sòl [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]

La resta de dades necessàries, com l'altura de capa de fang, l'índex de porus i la densitat del fang són dades de las quals disposem. La teoria descrita fins ara parla de dissipació de sobrepressions; a partir de les expressions següents (Eq. 9) es relaciona la dissipació de sobrepressions amb l'assentament produït.

$$U(T) = 1 - \frac{1}{2} \int_0^2 W(Z, T) dZ \quad (\text{Eq. 9})$$

U és el grau de consolidació adimensional; U=1 significa que s'ha dissipat tota la sobrepressió i que s'ha arribat a l'assentament total, el qual només es produiria en un temps infinit.

S_∞ és l'assentament amb U=1, multiplicant U(T)* S_∞ obtenim l'assentament real que s'ha produït (Eq. 10).

$$\begin{aligned} s_\infty &= \int_0^H \varepsilon(z, \infty) dz = \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta \sigma \cdot H \\ s_t &= \int_0^H \varepsilon(z, t) dz = \frac{a_v}{1 + e_0} \int_0^H \Delta \sigma'(z, t) dz = \\ &= \frac{a_v}{1 + e_0} \int_0^H [\Delta \sigma - u(z, t)] dz \end{aligned} \quad (\text{Eq. 10})$$

La integral de les sobrepressions en tota la profunditat del fang s'obté fàcilment donat que la distribució és hidrostàtica.

En el nostre problema és fàcil relacionar assentament amb pèrdua d'humitat, es tracta d'un senzill canvi de base, ja que coneixem l'assentament a temps infinit (S_∞), la porositat i l'espessor de la capa de fangs.

Fins aquí hem definit com adaptem la teoria de la consolidació unidimensional Terzaghi i Fröhlich al nostre model, tot seguit discutim les limitacions i consideracions pertinents.

La teoria considera un sòl saturat, per tant el model és vàlid mentre no s'atenyin graus de deshidratació molt elevats, es considera un grau de deshidratació que invalida el model aquell que suposaria un assentament molt més gran que l'assentament calculat

per a temps infinit. Per graus de deshidratació avançats (períodes de diversos anys de repòs) caldria reformular les hipòtesis; el model és vàlid per fer valoracions del temps entre alimentacions. De tota manera es considera que si les pressions negatives no són gaire elevades el model encara pot ser representatiu, aquesta consideració és útil per modelitzar l'efecte de l'evapotranspiració un cop ja no hi ha gaire percolació.

Pot ser que en la superfície del fang s'observi una crosta seca; altres models numèrics d'assecat ho tenen en compte com una capa amb permeabilitat menor. En el nostre cas la major part de l'aigua que s'elimina per percolació ho fa per la part inferior ja que les sobrepressions obeeixen una llei hidrostàtica i per tant en la superfície la sobrepressió és nul·la i es considera que l'efecte d'aquesta condició de contorn és negligible.

Es considera que l'increment d'altura de la capa de fang en cada alimentació és negligible en relació a l'altura total de la capa de fangs.

El fang fresc té un gran contingut en aigua; no existeixen terrenys naturals amb aquestes característiques per tant els valors del mòdul edomètric E_m seran inferiors als normalment utilitzats en argiles.

En apartats anteriors s'ha parlat de la mineralització que es produeix en el fang, s'ha de tenir en compte que la pèrdua de volum per mineralització de la matèria orgànica és sensiblement menor a la pèrdua de volum d'aigua, ja que el fang fresc té un gran contingut d'aigua. Per això el model només considera disminució de volum a causa de pèrdua d'aigua.

Ajust dels paràmetres del medi

Per a que el terme font representi unitats reals hem de fer un canvi de base per convertir valors d'evapotranspiració a sobrepressions. Per aquest canvi de base utilitzarem el valor S_∞ definit anteriorment en l'apartat dedicat a la consolidació, de tal manera que una evapotranspiració o precipitació igual a S_∞ equivaldria a un 100% de la sobrepressió inicial.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = \frac{\partial U}{\partial T} + Q \cdot \frac{\tau}{u_0} \quad Q = q \cdot \frac{u_0}{S_\infty} \quad (\text{Eq. 11})$$

On q és l'evapotranspiració amb signe negatiu (sortida del sistema) o precipitació amb signe positiu i u_0 la sobrepressió inicial.

Per estimar S_∞ han fet falta els valors de a_v (coeficient de compressibilitat) i e_0 (índex de porus), els valors dels quals s'explicitaran més endavant.

Un cop el model ja incorpora les condicions de contorn, el terme font, i les unitats estan ajustades a la realitat procedim a ajustar els paràmetres que falten per calibrar el model a partir de les dades d'humitat disponibles, que es comentaran més endavant.

Per tal de fer el canvi d'escala que ens permet passar de sobrepressions a humitat, necessitem estimar S_∞ (Eq. 12), recordem de l'apartat anterior:

$$S_{\infty} = \int_0^H \varepsilon(z, \infty) dz = \frac{a_v}{1+e_0} \Delta\sigma \cdot H \quad (\text{Eq. 12})$$

El mòdul edomètric (Eq. 13):

$$E_m = \frac{1+e_0}{a_v} \quad (\text{Eq. 13})$$

Per tant ens queda (Eq. 14):

$$S_{\infty} = \frac{1}{E_m} \cdot \Delta\sigma \cdot H \quad (\text{Eq. 14})$$

De la bibliografia en matèria de geotècnia s'obté que els valors de E_m estan entre $5 \cdot 10^8$ Pa per arenas i 100.000 Pa per fangs poc consolidats (Lambe et al., 1972); en el nostre cas es tracta d'un fang amb un alt contingut d'aigua, més alt que qualsevol sòl natural, per tant el valor de E_m serà encara inferior a 100.000 Pa, H en el nostre model es refereix a l'altura de la capa de fangs.

Per adimensionalitzar el valor de S_{∞} i poder fer el canvi d'escala en el model adimensional s'utilitza la següent relació (Eq. 15):

$$S_{\infty \text{ dim}} = \frac{S_{\infty}}{n_0 \cdot H} \quad (\text{Eq. 15})$$

D'aquesta manera es té una proporció de la porositat que es converteix en assentament, el valor està entre 0 i 1.

Per estimar n_0 (porositat) (Eq. 16) s'utilitzen les dades de la sonda d'humitat, com que la mesura és en humitat volumètrica i fem la suposició de saturació igual a 1, el valor d'humitat que ens dona la sonda és igual a n_0 .

Fa falta estimar e_0 (índex de porus) (Eq. 16), s'obté a partir de la porositat i viceversa amb les expressions:

$$e_0 = \frac{n_0}{1-n_0} \quad n_0 = \frac{e_0}{1+e_0} \quad (\text{Eq. 16})$$

Ara només falta definir el coeficient de consolidació C_v (Eq. 17), de la bibliografia en matèria de geotècnia obtenim un rang de valors per a argiles entre $1e^{-6}$ i $1e^{-8}$ m²/s, definim C_v com:

$$C_v = \frac{K \cdot E_m}{\gamma_w} \quad (\text{Eq. 17})$$

Es pot comprovar que C_v té una relació directa amb E_m , tenim tres variables amb dos graus de llibertat, la permeabilitat K [L·T⁻¹] és el valor que queda implícit en la relació C_v/E_m . Per a C_v s'esperaran valors del rang per argiles ($1e^{-6}$ i $1e^{-8}$ m²/s).

Mètodes numèrics: discretització de les equacions

El problema a resoldre es tracta d'una equació diferencial en derivades parcials de tipus parabòlic (Eq. 18), en la dimensió espacial tenim dos condicions de contorn i en la temporal tenim una condició inicial i l'altre extrem està obert.

Equació:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = \frac{\partial U}{\partial T} \quad (\text{Eq. 18})$$

Domini:

$$Z \in (0,1) \quad T \geq (0)$$

Condicions de Contorn:

$$U(0,T) = 0$$

$$U(1,T) = 0$$

Condicció Inicial:

$$U(Z,0) = Z$$

Es planteja la resolució del problema amb el mètode de les diferències finites; el procediment és substituir les derivades de l'equació diferencial per aproximacions numèriques.

Es disposa de tres mètodes de diferències finites per resoldre aquest tipus d'equació de manera estable (no citem els mètodes incondicionalment inestables, ja que no tenen cap utilitat pràctica)

- Mètode Explícit (FTCS)
- Mètode implícit (BTCS)
- Mètode de Crank-Nicolson

El mètode d'Euler explícit utilitza una aproximació endavant en el temps i aproximació centrada en l'espai per la segona derivada:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial t} \right|_i^n = \frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} \quad \left. \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right|_i^n = \frac{c_{i+1}^n - 2c_i^n + c_{i-1}^n}{\Delta x^2}$$

El mètode d'Euler implícit utilitza una aproximació enrere en el temps per la primera derivada i una aproximació centrada per la segona derivada:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial t} \right|_i^{n+1} = \frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} \quad \left. \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right|_i^{n+1} = \frac{c_{i+1}^{n+1} - 2c_i^{n+1} + c_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

Per últim el mètode de Crank-Nicolson fa servir nodes ficticis intermedis sobre els quals realitza una aproximació centrada, tant de la primera derivada respecte del temps, com de la segona derivada respecte la posició:

$$\frac{\partial c}{\partial t} \Big|_i^{n+\frac{1}{2}} = \frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} \quad \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \Big|_i^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \frac{c_{i+1}^n - 2c_i^n + c_{i-1}^n}{\Delta z^2} + \frac{1}{2} \frac{c_{i+1}^{n+1} - 2c_i^{n+1} + c_{i-1}^{n+1}}{\Delta z^2}$$

Cada mètode té uns avantatges i inconvenients que el fan més apropiat per un determinat tipus de problemes o parts del domini:

Mètode explícit (FTCS)

- Endavant en el temps ☹ Centrat en l'espai ☺
- Condicionalment estable (per a $r \leq \frac{1}{2}$) ☹
- Velocitat numèrica de transmissió d'informació finita ☹
- Ordre 1 en el temps i 2 en l'espai ☹
- Obtenció de la solució de manera explícita en cada pas ☺

El principal avantatge del mètode és el fet de ser explícit, això permet obtenir la solució per a cada node sense plantejar cap sistema d'equacions, l'inconvenient de la velocitat finita de transmissió numèrica d'informació és poc important ja que a la realitat la quantitat d'informació que es transmet a velocitat infinita és molt petita. El principal inconvenient és que no podem agafar passos de temps grans a causa de la restricció de l'estabilitat.

Mètode implícit (BTCS)

- Enrere en el temps ☹ Centrat en l'espai ☺
- Incondicionalment estable ☺
- Velocitat numèrica de transmissió d'informació infinita ☺
- Ordre 1 en el temps i 2 en l'espai ☹
- Necessitat de resoldre sistema d'equacions per a cada pas ☹

El principal avantatge és que en tractar-se d'un mètode implícit és incondicionalment estable i podem agafar passos de temps grans per arribar a parts del domini allunyades de la condició inicial, l'inconvenient principal és la necessitat de resoldre un sistema d'equacions per a cada pas de temps.

Mètode de Crank-Nicolson

- Centrat en el temps ☺ Centrat en l'espai ☺
- Incondicionalment estable ☺
- Velocitat numèrica de transmissió d'informació infinita ☺
- Ordre 2 en el temps i en l'espai ☺
- Necessitat de resoldre sistema d'equacions per a cada pas ☹

El principal avantatge és la estabilitat incondicional com en el mètode implícit, a més aquest mètode proporciona més exactitud ja que és d'ordre dos tant en l'espai com en el temps. El principal inconvenient és el major requeriment computacional.

Plantegem cada mètode:

El mètode de diferències finites es pot escriure de la següent manera compacta:

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{U}}^{n+1} = \underline{\underline{B}} \cdot \underline{\underline{U}}^n + \underline{\underline{F}}$$

on les matrius que apareixen tenen la següent estructura general:

$$A = \begin{pmatrix} 1+2\theta \cdot r & -\theta \cdot r & & & \\ -\theta \cdot r & 1+2\theta \cdot r & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & & -\theta \cdot r \\ & & & -\theta \cdot r & 1+2\theta \cdot r \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1-2(1-\theta)r & (1-\theta)r & & & \\ (1-\theta)r & 1-2(1-\theta)r & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & & (1-\theta)r \\ & & & (1-\theta)r & 1-2(1-\theta)r \end{pmatrix}$$

i el vector F:

$$F = \begin{pmatrix} r \cdot \theta \cdot g^{n+1} + r \cdot (1-\theta) \cdot g \\ 0 \\ \vdots \\ r \cdot \theta \cdot h^{n+1} + r \cdot (1-\theta) \cdot h \end{pmatrix}$$

Recordem que les condicions de contorn imposades mitjançant el vector F són de Dirichlet.

| | |
|-----------------------|----------------|
| Mètode explícit | $\theta = 0$ |
| Mètode implícit | $\theta = 1$ |
| Mètode Crank-Nicolson | $\theta = 0.5$ |

Elecció del mètode:

Del tres mètodes explicats es decideix utilitzar el mètode implícit per ser incondicionalment estable; s'ha descartat l'explícit per la seva estabilitat condicionada a les dimensions dels passos temporals i Crank-Nicolson pel seu major requeriment computacional. No interessa que el problema sigui condicionalment estable ja que en el cas de fer simulacions per a temps llargs (període de repòs) els passos de temps petits comportarien un major cost computacional.

Les matrius i el vector F queden:

$$A = \begin{pmatrix} 1+2r & -r & & & \\ -r & 1+2r & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & & -r \\ & & & -r & 1+2r \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & & & \\ 0 & 0 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & & 0 \\ & & & 0 & 1 \end{pmatrix} = I \quad F = \begin{pmatrix} r \cdot g^{n+1} \\ 0 \\ \vdots \\ r \cdot h^{n+1} \end{pmatrix}$$

Com que les condicions de contorn de Dirichlet són sobrepressió zero el vector F queda:

$$F = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Amb la matriu B igual a la identitat la notació compacta queda:

$$\underline{A} \underline{U}^{n+1} = \underline{U}^n + \underline{F}$$

Sortida numèrica de la implementació

Fins aquí s'ha definit l'esquema numèric discret que aproxima el problema en diferències finites, a continuació s'implementa aquest esquema per tal d'executar-lo numèricament amb un ordinador.

S'implementa el model de diferències finites utilitzant les aproximacions numèriques que substitueixen les derivades parcials, utilitzem el programari Matlab per portar a terme les simulacions.

En primer lloc es defineix la malla que discretitza el domini, a i b són els extrems del domini en la dimensió espacial, com que es treballa amb un problema adimensionalitzat el seu suport és de 0 a 1, m és el número de divisions de la dimensió espacial, en un primer moment es crea una malla amb 10 particions, es calcula l'increment espacial en cada partició i es crea un vector x que serà la malla en la dimensió temporal.

```
a=0;
b=1;
m=10
Ax=(b-a)/m;
x=[a:Ax:b];
```

Es fa el mateix per la dimensió temporal, elegim arbitràriament un temps final tfin=1.

```
tfin = 1
npast=10
At=tfin/npast;
t=[0:At:npast*At];
```

Un cop creada la malla definim les condicions de contorn, g i h són les condicions de contorn de Dirichlet, f és la condició inicial, de moment agafem una f=1, més endavant se li donarà el valor que li pertoca.

```
f=1;
g=0;
h=0;
```

Ara el problema ja està definit, tot seguit es resol l'equació diferencial discretitzada mitjançant un esquema implícit de diferències finites, en cada pas de temps es resol el sistema d'equacions, com que la matriu A és simètrica definida positiva es pot descompondre en triangular superior i triangular inferior reduint així el requeriment computacional en la resolució del sistema.

```

% definició i descomposició de la matriu A
unos = ones(m-1,1);
A = spdiags([-r*unos (1+2*r)*unos -r*unos], -1:1, m-1, m-1);
[LA,UA]=lu(A);

%condicions inicials i de contorn en la matriu solució
%(cada pas de temps s'emmagatzema en una columna)
U = zeros(m+1,npast+1);
U(:,1) = f;
U(1,:) = g;
U(m+1,:) = h;

%bucle pels passos de temps
for n = 1:npast
    t = U(2:m,n);
    t(1) = t(1) + r*g(n+1);
    t(m-1) = t(m-1) + r*h(n+1);
    U(2:m,n+1) = UA\LA\t;
end
    
```

El resultat és el que es mostra tot seguit (Figura 9), les sobrepressions es dissipen per la presència de les condicions de contorn amb pressió nul·la. Per a un temps adimensional de 0,5 pràcticament s'ha dissipat tota la sobrepressió.

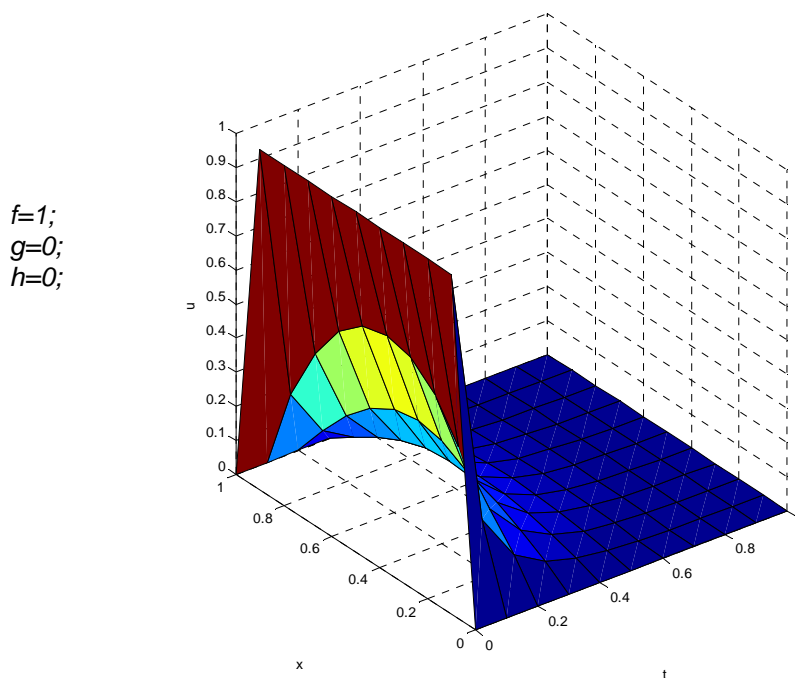


Figura 9. Resultat numèric de l'equació amb condició inicial uniforme per a un domini entre 0 i 1 en la dimensió temporal i espacial.

A continuació adaptem les condicions de contorn al problema de la deshidratació de fangs en aiguamolls (Figura 10), la hipòtesi adoptada és que les sobrepressions intersticials són causades pel propi pes del fang, per tant es tracta d'una distribució lineal de pressions hidrostàtiques. Es diferencia de la figura anterior la distribució de sobrepressions.

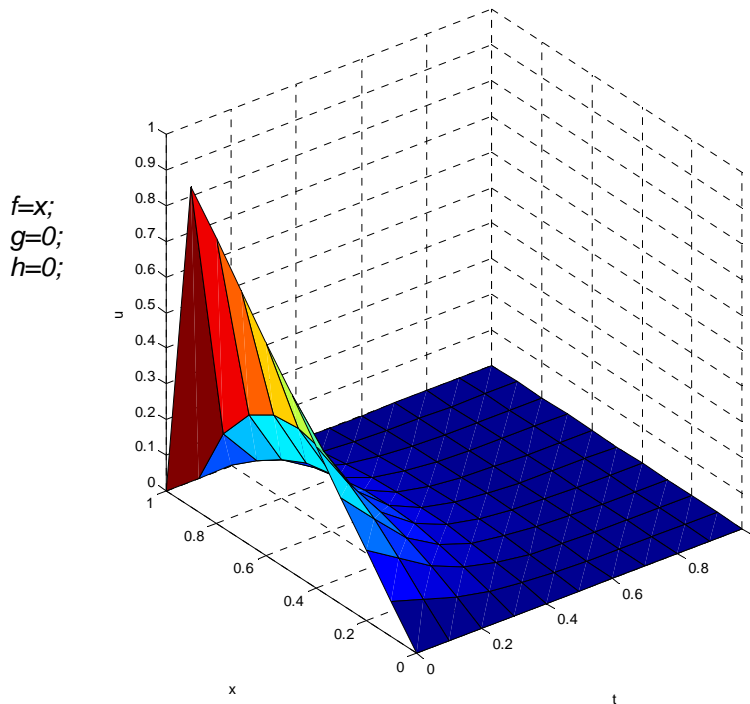


Figura 10. Resultat numèric amb condició inicial hidrostàtica.

Un cop definides les condicions inicials i de contorn del problema afegim el terme font a l'equació de la difusió, hem utilitzat un valor igual a la unitat en el terme font de l'equació adimensionalitzada, aquest terme font es refereix a sobrepressions, més endavant s'explicarà com passar de sobrepressions a humitat i a la inversa.

S'observa en la (Figura 11) que a diferència de l'anterior s'atenyen sobrepressions negatives a causa de l'efecte del terme font.

```

% definició i descomposició de la matriu A
unos = ones(m-1,1);
A = spdiags([-r*unos (1+2*r)*unos -r*unos], -1:1, m-1, m-1);
[LA,UA]=lu(A);

%condicions inicials i de contorn en la matriu solució
%(cada pas de temps s'emmagatzema en una columna)
U = zeros(m+1,npast+1);
U(:,1) = f;
U(1,:) = g;
U(m+1,:) = h;

%bucle pels passos de temps
for n = 1:npast
    t = U(2:m,n);
    t(1) = t(1) + r*g(n+1);

```

```

t(m-1) = t(m-1) + r*h(n+1);
U(2:m,n+1) = UA\ (LA\t)-1 *At; %(inclusió del terme font)
end
    
```

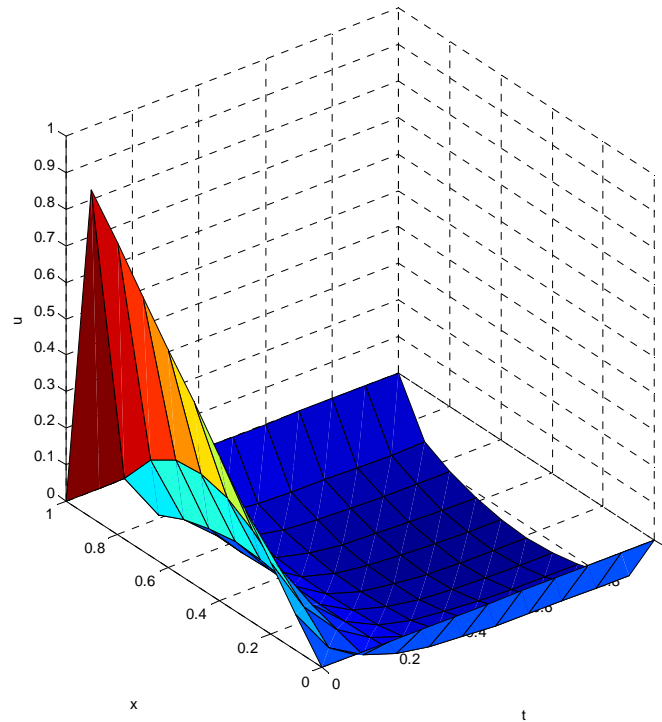


Figura 11. Resultat numèric amb condició inicial hidrostàtica i terme font.

Un cop definida numèricament l'equació constitutiva i les seves condicions de contorn augmentarem la definició de la malla a 20 divisions en la dimensió espacial i 40 en la temporal per obtenir resultats més acurats (Figura 12).

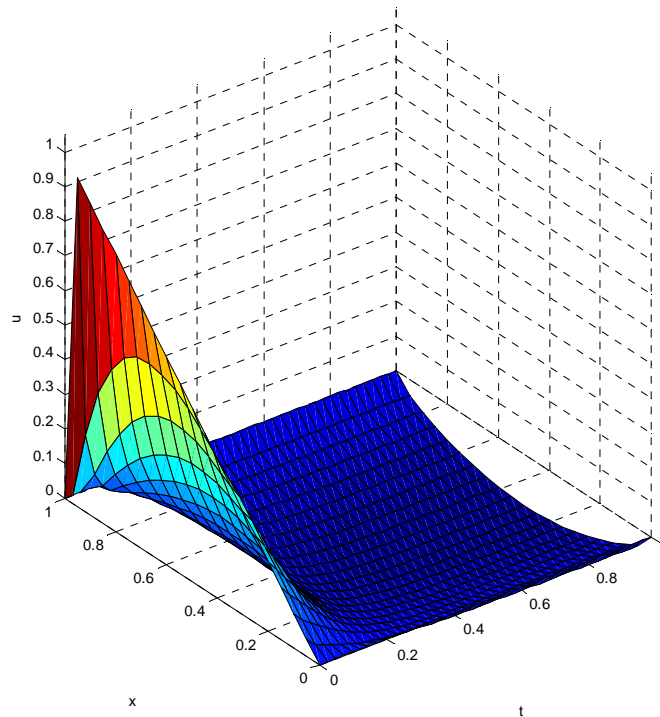


Figura 12. Resultat numèric amb la malla refinada.

A continuació realitzem una simulació en una part del domini espai-temporal representativa (Figura 13), mantenim el rang [0,1] en la dimensió temporal que equival a H a la realitat ja que volem estudiar tota la capa de fang, però ara ajustem la simulació en la dimensió temporal de tal manera que sigui equivalent a un període de 7 dies a la realitat. Elegim un $C_v=1e^{-8}$ (valor típic bibliografia) i $H=0,25$ (valor habitual meitat vida d'aiguamoll) i ens queda que 7 dies adimensionalitzats són 0,1 unitats temporals en el model.

$$\begin{aligned} \tau &= H^2/C_v; \\ T &= t_{real}/\tau \end{aligned}$$

$$q = (1/1000 * \tau / \sin f) / 86400$$

(s'ha utilitzat un valor per la EVT de 1mm/dia, el 1000 transforma els mm a m i el 86400 els dies a segons)

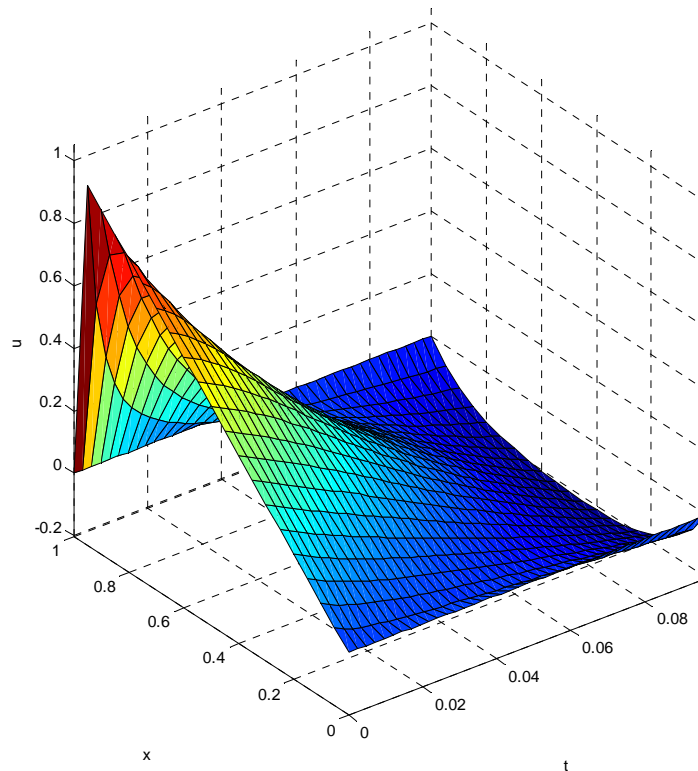


Figura 13. Resultat numèric equivalent a un temps real de 7 dies.

Com a terme font s'utilitza l'evapotranspiració de referència minorada per un factor 0,5 ja que es considera que les arrels no només exerceixen succió en la capa de fang sinó que també actuen en les capes granulars de drenatge inferiors en una proporció aproximada del 50%.

Fins al moment hem definit l'equació constitutiva i hem ajustat el terme font amb les transformacions adequades. Ara el que ens interessa és modelitzar l'evolució de la deshidratació en el temps, en primer lloc representem l'evolució de les sobrepressions en el temps calculant la mitjana en tota la profunditat:

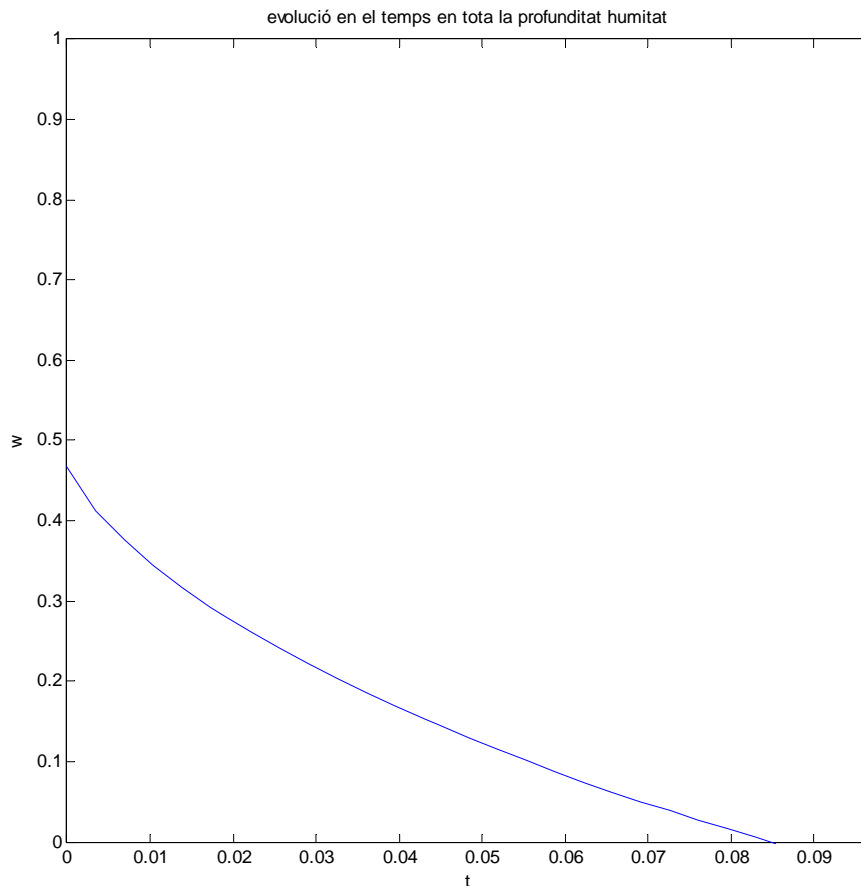


Figura 14. Evolució en el temps de les sobrepressions en mitjana espacial.

S'observa en la (Figura 14) que les sobrepressions van disminuint segons una corba similar a una exponencial negativa (solució analítica de l'equació de la consolidació), en el nostre cas sabem que no tendeix a una asíptota ja que existeix el terme font que segueix disminuint la pressió indefinidament.

Les dades de què disposem corresponen a les lectures d'una sonda d'humitat que està situada a una profunditat determinada; per tant les dades de tota la profunditat no ens serveixen per calibrar ni validar el model. Tot seguit representem l'evolució de les sobrepressions en una profunditat donada (mitjana del tram entre el 30% i 50% de la profunditat), que correspon a la profunditat on està situada la sonda a la planta pilot, Figura 15 gràfic de l'esquerra. També fem el canvi d'escala per obtenir valors d'humitats volumètriques com les dades de la sonda, Figura 15, gràfic de la dreta.

$$v = (\text{Sin}f/n0/H) * u / \text{mean}(u(0.3*m:0.5*m, 1)) + (1 - \text{Sin}f/n0/H); \text{ (implementació del canvi de base)}$$

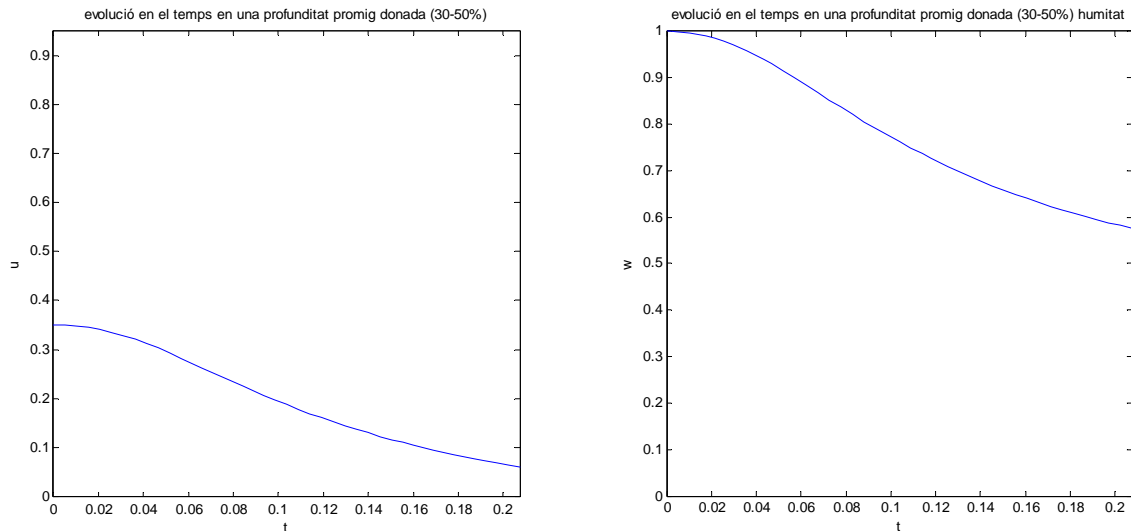


Figura 15. Mitjana de sobrepressions (esquerra) i humitat (dreta) en el rang 30%-50% de l'altura per a un període de temps adimensional de 0,2.

La figura anterior fa referència a humitats adimensionals, és a dir el valor 1 és la humitat inicial (en l'instant posterior a l'alimentació de fang fresc) per tant per obtenir el model amb valors reals s'han de multiplicar els valors adimensionals per w_0 (humitat inicial).

En l'apartat de resultats totes les sortides numèriques del model ja es donen corregides amb el valor de la humitat inicial per poder-les correlacionar directament amb les dades empíriques.

Obtenció de dades

Descripció de la planta pilot

L'experiment té lloc a l'aire lliure en el Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya.

La planta pilot (Figura 16), que va començar a ser operada l'hivern de 2009 consisteix de tres contenidors de PVC amb una superfície d'1 m² cadascun i una alçada d'1 m. Durant els tres primers mesos els llits van ser alimentats amb aigua residual per afavorir el creixement de les plantes. A partir dels tres primers mesos, des del maig de 2009 fins el març de 2011 els llits s'alimenten amb fangs decantats de la EDAR del municipi de Vilanova del Vallès, Barcelona, aquesta alimentació s'efectua de manera manual una vegada al mes.

El cabal de fang és de 0,025 m³/mes per a cada llit de macròfits, corresponent aproximadament a 40 kgST/m²·any

Hi ha tres configuracions diferents per als llits de macròfits utilitzats en aquest estudi:

- El llit A està plantat amb canyís comú (*Phragmites australis*). El filtre està constituït de la següent manera començant des de baix: 10 centímetres de pedres ($d_{50}=250$ mm), 30 centímetres de grava ($d_{50}=5$ mm) i 10 centímetres d'arena ($d_{50}=1$ mm).

- El llit B està plantat amb espadanyes (*Typha sp.*). El filtre està constituït, des de baix, per 20 cm restos de poda i 10 cm de sorra ($d_{50}=1$ mm).
- El llit C està plantat amb espadanyes (*Typha sp.*). El filtre és idèntic al del llit 1.
- El llit D està plantat amb espadanyes (*Typhas p.*). El filtre és idèntic al del llit 1 però el llit està cobert per un hivernacle durant els mesos hivernals.

Al fons de cada llit, tres tubs de PVC perforats permeten la percolació dels lixiviats i l'airjeació de l'interior del medi filtrant.



Figura 16. Planta pilot, s'observen els quatre llits amb els macròfits en diferents estats de desenvolupament, també s'observa el sistema de drenatge al fons de l'aiguamoll

Dades sondes d'humitat

A continuació es descriurà el procediment que s'ha seguit per obtenir dades experimentals de les plantes pilot, el tipus de sonda utilitzat, el seu funcionament i les particularitats de les dades obtingudes amb la intenció de poder correlacionar-les amb el model.

Les dades s'han obtingut mitjançant una sonda (Figura 17) enterrada en la capa de fang, a continuació es fa una descripció de les característiques de la sonda.

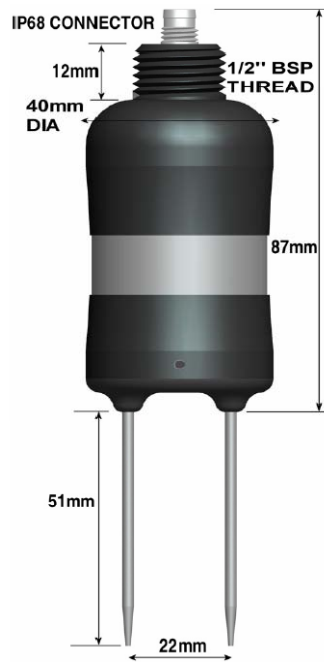


Figura 17. Esquema de la sonda d'humitat.

La sonda model SM200 mesura la composició del sòl a una localització determinada, utilitzant com a mostra aproximadament 0,5 litres de sòl (o qualsevol altre medi). Consisteix en un dispositiu amb un cos de plàstic de 40 mm de diàmetre dotat de dues barres metàl·liques. La sonda està connectada a un cable resistent a la intempèrie per enregistrar les mesures.

Per prendre mesures les barres metàl·liques han d'estar inserides directament en el sòl.

La sortida és un senyal analògic en voltatge continu. Aquesta sortida pot convertir-se per conèixer la composició de les fases del sòl utilitzant les dades generals de sòls o calibrant-lo per un tipus específic de sòl.

Resum de les característiques tècniques:

- +/- 3% en la fiabilitat de les dades
- Baixa sensibilitat a la salinitat
- Baixa sensibilitat a la temperatura
- Baixa interferència en el medi
- Connector IP68
- Soterrable, resistent a la intempèrie

Funcionament:

Es tracta d'un sensor que se situa enterrat en el sòl o en el fang que es pretén mesurar, les dues barres metàl·liques en forma de punxes són les que efectuen la mesura.

El seu funcionament consisteix en aplicar una tensió elèctrica de freqüència 100MHz (similar a la ràdio FM) a les barres metàl·liques, aquesta tensió es transmet al sòl en forma d'ona electromagnètica (Figura 18):



Figura 18. Ona electromagnètica de 100MHz.

L'aigua continguda en el sòl controla la permitivitat d'aquest, que és una resposta de la polarització d'un material en un camp electromagnètic, l'aigua té una permitivitat de 81, la matèria seca del sòl de 4 i l'aire d'1 aproximadament.

La permitivitat del sòl té una forta influència en l'ona electromagnètica aplicada (Figura 19), aquesta influència en el sensor es pot llegir com un voltatge que es pot transformar per conèixer la proporció de sòl que correspon a humitat.

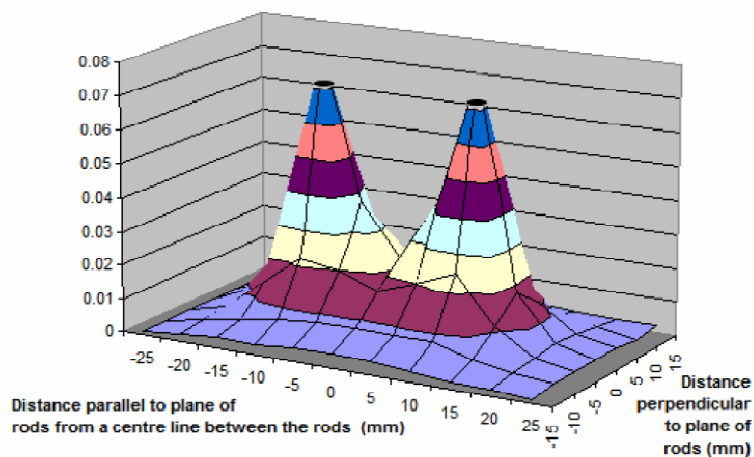


Figura 19. Influència del sòl que envolta les barres metàl·liques.

El sensor està connectat a un data logger que enregistra les dades en intervals prefixats de temps (ex. 1 hora), el data logger s'alimenta per mitjà d'una bateria, només s'aplica tensió elèctrica a la sonda en els moments de la mesura, ja que en cas contrari la bateria s'esgota amb poc temps, com que la lectura òptima s'aconsegueix aproximadament al cap d'un segon d'aplicar la tensió elèctrica el data logger activa l'alimentació automàticament amb aquesta antelació.

La lectura que ens dóna el model és en humitat volumètrica (Eq. 19), això és la proporció d'aigua que hi ha en el sòl, com que adoptem la hipòtesi de saturació=1 podem assumir que la porositat del fang és igual al valor de la humitat volumètrica.

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_s} \tag{Eq. 19}$$

On:

θ_v és la humitat volumètrica del sòl

V_w és el volum d'aigua contingut en la mostra

V_s és el volum total de sòl de la mostra

Aplicació a la planta pilot

Els períodes de dades disponibles de les sondes d'humitat per a cada llit són les següents (Taula 2):

| Llit | Medi drenant | Macròfit plantat | Període dades |
|------|----------------|-----------------------------|----------------------|
| A | Grava | <i>Phragmites australis</i> | abril-juliol 2010 |
| B | Restes de poda | <i>Typha</i> | abril -desembre 2010 |
| C | Grava | <i>Typha</i> | abril -desembre 2010 |
| D | Grava | <i>Typha</i> | abril -desembre 2010 |

Taula 2. Períodes de dades de les sondes

S'ha considerat la profunditat de la sonda dins de la capa de fang per calibrar el model en cada cas ja que es disposa de dades (Taula 3) de la seva profunditat i l'increment de profunditat del fang en cada alimentació(Figura 20).

| Alimentació | Altura total fang en mm | | | |
|-------------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | Llit A | Llit B | Llit C | Llit D |
| 06/04/2010 | | | | |
| 12/04/2010 | 28.0 | 27.5 | 27.5 | 25.5 |
| 19/04/2010 | 28.0 | 27.0 | 25.5 | 25.5 |
| 26/04/2010 | 27.0 | 26.0 | 25.0 | 25.0 |
| 17/05/2010 | 25.0 | 25.0 | 23.0 | 21.5 |
| 26/05/2010 | 21.5 | 19.5 | 20.5 | 20.5 |
| 31/05/2010 | 21.0 | 19.0 | 21.0 | 21.0 |
| 07/06/2010 | 19.0 | 19.0 | 19.0 | 21.0 |
| 14/06/2010 | 19.0 | 21.0 | 19.0 | 23.0 |
| 18/06/2010 | 19.0 | 21.0 | 19.0 | 21.0 |
| 26/06/2010 | 17.0 | 20.0 | 20.0 | 21.0 |

| | | | | | |
|------------|-------------|------|------|------|------|
| 12/07/2010 | | 18.0 | 19.0 | 19.0 | 19.0 |
| 19/07/2010 | | 17.0 | 19.0 | 19.0 | 21.0 |
| 13/09/2010 | | 21.0 | 23.0 | 24.5 | 24.5 |
| 20/09/2010 | | 23.0 | 24.5 | 28.0 | 28.0 |
| 15/11/2010 | | 21.0 | 21.0 | 22.0 | 23.5 |
| 22/11/2010 | | 23.0 | 23.5 | 24.5 | 28.0 |
| 25/11/2010 | | 23.0 | 23.0 | 23.5 | 25.5 |
| 09/12/2010 | | 23.0 | 23.0 | 28.0 | 28.0 |
| 13/12/2010 | només A y B | 26.0 | 26.0 | 28.0 | 29.5 |
| 20/12/2010 | només A y B | 26.0 | 26.0 | 28.0 | 28.5 |
| 10/12/2010 | | 26.5 | 26.5 | 28.0 | 28.5 |
| 17/01/2011 | només A y B | 26.5 | 26.5 | 28.0 | 28.5 |
| 24/01/2011 | | 28.0 | 28.0 | 29.5 | 29.5 |
| 31/01/2011 | | 29.5 | 29.5 | 31.5 | 31.5 |
| 07/02/2011 | | 28.5 | 29.0 | 31.0 | 31.0 |

Taula 3. Dades espessor capa de fangs.

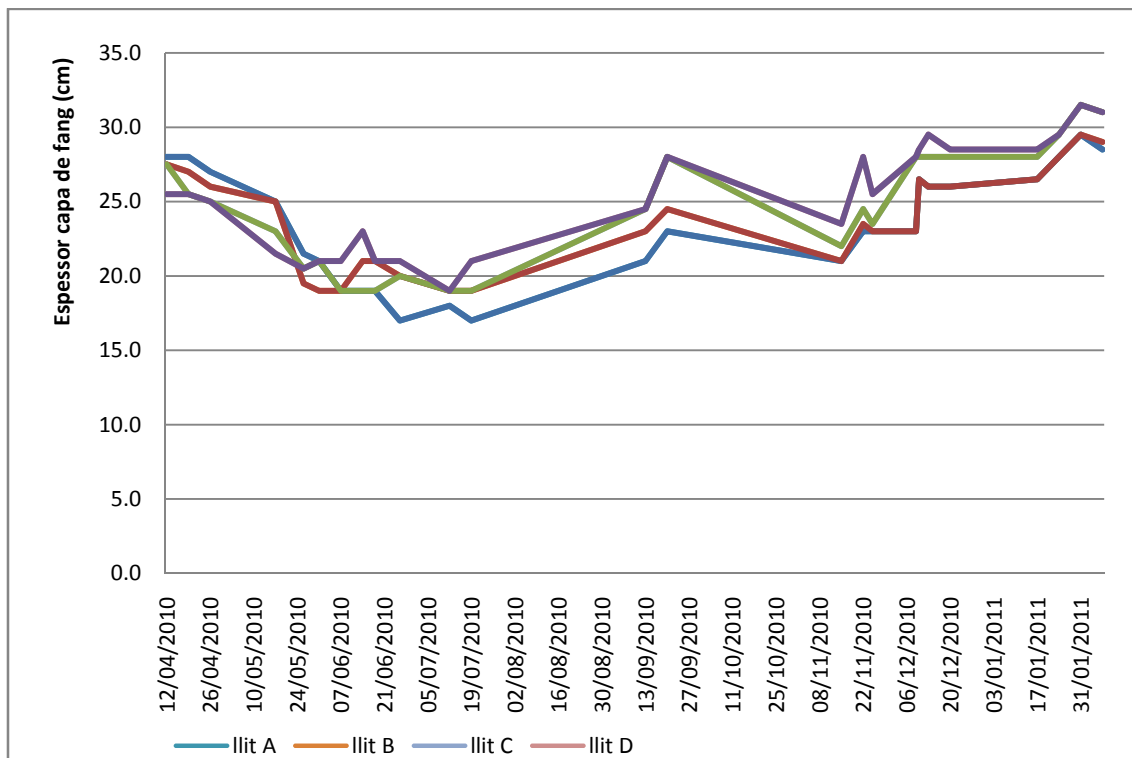


Figura 20. Espessor capa de fangs.

S'observa en les dades una oscil·lació en el contingut d'humitat del fang del dia a la nit, aquestes oscil·lacions de les lectures són degudes a que els vegetals evapotranspiren durant el dia i no per la nit.

En la figura següent (Figura 21) es mostres les oscil·lacions diàries d'humitat en els llits A (roig) i C (blau) en un període de maig de 2010. S'observa que el màxim d'humitat es dona al voltant de les 12 del migdia i el mínim es dona al voltant de les 12 de la nit.

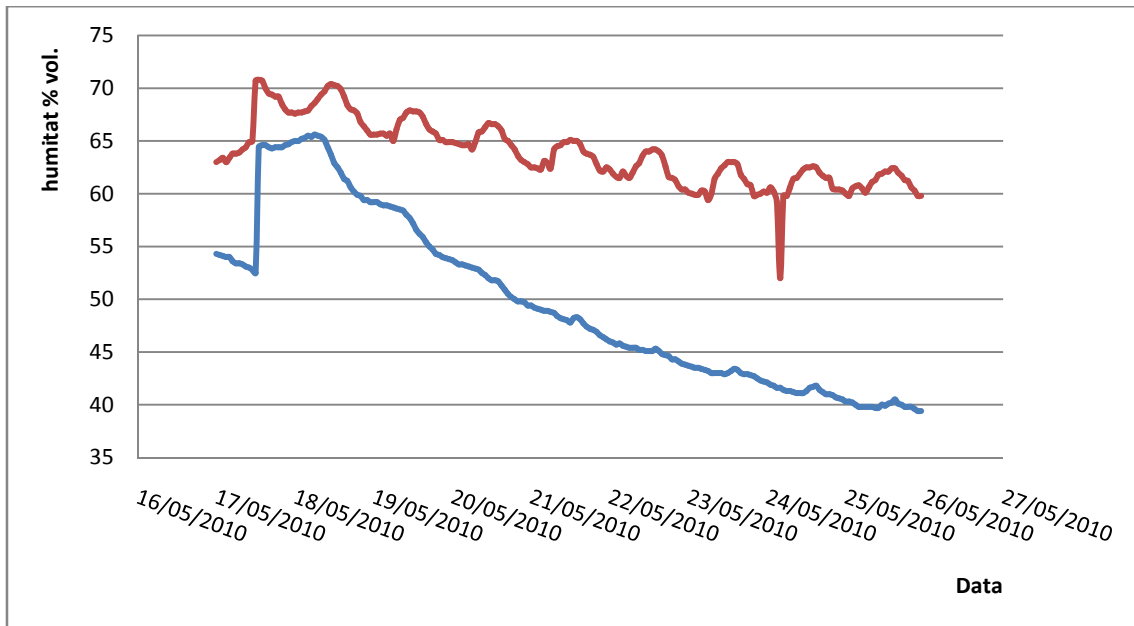


Figura 21. Oscil·lacions diàries en les lectures de les sondes.

En la figura següent (Figura 22) s’observa el mateix període que en l’anterior, però calculant les mitjanes diàries, es pot apreciar la tendència del contingut d’humitat sense les interferències dels cicles dia-nit. El canvi de pendent inicial és a causa dels valors abans de l’alimentació que fan baixar la mitjana diària de les sis hores següents a l’alimentació, és un problema numèric, el fet important és que es constata que la corba segueix una tendència no aleatòria.

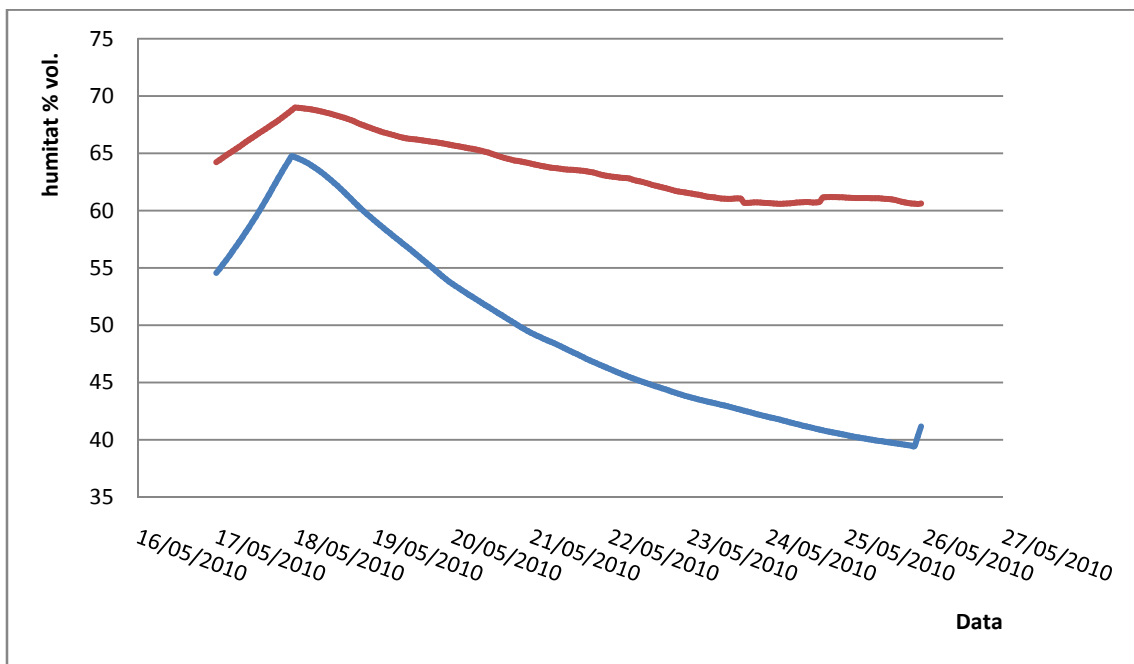


Figura 22. Mitjanes diàries de les dades.

Aquesta variació no pot ser simulada pel model ja que les equacions constitutives d'aquest no tenen en compte els factors que causen aquesta oscil·lació, tot i que el model no té en consideració l'evolució d'aquests efectes durant un dia, les dades d'evapotranspiració calculades en passos de temps diaris sí que els porten implícites.

L'objectiu del model és predir la deshidratació que es produeix entre alimentacions, el període entre alimentacions fluctua entre pocs dies i algunes setmanes, per tant les oscil·lacions d'humitat horàries no afecten la predicció objecte d'estudi.

A la figura següent (Figura 23) s'observen les oscil·lacions (línia blava) i la tendència general amb mitjanes diàries (línia roja) en el llit A en un període de l'abril de 2010.

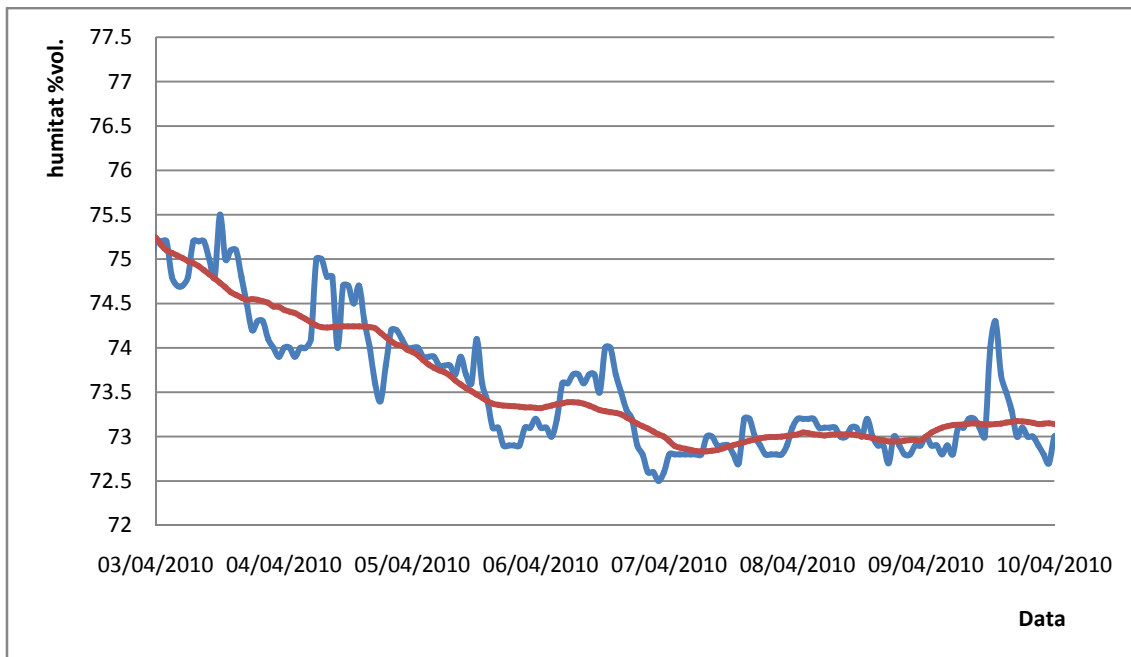


Figura 23. Oscil·lacions diàries i mitjana.

Dades meteorològiques

Les variables meteorològiques necessàries per la determinació de l'evapotranspiració estan disponibles en el web del SMC (Servei Meteorològic de Catalunya) les dades són enregistrades per les estacions automàtiques (XEMA) i presentades en la web per a passos de temps diaris, per a obtenir els passos de temps més detallats s'ha contactat amb la institució.

S'han utilitzat les dades de les estacions: Barcelona- Zona Universitària, La Seu d'Urgell i Ribarroja d'Ebre, aquesta tria intenta atènyer la diversitat climàtica del territori de Catalunya, amb dos plantes que s'aproximen al mínim i al màxim d'evapotranspiració, i a la vegada ser representativa per gran part de la població amb una estació a la zona metropolitana.

Barcelona- Zona Universitària (Figura 24):

| | |
|-------------------------------|--|
| Codi: | X8 |
| Municipi: | Barcelona |
| Comarca: | Barcelonès |
| X UTM (m): | 425294 |
| Y UTM (m): | 4581440 |
| Altitud (m): | 79 |
| Variables: | Velocitat del vent a 10 m (m/s) Direcció del vent a 10 m (graus) Temperatura (°C) Humitat relativa (%) Pressió atmosfèrica (hPa) Precipitació (mm) Irradiància solar global (W/m2) |
| Data inici: | 17/04/2008 |
| Data baixa: | - |
| Tipus dada de període: | Semi-horària |



Figura 24. Barcelona- Zona Universitària

La Seu d'Urgell (Figura 25):

| | |
|-------------------------------|--|
| Codi: | CD |
| Municipi: | La Seu d'Urgell |
| Comarca: | Alt Urgell |
| X UTM (m): | 371054 |
| Y UTM (m): | 4692343 |
| Altitud (m): | 849 |
| Variables: | Velocitat del vent a 10 m (m/s) Direcció del vent a 10 m (graus) Temperatura (°C) Humitat relativa (%) Pressió atmosfèrica (hPa) Precipitació (mm) Irradiància solar global (W/m2) |
| Data inici: | 16/01/1996 |
| Data baixa: | - |
| Tipus dada de període: | Semi-horària |



Figura 25. La Seu d'urgell.

Riba-roja d'Ebre (Figura 26):

| | |
|-------------------------------|---|
| Codi: | VC |
| Municipi: | Riba-roja d'Ebre |
| Comarca: | Ribera d'Ebre |
| X UTM (m): | 284966 |
| Y UTM (m): | 4569234 |
| Altitud (m): | 69 |
| Variables: | Velocitat del vent a 2 m (m/s) Direcció del vent a 2 m (graus) Temperatura (°C) Humitat relativa (%) Pressió atmosfèrica (hPa) Precipitació (mm) Irradiància solar global (W/m ²) |
| Data inici: | 18/11/1996 |
| Data baixa: | - |
| Tipus dada de període: | horària |



Figura 26. Riba-roja d'Ebre.

Les variables meteorològiques s'utilitzen en el càlcul del terme font (evapotranspiració i precipitació).

Per al càlcul de l'evapotranspiració s'utilitza el mètode de Penman-Montheit que es detalla en l'apartat de revisió bibliogràfica; cal fer una puntualització sobre el mètode:

En el nostre model s'ha realitzat una simplificació de la fórmula, el valor de G (densitat del flux de calor del sòl a la seva superfície) s'ha agafat igual a zero, aquest valor modelitza el flux de calor que el sòl emmagatzema entre diferents estacions de l'any, de manera que durant la primavera el valor de G és positiu i durant la tardor negatiu.

Segons la bibliografia consultada ((ASCE, EWRI, 2004) el valor de G és petit comparat amb les imprecisions de la mesura instrumental de la radiació neta incident, a més el nostre model no està pensat per realitzar simulacions tan llargues que atenyin diferents estacions de l'any, per això es considera que la simplificació és raonable.

Calibratge i validació

Un cop definits tots aquests paràmetres i el model correctament implementat es pot començar a calibrar amb dades reals de les sondes d'humitat, només cal escollir el període a comparar i realitzar simulacions amb diferents valors de E_m i C_v , el valor de E_m influeix en els valors que ateny la simulació per a temps llargs ja que és el paràmetre que defineix l'assentament a temps infinit, C_v influeix en la velocitat a la que es dissipen les sobrepressions, per tant en el pendent de la corba humitat-temps.

Els paràmetres a calibrar són C_v que governa la velocitat a què es dissipen les sobrepressions, i E_m que governa l'assentament final a què s'arribaria en un temps infinit i sense terme font.

Cal aclarir que E_m i C_v no són independents, tenen la següent relació (Eq. 20):

$$C_v = \frac{K \cdot E_m}{\gamma_w} \quad (\text{Eq. 20})$$

Durant el calibratge s'introdueixen com paràmetres independents per simplificar el procés, de manera que s'assumeix que K (permeabilitat, m/s) és una variable resultant de el calibratge tot i que no apareix explícitament en el model.

En apartats introductoris s'han citat les esquerdes que es produeixen en el fang a causa del moviment de les plantes induït pel vent. Aquestes esquerdes influeixen en el procés de deshidratació ja que proporcionen camins preferencials per on l'aigua pot drenar amb més facilitat (Figura 27). La teoria de la consolidació unidimensional només considera el flux en la dimensió espacial vertical, per tal d'adaptar el model unidimensional a una situació amb flux radial es manté tot l'esquema matemàtic modificant el paràmetre adimensional $U(T)$.

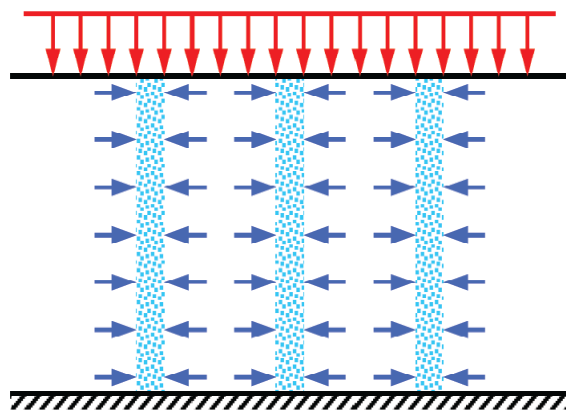


Figura 27. Flux radial que es produeix per l'existència de drenatges verticals, aquest fet accelera el procés de consolidació a igualtat de la resta de variables.

Sabem que el temps necessari (Eq. 21) per atènyer un determinat grau de consolidació (

Figura 28) és funció de la distància H (en el nostre cas espessor de la capa de fangs), si un flux radial redueix aquesta distància el temps es redueix per a un mateix grau de consolidació.

$$T = t \cdot \frac{C_v}{H^2}$$

$$t = T \cdot \frac{H^2 \gamma_w}{K \cdot E_m}$$

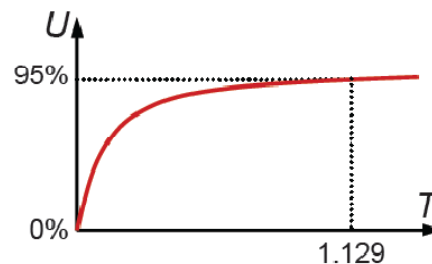


Figura 28. Grau de consolidació. La relació entre temps real i adimensional és funció de H , d'aquí

$t = t(H)$ (Eq. 21) la importància del flux radial.

Per calcular el nou grau de consolidació es formula la següent transformació (Eq. 22):

$$U_{rz} = 1 - (1 - U_r) \cdot (1 - U_z) \quad (\text{Eq. 22})$$

On:

U_{rz} és el nou grau de consolidació en funció del temps

U_z és el grau de consolidació amb la distància H

U_r és el grau de consolidació amb la distància r (radi d'influència del drenatge) (Figura 29)

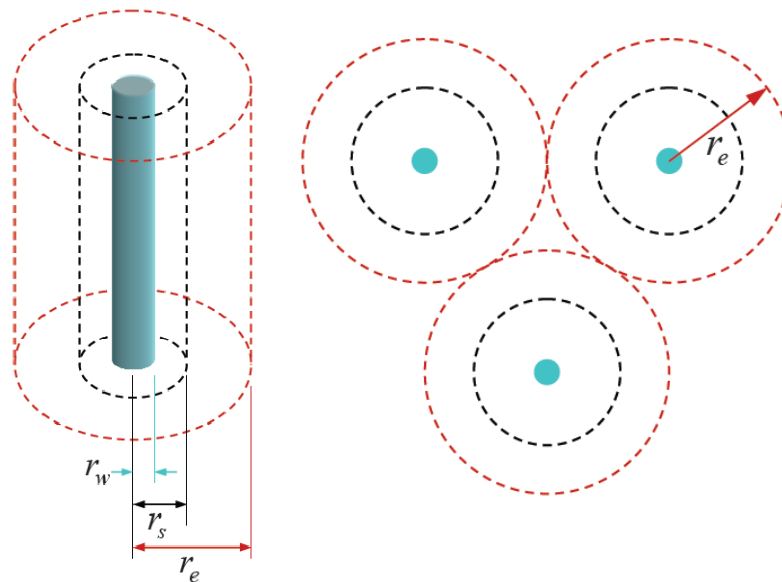


Figura 29. Radi d'influència del drenatge, r_e

En els llits de macròfits és difícil conèixer el valor del radi d'influència de les esquerdes, ja que tenen una distribució i forma irregulars, en el model s'ha utilitzat la distància H per trobar la solució clàssica i en cap moment s'ha estimat cap valor pel radi d'influència.

Com s'observa de la formulació anterior (Eq. 22) la presència de flux radial té una influència en el temps de consolidació, per tant actua com un canvi d'escala en la dimensió temporal. En la calibratge s'ha ajustat el paràmetre C_v , que com s'ha explicat anteriorment representa la velocitat a la que es dissipen les pressions intersticials i per tant governa el temps de consolidació.

Per tant, l'efecte del flux que es produeix perpendicular al vertical (flux radial) en el procés de consolidació queda implícit en el paràmetre C_v del model.

Resultats

Calibratge i validació

Calibratge llit A17/5/2010-25/5/2010

Es fa un primer calibratge en el llit A després de l'alimentació del dia 17/5/2010, les dades d'humitat ja s'han mostrat en l'apartat anterior per explicar la naturalesa d'aquestes.

S'han calculat els valors de l'evapotranspiració (Figura 30) diària a partir de les variables meteorològiques (Taula 4) per al període mitjançant la fórmula de Penman:

| Etsz(mm/dia) | Rn(W/m ² /dia) | T (°C) | Uz (m/s) | HRm | EVT (mm/dia) |
|--------------|---------------------------|--------|----------|-----|--------------|
| 17/05/2010 | 30 | 15,1 | 12 | 65 | 8,4 |
| 18/05/2010 | 29 | 16,9 | 7,4 | 59 | 9,6 |
| 19/05/2010 | 29 | 17,3 | 7,8 | 64 | 9,0 |
| 20/05/2010 | 29 | 17,8 | 6,6 | 64 | 9,1 |
| 21/05/2010 | 29 | 20 | 8,7 | 49 | 12,7 |
| 22/05/2010 | 23 | 19,8 | 6,9 | 51 | 10,9 |
| 23/05/2010 | 30 | 18,9 | 5,2 | 68 | 9,0 |
| 24/05/2010 | 31 | 20 | 10,2 | 52 | 12,8 |
| 25/05/2010 | 29 | 19,8 | 10,2 | 55 | 11,9 |

Taula 4. Variables meteorològiques i valors resultants d'evapotranspiració segons Penman

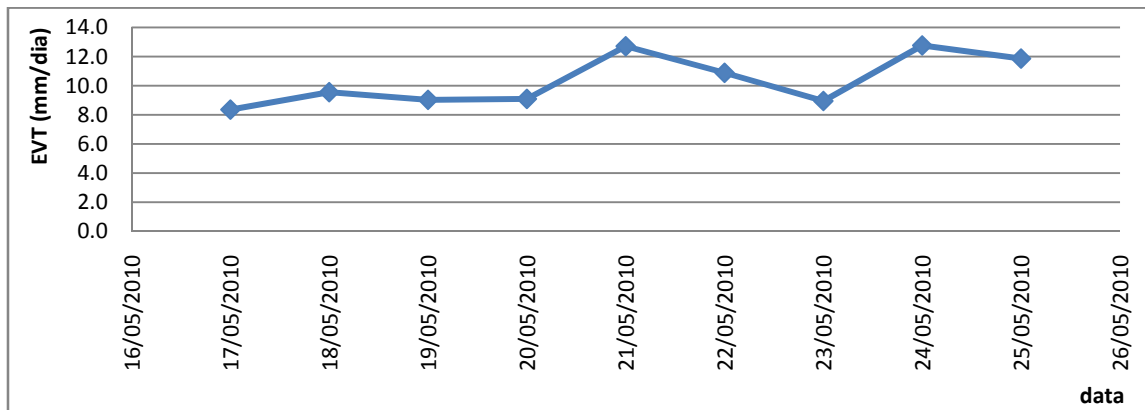


Figura 30. Evolució valor d'evapotranspiració segons Penman

En el model s'han introduït les dades d'evapotranspiració en forma de vector.

$$q = ([8.4, 9.6, 9.0, 9.1, 12.7, 10.9, 9.0, 12.8, 11.9] / 1000 * \text{Tau} / \text{Sinf}) / 86400$$

Els valors que s'aproximen més a les dades experimentals són els de $C_v = 3e-8$ i $E_m = 12000$, tots els valors expressats en el sistema internacional d'unitats. A continuació es mostra la sortida del model. (Figura 31):

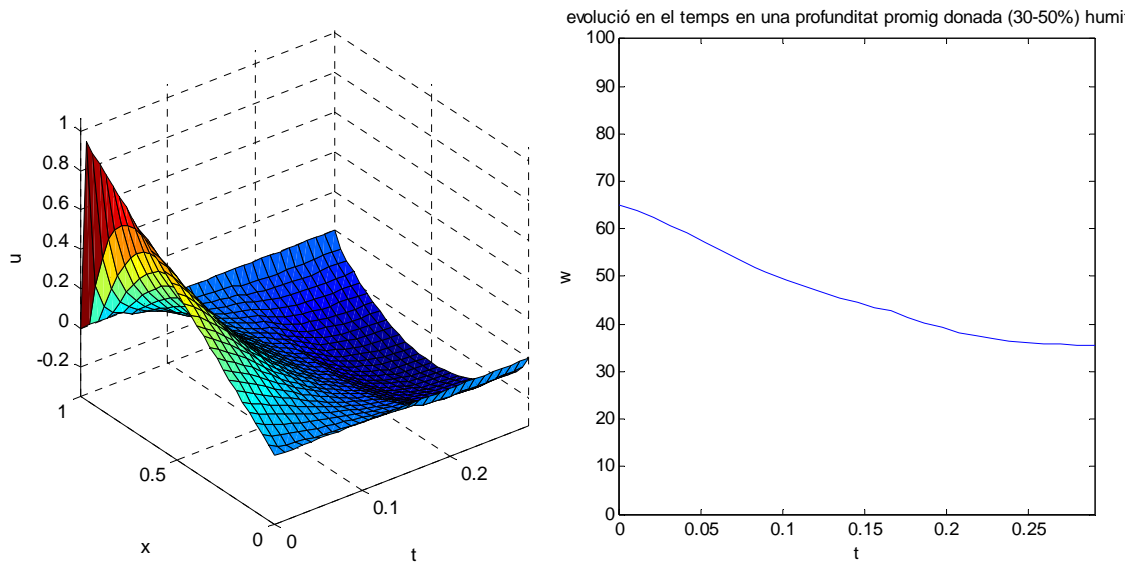


Figura 31. Resultats numèrics, en tot el domini i mitjana d’humitat en la profunditat 30%-50%

Tot seguit es mostra un resum de tots els paràmetres de la simulació:

| Paràmetre | Valor |
|-------------------|-----------------------|
| m | 30 |
| H | 0,25 |
| C _v | 3e-8 |
| npast | 28 |
| e ₀ | 1,77 |
| n ₀ | 0,65 |
| E _m | 12000 |
| Sinf _∞ | 0,0118 |
| q | [vector] ¹ |

A continuació es mostren les dades de la sonda en mitjanes diàries referent a la simulació anterior (Figura 32), en apartats anteriors ja s’ha parlat del càlcul de la mitjana diària i dels problemes numèrics que produeix en les 12 hores posteriors a l’alimentació.

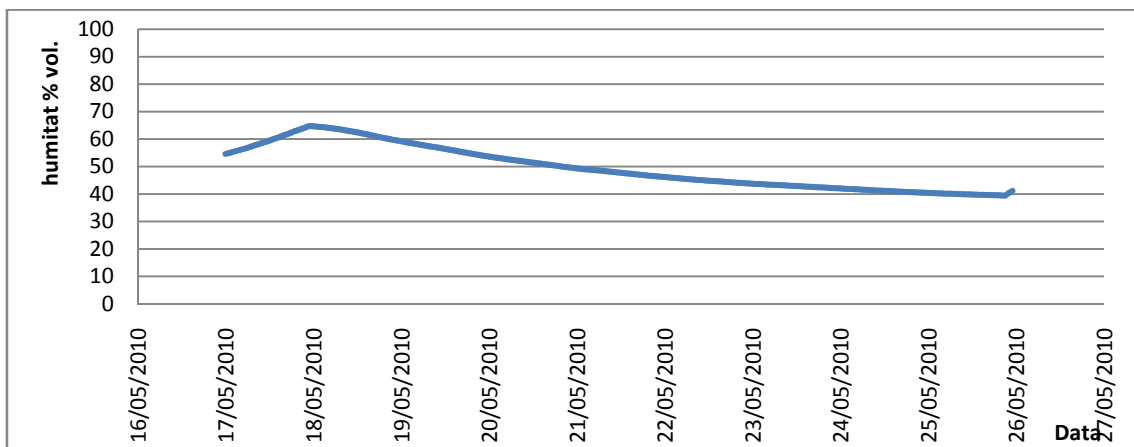


Figura 32. Mitjanes diàries dels valors d’humitat de la sonda.

¹Taula 4. Variables meteorològiques i valors resultants d’evapotranspiració segons Penman-Monteith

Calibratge llit C 17/5/2010-25/5/2010

A continuació es fa el calibratge en el mateix període en el llit C (Figura 33), els valors que s'aproximen més a les dades experimentals són els de $C_v=3e-8$ i $E_m=40000$, s'observa que aquest llit arriba a graus de consolidació iguals al seu homòleg en el mateix temps, però la magnitud de l'assentament a temps infinit és sensiblement inferior, això indueix una variació de E_m de 12000 a 40000 d'una simulació a l'altra.

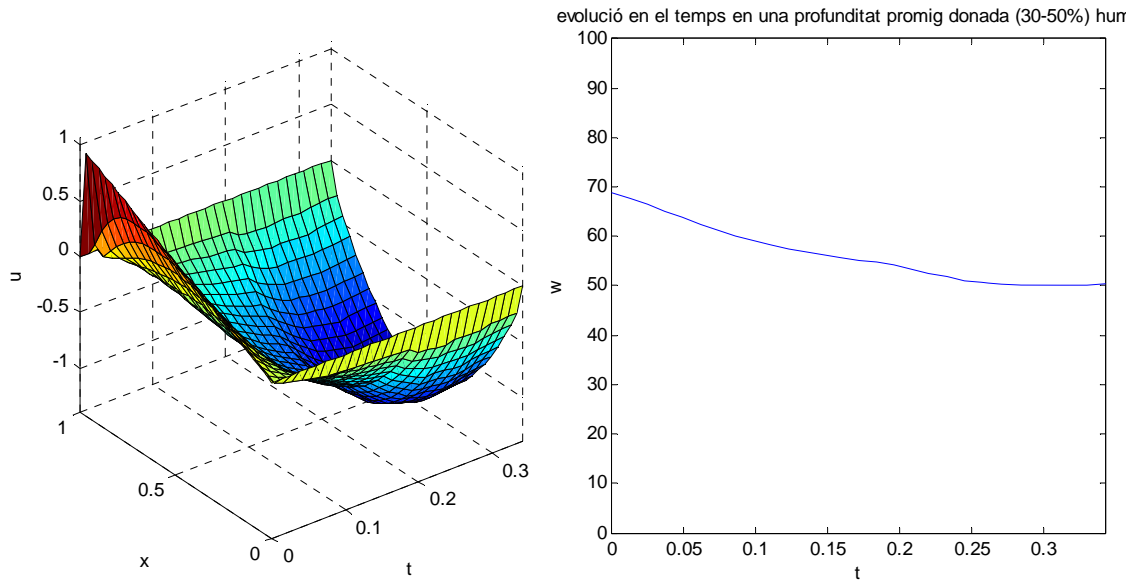


Figura 33. Resultats numèrics, en tot el domini i mitjana d'humitat en la profunditat 30%-50%

Tot seguit es mostra un resum de tots els paràmetres de la simulació:

| Paràmetre | Valor |
|---------------|-----------------------|
| m | 30 |
| H | 0,23 |
| C_v | $3e-8$ |
| $npast$ | 9 |
| e_0 | 2,23 |
| n_0 | 0,69 |
| E_m | 40000 |
| $Sinf_\infty$ | 0,0096 |
| q | [vector] ² |

²Taula 4. Variables meteorològiques i valors resultants d'evapotranspiració segons Penman-Monteith

A continuació es mostren les dades de la sonda (Figura 34):

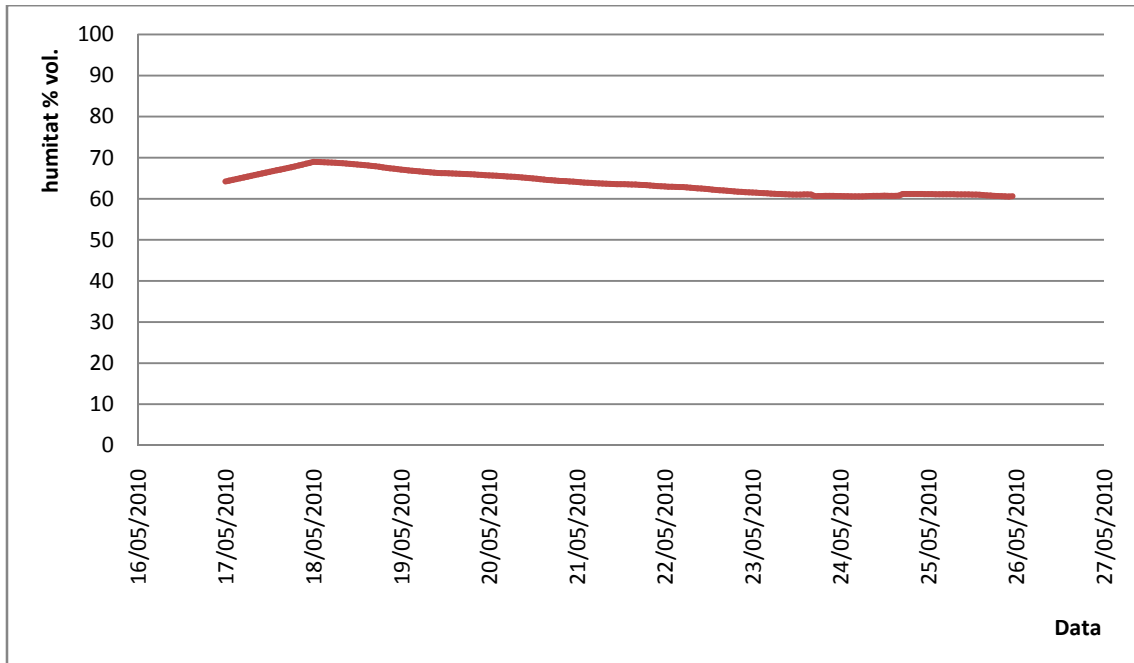


Figura 34. Mitjanes diàries dels valors d'humitat de la sonda.

Per al coeficient de consolidació s'obté el mateix valor dels dos calibratges $C_v=3e-8m^2/s$, per al mòdul edomètric s'obté $E_m=12000 Pa$ per al llit A i $E_m=40000$ per al llit C, utilitzarem $E_m=40000$ ja que les humitats del 40% que s'atenyen en el llit A són massa baixes com per considerar les dades representatives.

Validació Sant Boi 2/02/2009-7/02/2009

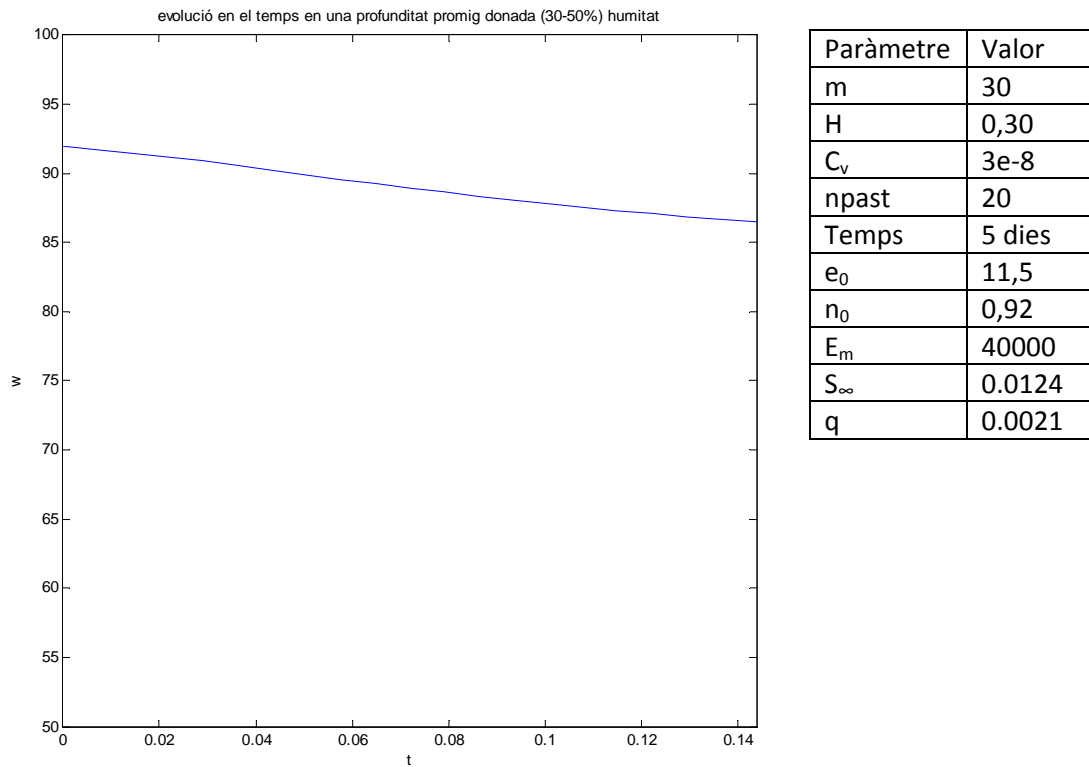


Figura 35. Resultat model, evolució de la humitat en funció del temps.

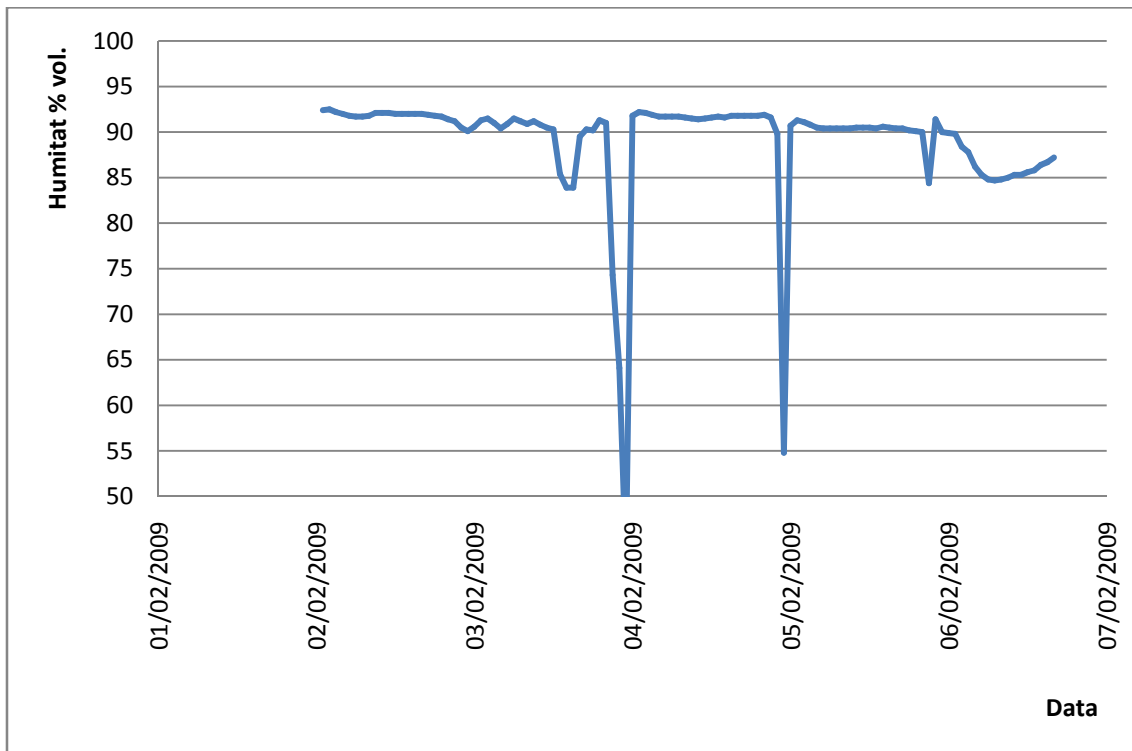


Figura 36. Dades sonda, s'observen dos valors atípics que no s'han considerat.

Validació Sant Boi 9/05/2009-13/05/2009

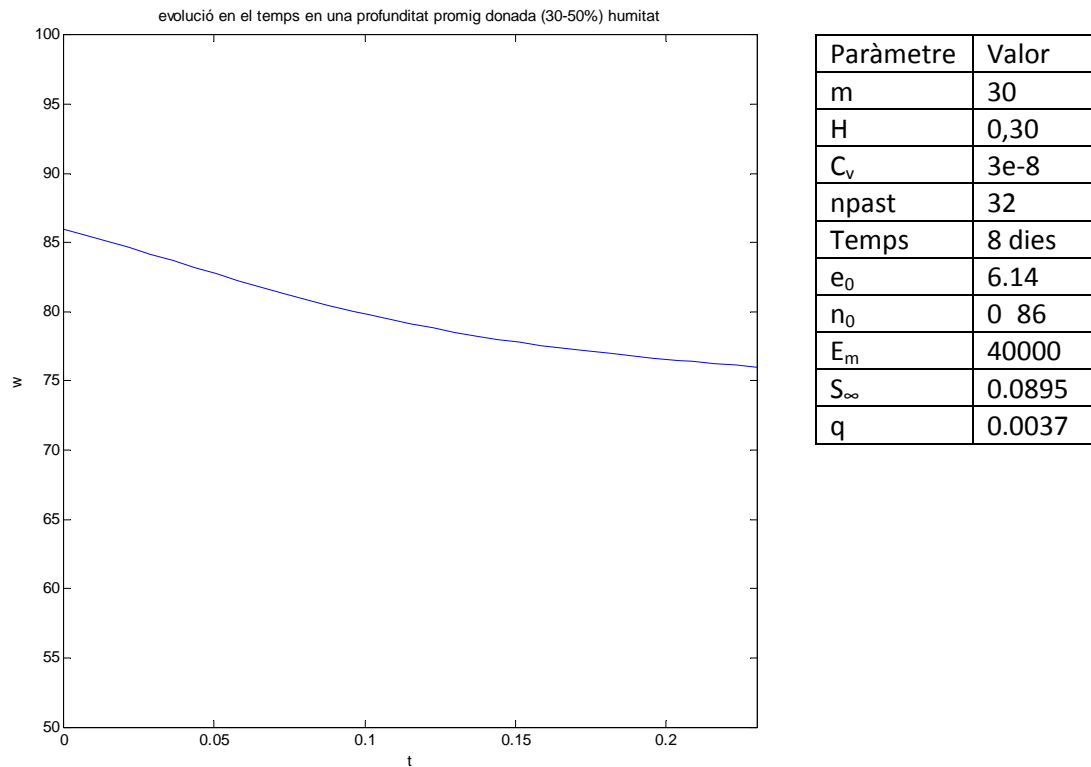


Figura 37. Resultat model, evolució de la humitat en funció del temps.

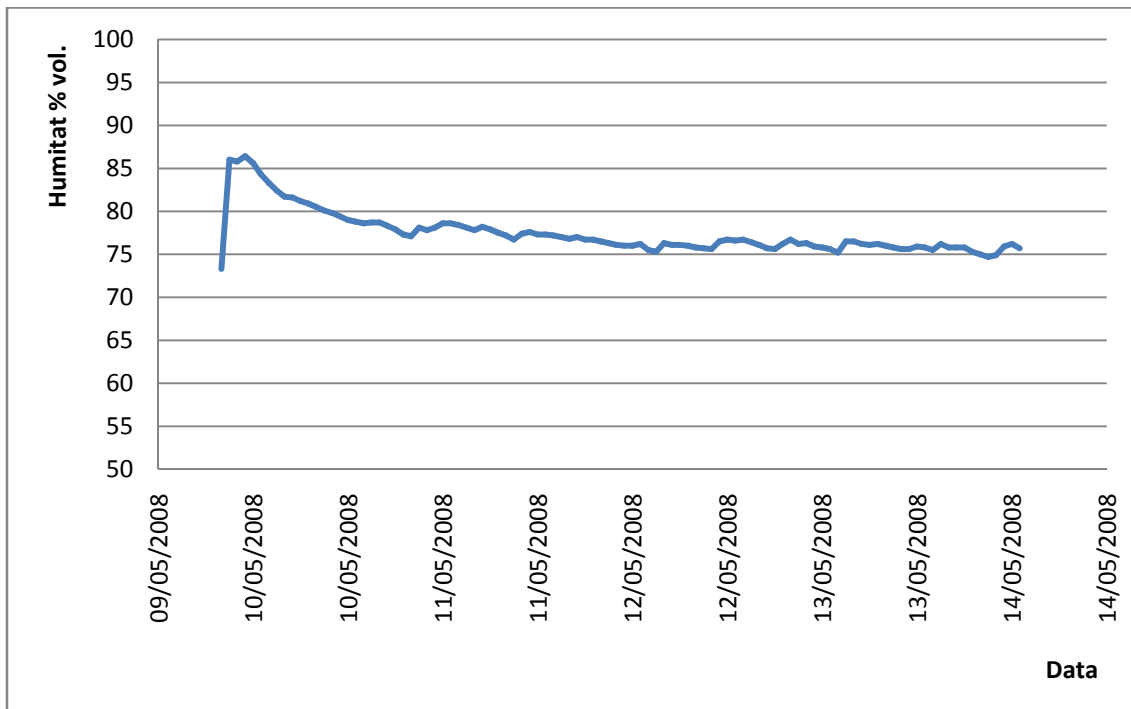


Figura 38. Dades sonda, s'observa una disminució més acusada els primers dos dies i es torna gairebé nul·la al cap d'una setmana.

Validació Sant Boi 25/05/2009-1/06/2009

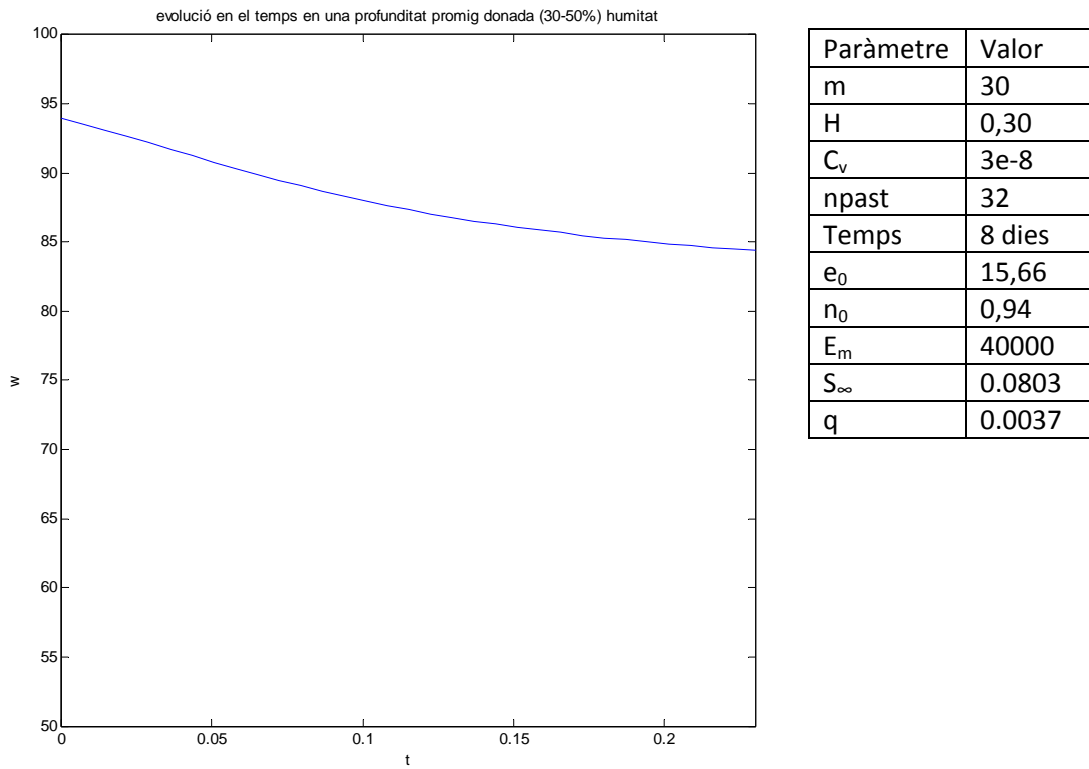


Figura 39. Resultat model, evolució de la humitat en funció del temps.

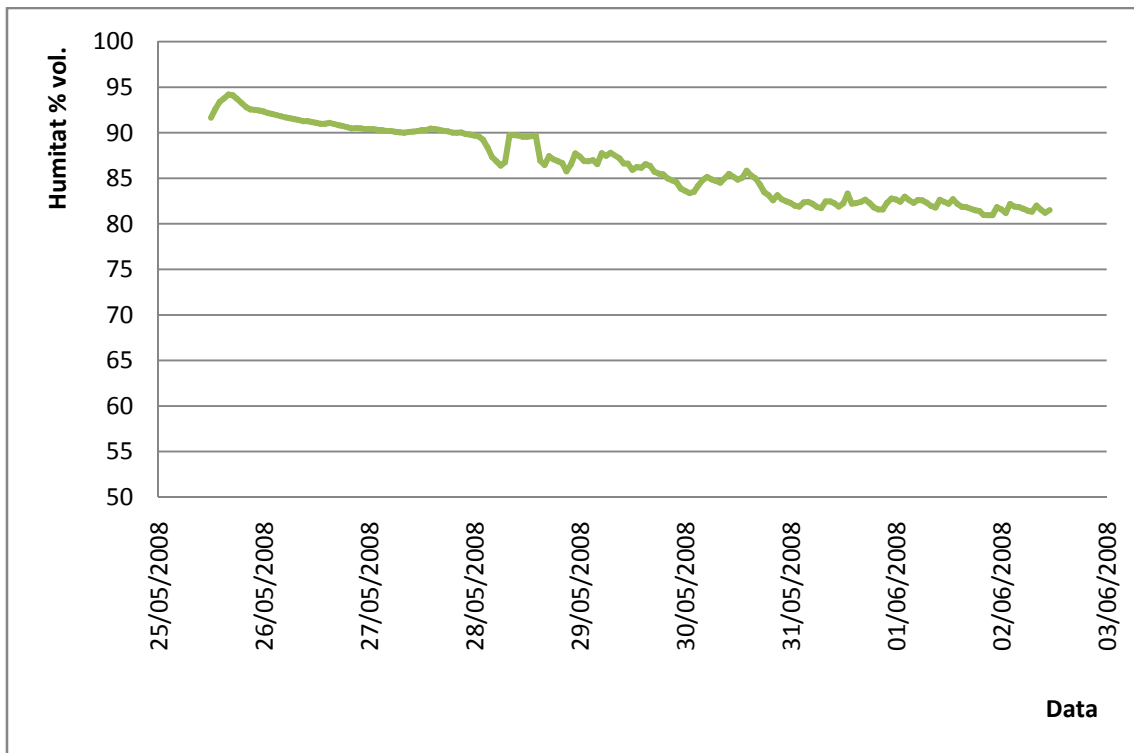


Figura 40. Dades sonda, els valors d'humitat són especialment alts, gairebé del 95% després de l'alimentació, en aquestes condicions les hipòtesis del model són raonablement certes .

Validació Alpens 2/05/2008-11/05/2008

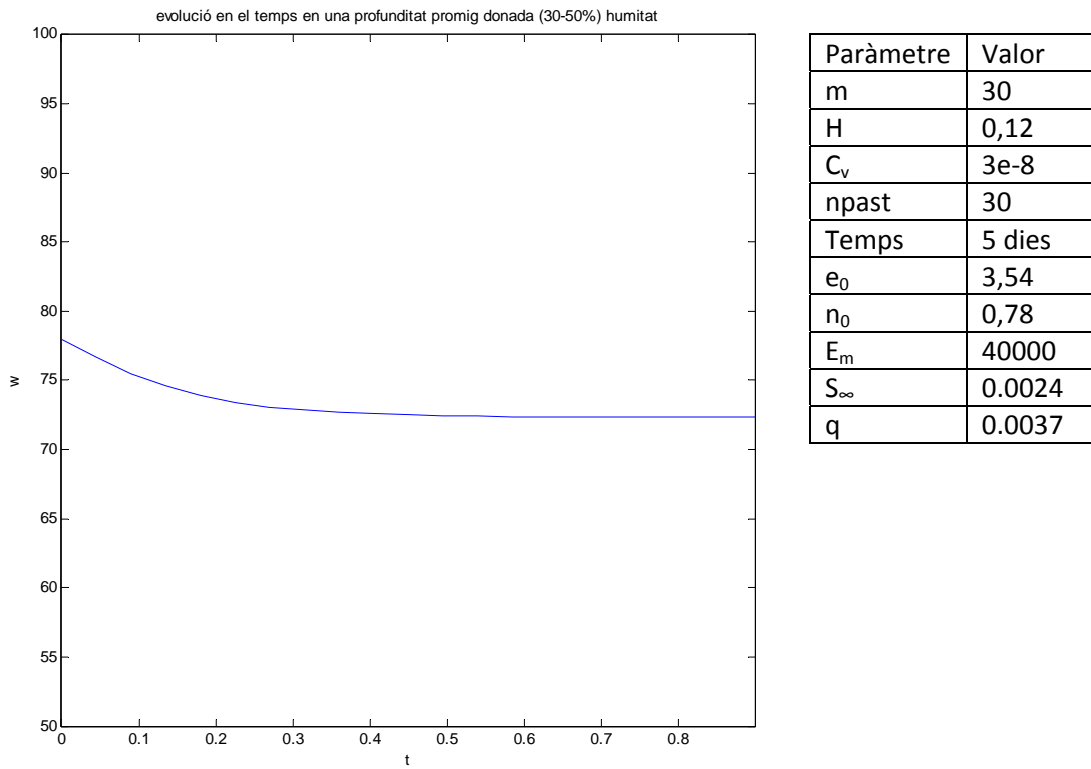


Figura 41. Resultat model, evolució de la humitat en funció del temps.

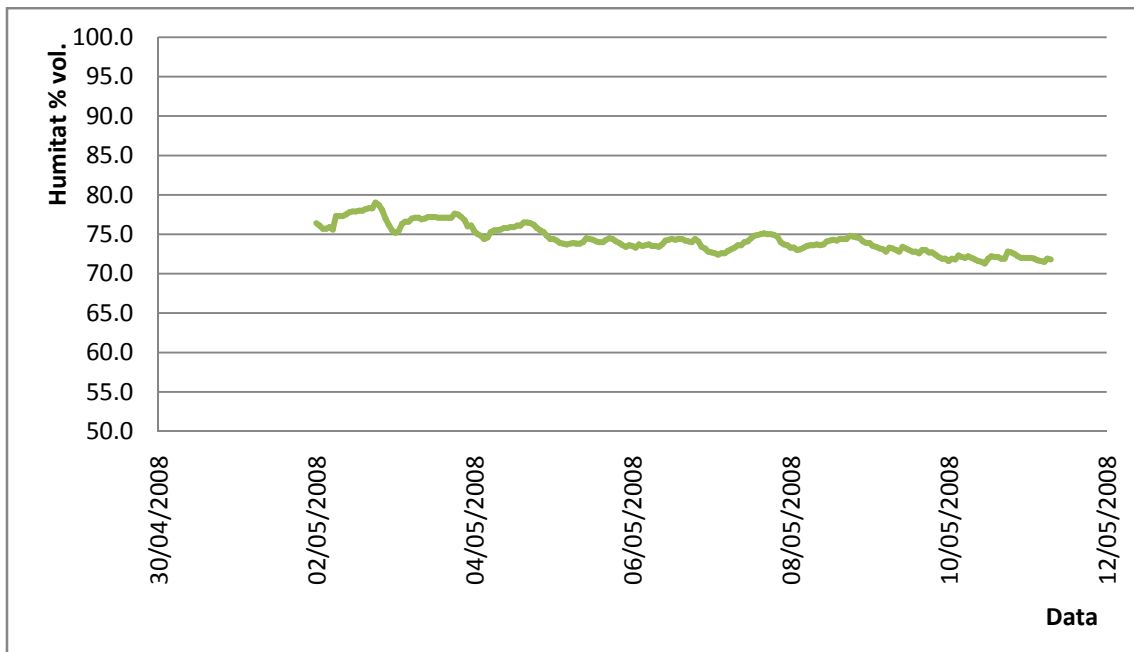


Figura 42. Dades sonda. En aquestes lectures s'aprecien fàcilment les oscil·lacions diàries d'humitat de les que ja s'ha parlat en apartats anteriors.

Resum Validacions

Es presenta un resum de les quatre validacions superposant les dades del model i les de la sonda (Fig. 43), el primer valor sempre coincideix ja que és una dada que s'introdueix al model. Es constata que en els mesos d'hivern (a) la disminució total d'humitat és menor que els altres casos, maig (b i d) i juny (c), també es pot veure que espessors menors en el cas d'Alpens 0,12m (d) comporten una disminució d'humitat més ràpida durant els primers dies que espessors majors, Sant Boi de Lluçanès, 0,30m (a, b i c).

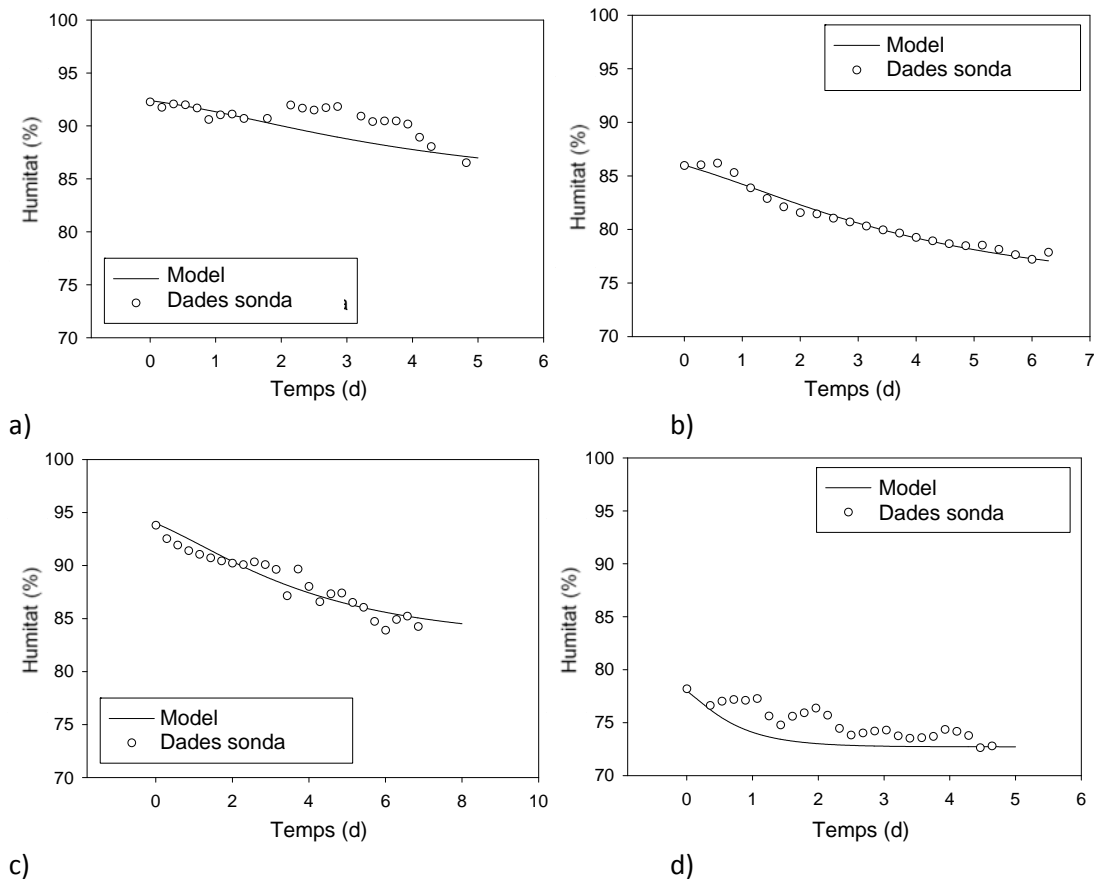


Figura 43. Resum validacions del model en els mesos de febrer (a), maig (b i d) i juny (c) amb dades de Sant Boi de Lluçanès (a, b i c) i Alpens (d).

Case Study

A partir dels valors estimats amb els calibratges del model en plantes pilot i validats amb plantes reals es procedeix a executar el model amb diferents condicions climàtiques del territori. S'escullen tres zones representatives de la geografia (Figura 44) i es calcula la seva evapotranspiració a partir de les dades disponibles per a estiu i hivern.



Figura 44. Divisió climàtica de Catalunya, encerclades les tres zones que s'han utilitzat per al Case Study.
 Font: <http://www.meteo.cat>

A continuació es mostra una (Taula 5) amb el resum d'aquestes dades.

| Zona climàtica | Època | P (mm/mes) | Rn (W/m ² /dia) | T (°C) | Uz (m/s) | HRm (%) | EVT (mm/dia) |
|---|--------|---------------|-------------------------------|-----------|-------------|------------|-----------------|
| Riba-roja: clima Mediterrani Continental Sec | Estiu | 25 | 20,25 | 24,5 | 13,2 | 49 | 14,5 |
| | Hivern | 15 | 9,25 | 8,5 | 10,2 | 60 | 4,5 |
| La Seu: clima Mediterrani Prepirenaic Occidental | Estiu | 85 | 18,75 | 20,5 | 7,8 | 60 | 6,0 |
| | Hivern | 35 | 8,75 | 3,5 | 13,2 | 61 | 2,5 |
| Zona Universitària, Barcelona: Clima Med. Litoral Central | estiu | 45 | 20,25 | 24,5 | 11,4 | 66 | 8,6 |
| | hivern | 35 | 10,75 | 10,5 | 13,2 | 65 | 3,9 |

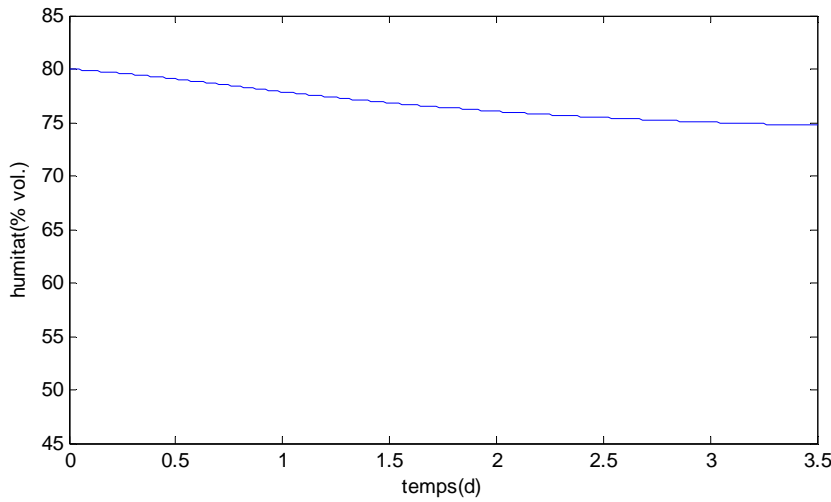
Taula 5. Càlcul de l'evapotranspiració per les zones climàtiques escollides per estiu i hivern.

A partir d'aquests valors d'evapotranspiració s'escull un mínim i un màxim i un valor representatiu de la regió metropolitana i amb aquests tres valors s'executa una simulació amb un espessor donat de la capa de fangs (0,2-0,4-0,8m) que considerant un creixement de 10 centímetres a l'any correspondria a 2, 4 i 8 anys de vida del sistema.

Aquesta simulació es porta a terme realitzant una mitjana de la humitat en tota l'altura de la capa de fangs ja que no s'ha de correlacionar amb valors de la sonda en una altura determinada.

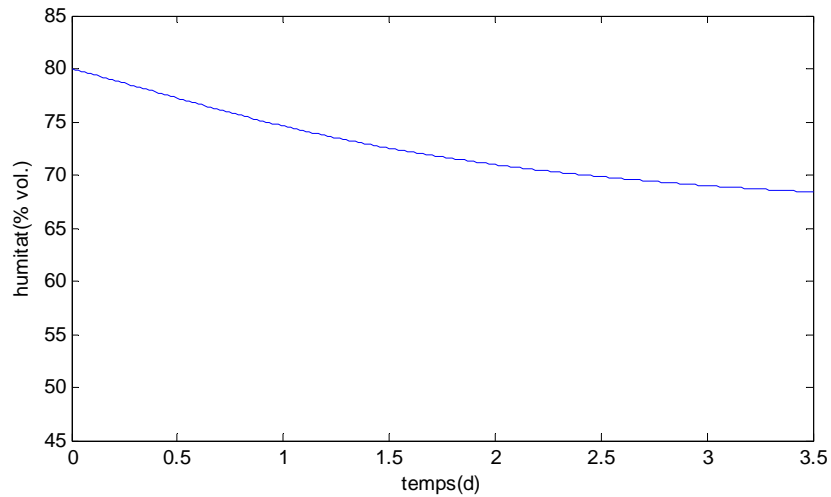
Resultats mitjana a la profunditat 0,3-0,5 H

H=0,2 EVT=2,5



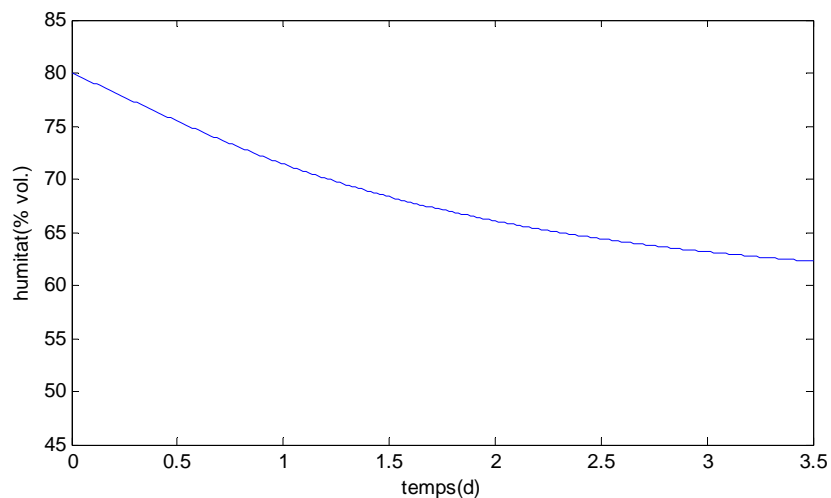
| Paràmetre | Valor |
|----------------|----------|
| m | 120 |
| H | 0,20 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 3,5 dies |
| Tau | 1.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0064 |
| q | 0.0025 |

H=0,2 EVT=8,6



| Paràmetre | Valor |
|----------------|----------|
| m | 120 |
| H | 0,20 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 3,5 dies |
| Tau | 1.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0064 |
| q | 0.0086 |

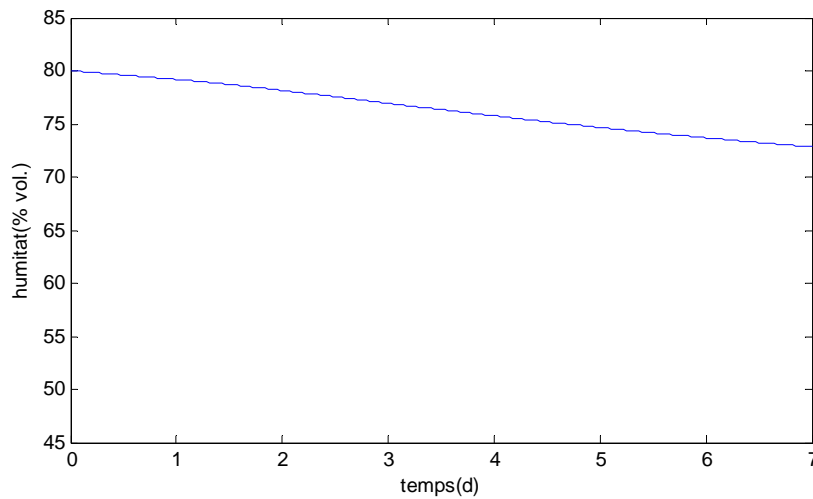
H=0,2 EVT=14,5



| Paràmetre | Valor |
|----------------|----------|
| m | 120 |
| H | 0,20 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 3,5 dies |
| Tau | 1.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0064 |
| q | 0.0145 |

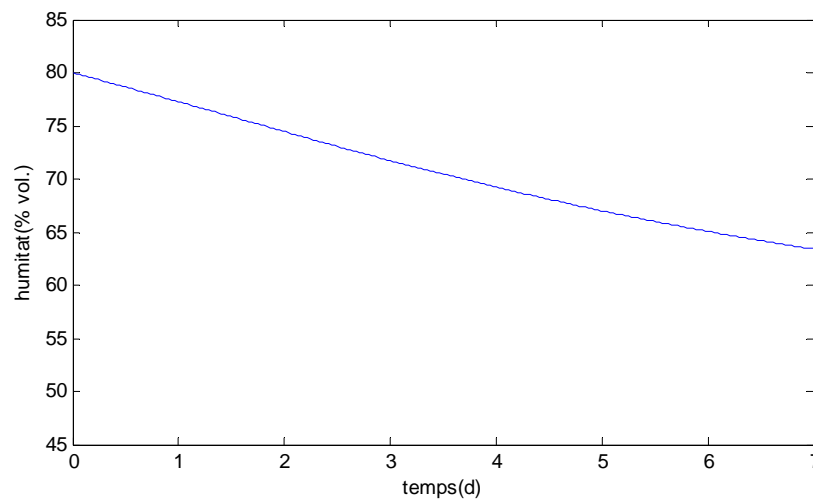
Figura 45. Case Study, resultats del model per H=0,2m.

H=0,4 EVT=2,5



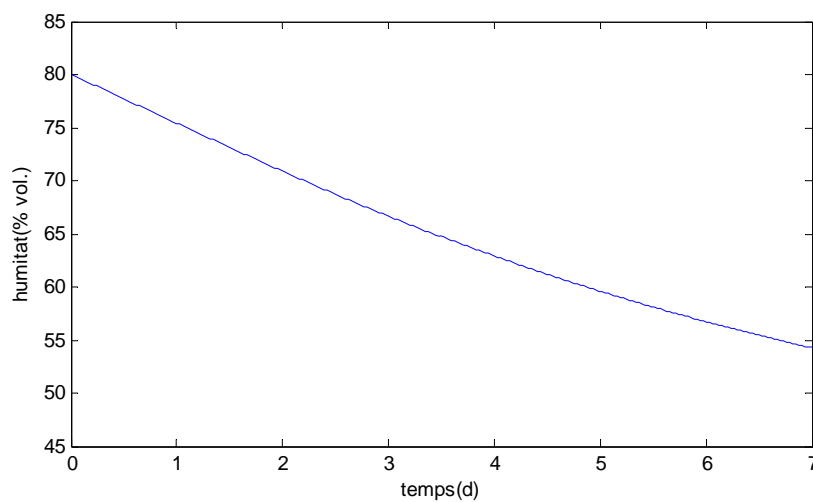
| Paràmetre | Valor |
|----------------|--------|
| m | 120 |
| H | 0,40 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 7 dies |
| Tau | 5.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0257 |
| q | 0.0025 |

H=0,4 EVT=8,6



| Paràmetre | Valor |
|----------------|--------|
| m | 120 |
| H | 0,40 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 7 dies |
| Tau | 5.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0257 |
| q | 0.0086 |

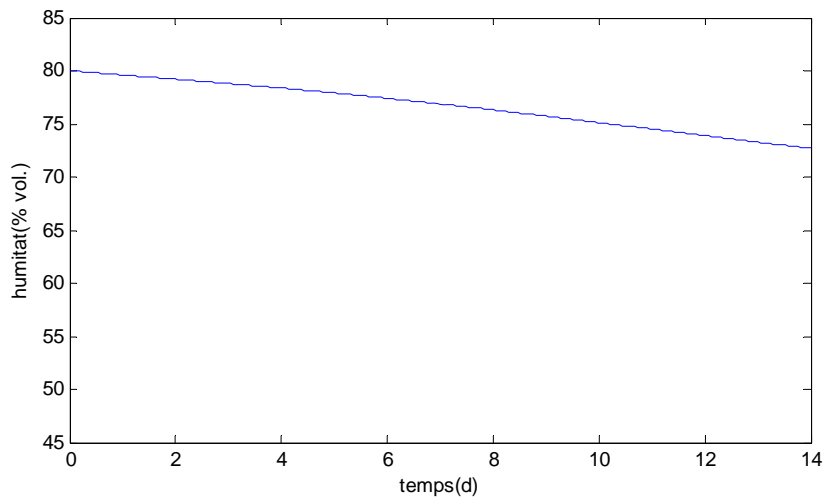
H=0,4 EVT=14,5



| Paràmetre | Valor |
|----------------|--------|
| m | 120 |
| H | 0,40 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 7 dies |
| Tau | 5.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0257 |
| q | 0.0145 |

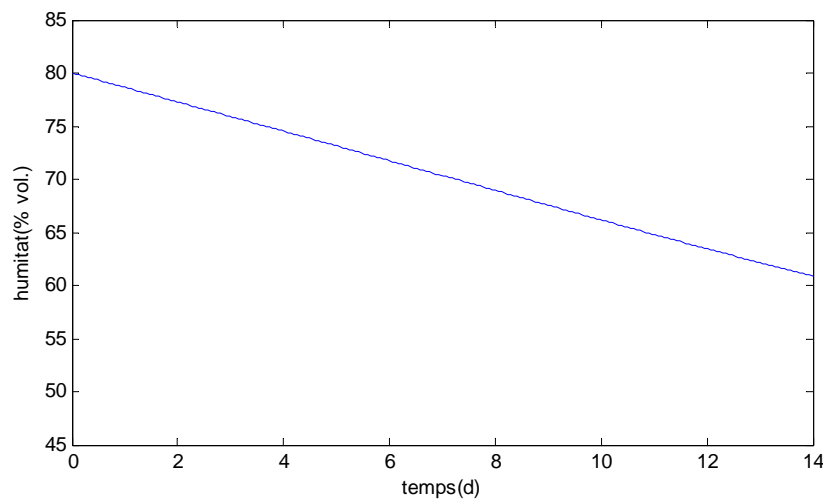
Figura 46. Case Study, resultats del model per H=0,4m.

H=0,8 EVT=2,5



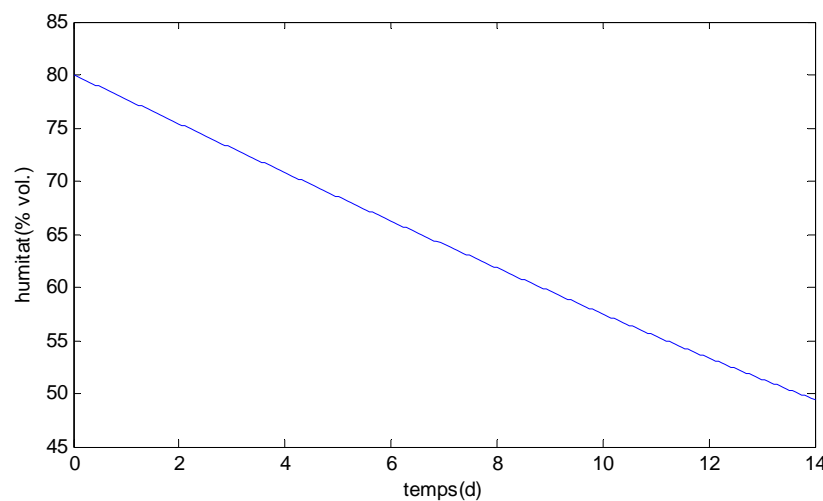
| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 120 |
| H | 0,80 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 14 dies |
| Tau | 2.13e7 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.1027 |
| q | 0.0025 |

H=0,8 EVT=8,6



| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 120 |
| H | 0,80 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 14 dies |
| Tau | 2.13e7 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.1027 |
| q | 0.0086 |

H=0,8 EVT=14,5



| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 120 |
| H | 0,80 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 14 dies |
| Tau | 2.13e7 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.1027 |
| q | 0.0145 |

Figura 47. Case Study, resultats del model per H=0,2m.

Aquest Case Study es realitza calculant la mitjana d'humitat en el rang 30-50% de la profunditat de la capa de fang per tal de poder comparar les dades amb les del calibratge i validació del model en les que s'ha utilitzat aquest mateix rang de profunditat per ser la posició en la que es troben les sondes.

Els períodes de temps que s'utilitzen en cada simulació estan limitats per l'aparició de pressions negatives ja que el model està concebut per resoldre un problema amb dissipació de sobrepressions, el terme font que s'ha afegit és capaç de causar pressions negatives ja que continua extraient aigua del sistema un cop s'han dissipat totes les sobrepressions, s'ha considerat que una pressió negativa superior en valor absolut a les sobrepressions inicials invalida el model.

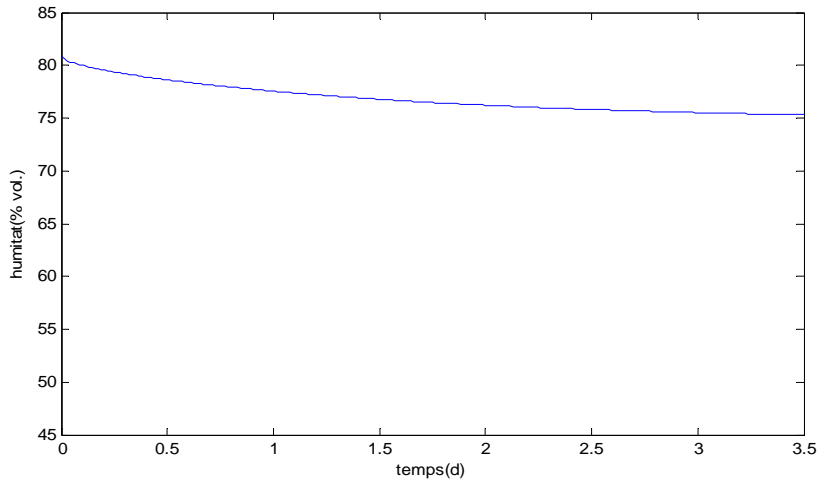
És per això que les simulacions per a $H=0,2\text{m}$ (Figura 45. *Case Study*, resultats del model per $H=0,2\text{m}$.), $H=0,4\text{m}$ (Figura 46) i $H=0,8\text{m}$ (Figura 47) tenen respectivament temps de simulació de 3,5, 7 i 14 dies. En els casos amb evapotranspiracions més baixes es pot allargar el temps de la simulació ja que la sortida d'aigua del sistema a través de l'evapotranspiració és més lenta, però s'ha escollit un únic temps per a cada espessor per simplificar el procés i permetre la comparació dels resultats.

Es pot assenyalar que aproximadament la humitat que correspon a una pressió negativa en valor absolut de l'ordre de les sobrepressions inicials és del 50%, per tant el model es pot considerar vàlid mentre la simulació es mantingui per sobre del 50% d'humitat volumètrica. Cal remarcar que aquest 50% és un valor merament indicatiu ja que la relació no té cap rigor analític.

Es pot observar de les corbes del *Case Study* que l'espessor de la capa té una forta incidència en la distribució temporal de les deshidratacions mentre que l'evapotranspiració afecta la magnitud de la deshidratació, és per això que en apartats posteriors s'utilitzarà el model sense evapotranspiració per analitzar l'efecte del temps entre alimentacions en el rendiment del sistema.

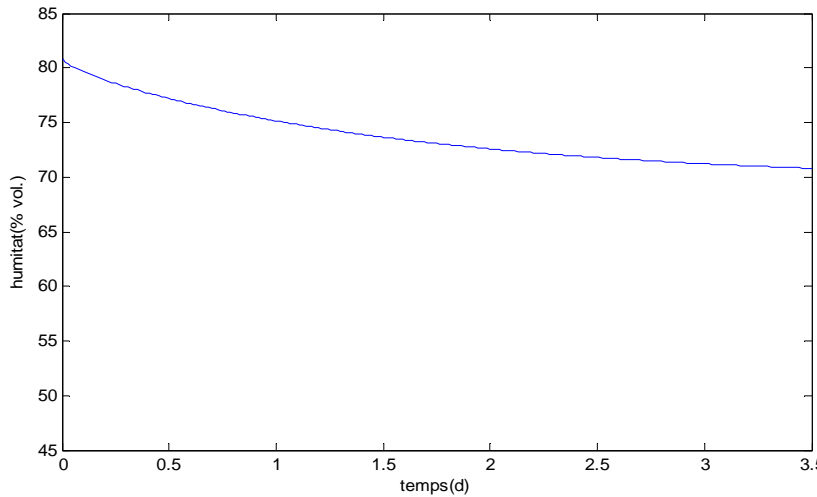
Resultats mitjana a tota la profunditat H

H=0,2 EVT=2,5



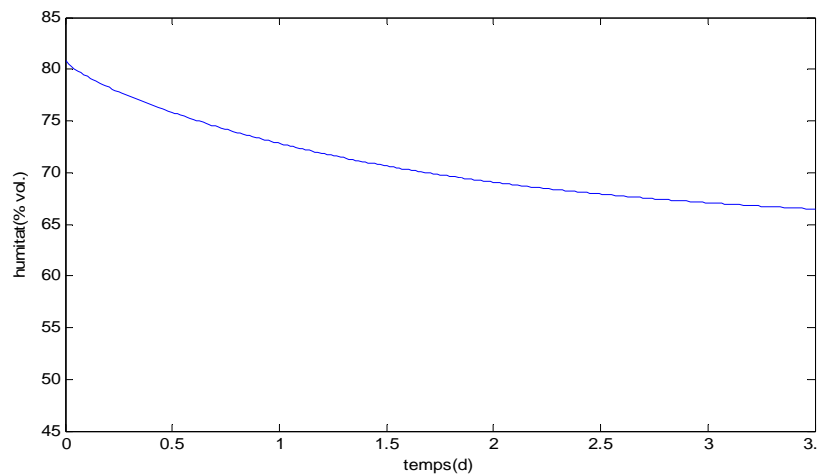
| Paràmetre | Valor |
|----------------|----------|
| m | 120 |
| H | 0,20 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 3,5 dies |
| Tau | 1.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0. 0064 |
| q | 0.0025 |

H=0,2 EVT=8,6



| Paràmetre | Valor |
|----------------|----------|
| m | 120 |
| H | 0,20 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 3,5 dies |
| Tau | 1.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0. 0064 |
| q | 0.0086 |

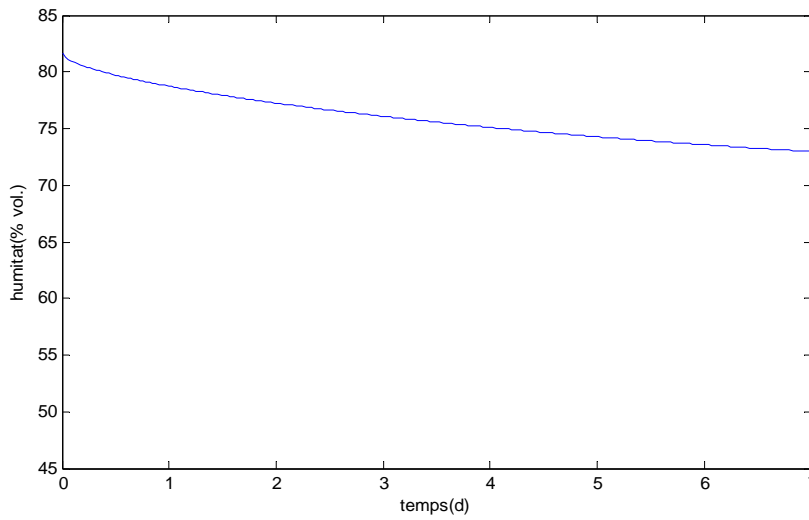
H=0,2 EVT=14,5



| Paràmetre | Valor |
|----------------|----------|
| m | 120 |
| H | 0,20 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 3,5 dies |
| Tau | 1.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0. 0064 |
| q | 0.0145 |

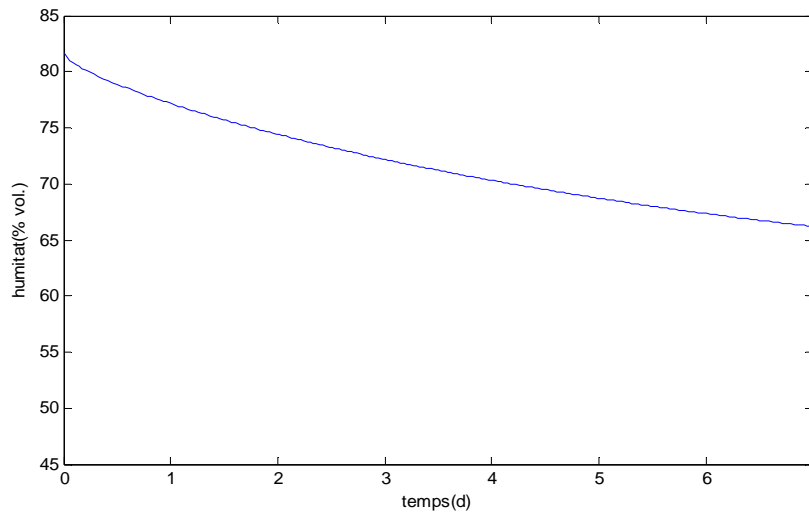
Figura 48. Case Study, resultats del model per H=0,2m.

H=0,4 EVT=2,5



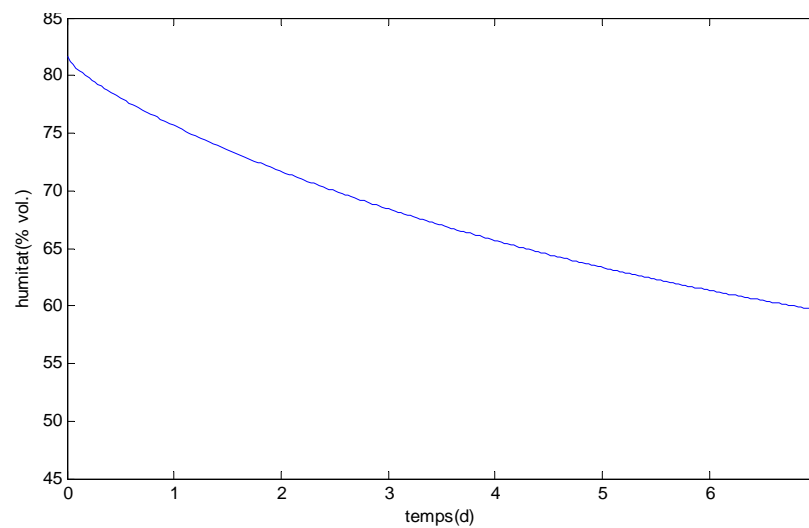
| Paràmetre | Valor |
|----------------|--------|
| m | 120 |
| H | 0,40 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 7 dies |
| Tau | 5.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0257 |
| q | 0.0025 |

H=0,4 EVT=8,6



| Paràmetre | Valor |
|----------------|--------|
| m | 120 |
| H | 0,40 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 7 dies |
| Tau | 5.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0257 |
| q | 0.0086 |

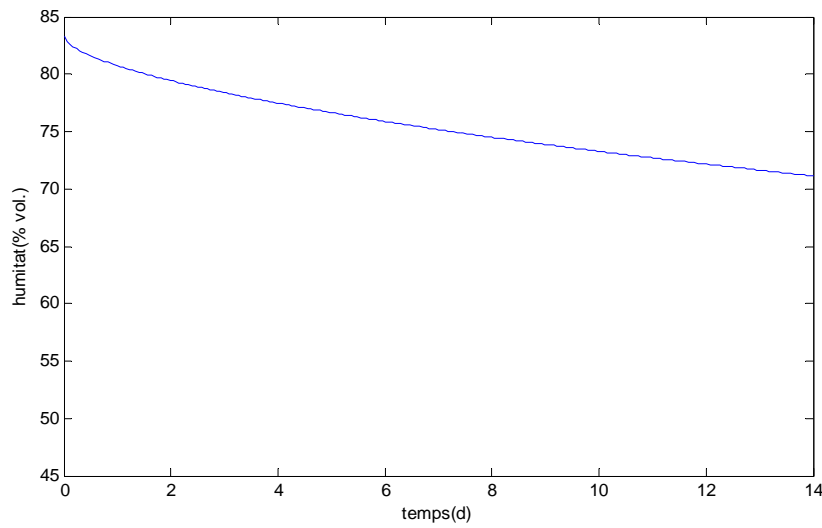
H=0,4 EVT=14,5



| Paràmetre | Valor |
|----------------|--------|
| m | 120 |
| H | 0,40 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 7 dies |
| Tau | 5.33e6 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0257 |
| q | 0.0145 |

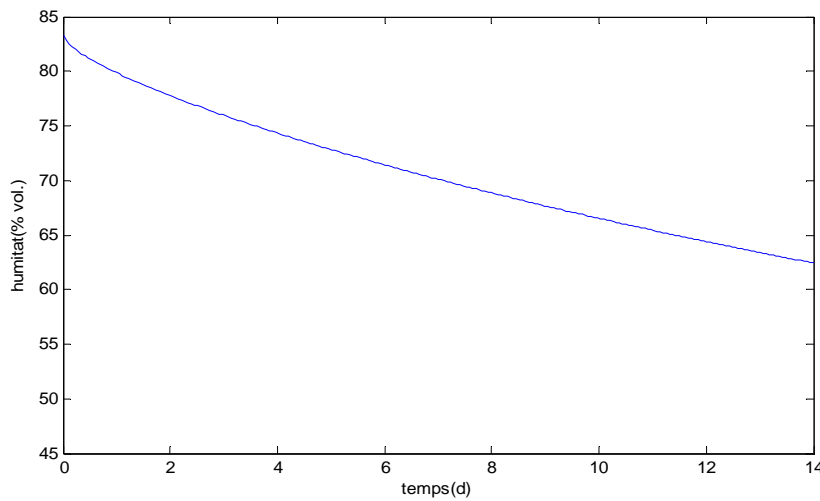
Figura 49. Case Study, resultats del model per H=0,4m.

H=0,8 EVT=2,5



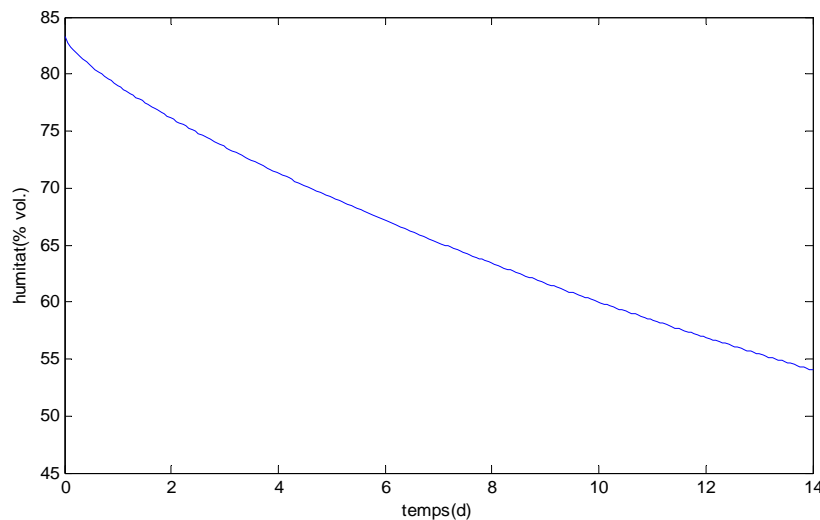
| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 120 |
| H | 0,80 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 14 dies |
| Tau | 2.13e7 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.1027 |
| q | 0.0025 |

H=0,8 EVT=8,6



| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 120 |
| H | 0,80 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 14 dies |
| Tau | 2.13e7 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.1027 |
| q | 0.0025 |

H=0,8 EVT=14,5



| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 120 |
| H | 0,80 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 14 dies |
| Tau | 2.13e7 |
| npast | 240 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.1027 |
| q | 0.0086 |

Figura 50. Case Study, resultats del model per H=0,2m.

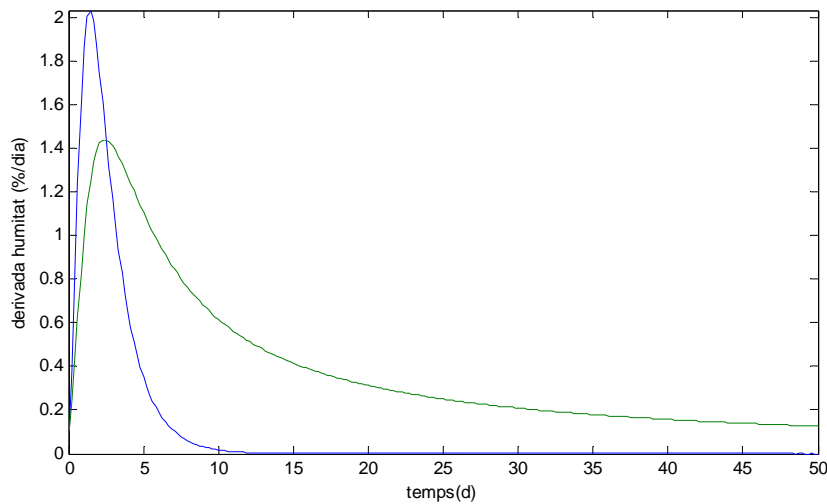
En aquest apartat, a diferència de l'anterior s'ha realitzat un *Case Study* que utilitza la mitjana de la humitat en tota la profunditat de la capa de fangs.

El que es pretén amb el càlcul de la mitjana de tot el domini és obtenir uns valors totals de la deshidratació que es produeix en el sistema per tal d'estimar els volums de les alimentacions que coincideixin amb el volum d'aigua eliminat durant el període entre alimentacions.

S'observa a diferència del *Case Study* realitzat amb la mitjana del 30-50% de profunditat que en els moments inicials el pendent de la corba és més pronunciat, aquest fet es produeix perquè en les capes inferiors on hi ha les màximes sobrepressions la sortida d'aigua cap a les capes drenants inferiors es produeix més ràpidament.

Derivada de l'evolució d'humitat en zona superficial i mitjana temporal sum(deriv(1:T)/T)

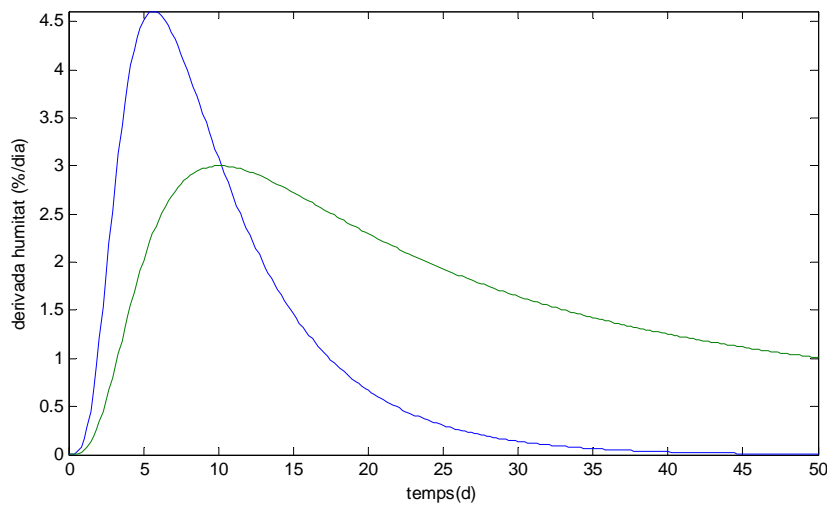
H=0,2 EVT=0



| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 30 |
| H | 0,20 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 50 dies |
| Tau | 1.33e6 |
| npast | 224 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0064 |

| | |
|-----------|----------|
| T òptim | 2,5 dies |
| Rendiment | 1,4%/d |

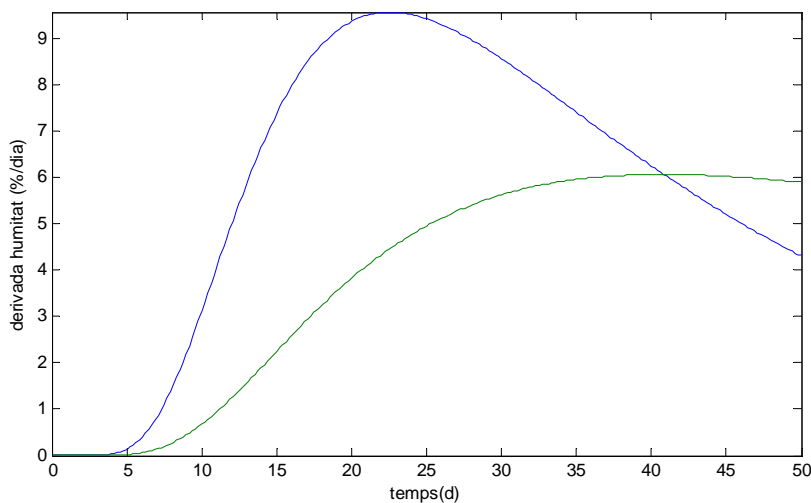
H=0,4 EVT=0



| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 30 |
| H | 0,40 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 50 dies |
| Tau | 5.33e6 |
| npast | 224 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.0257 |

| | |
|-----------|---------|
| T òptim | 10 dies |
| Rendiment | 3,0 %/d |

H=0,8 EVT=0



| Paràmetre | Valor |
|----------------|---------|
| m | 30 |
| H | 0,80 |
| C _v | 3e-8 |
| Temps | 50 dies |
| Tau | 2.13e7 |
| npast | 224 |
| e ₀ | 4.0 |
| n ₀ | 0.80 |
| E _m | 40000 |
| S _∞ | 0.1027 |

| | |
|-----------|---------|
| T òptim | 40 dies |
| Rendiment | 6,1 %/d |

Figura 51. Derivades (%/dia) i mitjanes temporals.

En aquest apartat s'ha executat el model amb un valor del terme font nul ja que l'interès se centra en el valor del període que produeix un rendiment òptim i aquest és independent del terme font, no obstant el terme font en el model comporta problemes numèrics que impedeixen obtenir un màxim de la funció.

Per obtenir el temps òptim entre alimentacions s'ha calculat la mitjana de la derivada de la funció deshidratació en funció del temps transcorregut amb una expressió del tipus: $mitjana = \text{sum}(deriv(1:T)/T)$, on *deriv* és el vector de valors de la derivada de la funció humitat i T el període entre alimentacions. S'utilitza aquesta expressió perquè el rendiment del sistema serà el valor de la mitjana temporal en el període utilitzat entre alimentacions.

Així s'obté un màxim que és el valor de T per al qual el rendiment és òptim, per aquest càlcul s'ha fet servir la derivada de la part més superficial dels fangs (10% superior) ja que el fang fresc s'aplica a la part de dalt i és per aquest contorn que l'aigua entra en el sistema. Si es calcula la derivada de la mitjana de tota la profunditat s'obté un màxim per a T=0, de l'experiència se sap que això no és així ja que si el temps entre alimentacions és massa petit la capa superficial es manté molt humida o amb aigua superficial que no percola i el sistema no incrementa el rendiment.

Els temps òptims obtinguts per a les espessors de 0,2, 0,4 i 0,8m són respectivament de 2,5, 10 i 40 dies (Figura 52) en l'apartat següent es tracten aquestes dades per obtenir una llei que relacioni el període òptim i l'espessor de la capa de fangs.

Tractament dades Case Study

De les derivades es pot deduir que les variables termopluiomètiques tenen un efecte cabdal en la magnitud de la deshidratació, però no en la seva distribució temporal, per tant, els criteris d'operació pel que fa a temps entre alimentacions s'han de basar principalment en l'espessor de la capa de fangs que sí que té un efecte important en la distribució temporal de la deshidratació (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

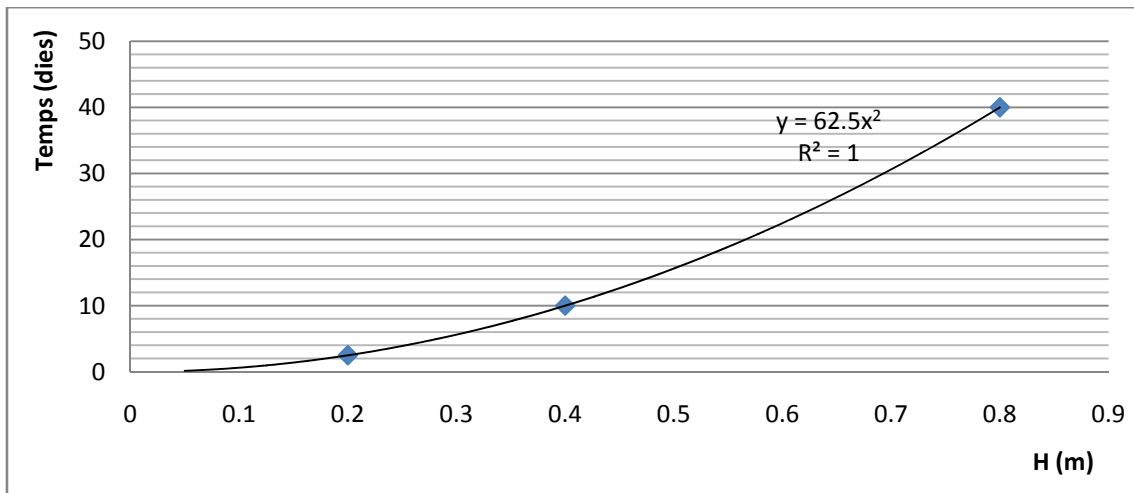


Figura 53. Correlació període òptim d'alimentació, espessor de la capa de fangs.

S'obtenen valors de T òptims en funció de H segons la relació (Eq. 23):

$$T = 62,5 \cdot H^2 \tag{Eq. 23}$$

T Temps entre alimentacions (dies)

H Espessor capa de fangs (metres)

Amb la funció inversa (Eq. 23) obtenim valors de H en funció de T adaptats al calendari setmanal (Taula 6):

$$H = 0,126 \cdot \sqrt{T} \tag{Eq. 23}$$

| Temps (dies) | H (m) |
|--------------|-------|
| 1 | 0,126 |
| 3,5 | 0,237 |
| 7 | 0,335 |
| 14 | 0,473 |
| 28 | 0,669 |

Taula 6. Altura H per a la qual la T donada és òptima.

A partir d'aquesta relació s'obtenen els següents temps entre alimentacions (Taula 7):

| H (m) | Temps (dies) |
|-----------|--------------|
| 0-0,25 | 1 |
| 0,25-0,35 | 3,5 |
| 0,35-0,5 | 7 |
| 0,5-0-6 | 14 |
| >0,6 | 28 |

Taula 7. Temps òptims per als diferents períodes de funcionament.

Aquests valors corresponen al temps màxim entre alimentacions que garanteix un rendiment del sistema òptim (reducció de volum de fang per dia) temps més curts no incrementen el rendiment, però tampoc el redueixen, com s'ha explicat anteriorment el que passa quan es redueix el temps per sota de l'òptim és que es queda una capa d'aigua a la superfície o la part superior de la capa de fangs amb una alta humitat de manera permanent, temps entre alimentacions més llargs que l'òptim sí que redueixen el rendiment del sistema.

No és convenient que la part superficial de l'aiguamoll tingui una gran humitat o aigua estancada ja que impedeix la formació d'esquerdes que afavoreixen el drenatge i l'entrada d'oxigen que no afecta la deshidratació, però intervé en l'estabilització de la fracció orgànica.

A partir d'aquesta periodificació de les alimentacions (Taula 7) i la deshidratació obtinguda amb el *Case Study* per aquests períodes es calculen les deshidratacions entre en el període d'alimentació (Taula 8), el volum d'alimentació (Taula 9) i el rendiment del sistema en mil·límetres de fang tractat al dia (Taula 10).

| Deshidratació (%/alimentació) | H(m) | EVT (mm/dia) | | |
|-------------------------------|------|--------------|---------|---------|
| | | 2.5 | 8.6 | 14.5 |
| 1 dia | 0,05 | 1,5424 | 2,8475 | 4,1099 |
| | 0,15 | 3,2707 | 5,8243 | 8,2941 |
| | 0,25 | 3,1627 | 5,3024 | 7,3721 |
| 3,5dies | 0,25 | 5,9987 | 10,7662 | 15,3774 |
| | 0,3 | 6,1505 | 10,8932 | 15,4805 |
| | 0,35 | 6,1627 | 10,7051 | 15,1235 |
| 7 dies | 0,35 | 8,4625 | 15,1974 | 21,7114 |
| | 0,4 | 8,6607 | 15,4131 | 21,9441 |
| | 0,5 | 8,673 | 15,1116 | 21,339 |
| 14 dies | 0,5 | 11,9974 | 21,5324 | 30,7549 |
| | 0,55 | 12,2083 | 21,7726 | 31,0233 |
| | 0,6 | 12,3009 | 21,7864 | 30,9609 |
| 28 dies | 0,6 | 16,0395 | 29,027 | 41,5887 |
| | 0,7 | 16,925 | 30,3947 | 43,4228 |
| | 0,8 | 17,3215 | 30,8262 | 43,8882 |
| | 0,9 | 17,4177 | 30,6842 | 43,5157 |

Taula 8. Deshidratació en % de pèrdua d'humitat en el període.

| Deshidratació (mm/alimentació) | H(m) | EVT (mm/dia) | | |
|-----------------------------------|------|--------------|----------|-----------|
| | | 2.5 | 8.6 | 14.5 |
| 1 dia | 0,05 | 0,7712 | 1,42375 | 2,05495 |
| | 0,15 | 4,90605 | 8,73645 | 12,44115 |
| | 0,25 | 7,90675 | 13,256 | 18,43025 |
| 3,5dies | 0,25 | 14,99675 | 26,9155 | 38,4435 |
| | 0,3 | 18,4515 | 32,6796 | 46,4415 |
| | 0,35 | 21,56945 | 37,46785 | 52,93225 |
| 7 dies | 0,35 | 29,61875 | 53,1909 | 75,9899 |
| | 0,4 | 34,6428 | 61,6524 | 87,7764 |
| | 0,5 | 43,365 | 75,558 | 106,695 |
| 14 dies | 0,5 | 59,987 | 107,662 | 153,7745 |
| | 0,55 | 67,14565 | 119,7493 | 170,62815 |
| | 0,6 | 73,8054 | 130,7184 | 185,7654 |
| 28 dies | 0,6 | 96,237 | 174,162 | 249,5322 |
| | 0,7 | 118,475 | 212,7629 | 303,9596 |
| | 0,8 | 138,572 | 246,6096 | 351,1056 |
| | 0,9 | 156,7593 | 276,1578 | 391,6413 |

Taula 9. Deshidratació en mm de pèrdua d'humita en el període.

| Deshidratació (mm/dia) | H(m) | EVT (mm/dia) | | |
|---------------------------|------|--------------|---------|---------|
| | | 2.5 | 8.6 | 14.5 |
| 1 dia | 0,05 | 0,7712 | 1,4238 | 2,0550 |
| | 0,15 | 4,9061 | 8,7365 | 12,4412 |
| | 0,25 | 7,9068 | 13,2560 | 18,4303 |
| 3,5dies | 0,25 | 4,2848 | 7,6901 | 10,9839 |
| | 0,3 | 5,2719 | 9,3370 | 13,2690 |
| | 0,35 | 6,1627 | 10,7051 | 15,1235 |
| 7 dies | 0,35 | 4,2313 | 7,5987 | 10,8557 |
| | 0,4 | 4,9490 | 8,8075 | 12,5395 |
| | 0,5 | 6,1950 | 10,7940 | 15,2421 |
| 14 dies | 0,5 | 4,2848 | 7,6901 | 10,9839 |
| | 0,55 | 4,7961 | 8,5535 | 12,1877 |
| | 0,6 | 5,2718 | 9,3370 | 13,2690 |
| 28 dies | 0,6 | 3,4370 | 6,2201 | 8,9119 |
| | 0,7 | 4,2313 | 7,5987 | 10,8557 |
| | 0,8 | 4,9490 | 8,8075 | 12,5395 |
| | 0,9 | 5,5985 | 9,8628 | 13,9872 |

Taula 10. Deshidratació en mm de pèrdua d'humita al dia (rendiment del sistema).

A partir d'aquesta última taula i mitjançant regressions per mínims quadrats es busca una relació logarítmica per a cada evapotranspiració de les zones climàtiques i temps entre alimentacions. La correlació de les regressions és bona $R^2 > 0,999$ per a $T > 1$ dia i $R^2 > 0,986$ per $T = 1$.

A partir d'un ajust per mínims quadrats de les equacions anteriors en funció d' EVT obtenim una equació per cada període d'alimentació (Taula 11) que proporciona la disminució de volum a partir de les variables EVT(mm/dia) i H(m). La correlació de les regressions és perfecta $R^2 = 1$ per a tots els T.

Com que les alimentacions tenen una baixa proporció de sòlids es considera que el volum de l'alimentació (Taula 9) pot ser igual a la disminució de volum a causa de la deshidratació:

| Període T (dies) | Volum deshidratat = volum alimentació (mm/alimentació) |
|------------------|---|
| 1 | $A = (0,477 \cdot EVT + 3,132) \cdot \ln H + 1,537 \cdot EVT + 9,736$ |
| 3,5 | $A = (1,964 \cdot EVT + 14,55) \cdot \ln H + 4,682 \cdot EVT + 30,25$ |
| 7 | $A = (3,946 \cdot EVT + 28,72) \cdot \ln H + 8,018 \cdot EVT + 50,03$ |
| 14 | $A = (8,301 \cdot EVT + 55,01) \cdot \ln H + 13,58 \cdot EVT + 78,45$ |
| 28 | $A = (16,80 \cdot EVT + 107,2) \cdot \ln H + 21,40 \cdot EVT + 118,5$ |

Taula 11. Volums d'alimentació per a cada T en funció de H i EVT.

Si es necessita trobar el volum d'alimentació per altres períodes diferents als donats es pot utilitzar la fórmula general que correlaciona les cinc obtingudes també mitjançant un ajust per mínims quadrats (Eq. 24). La correlació de les regressions és bona, $R^2 > 0,992$:

$$A = T \cdot [(0,596 \cdot EVT + 3,863) \cdot \ln(H) + (-0,014 \cdot T + 1,239) \cdot EVT + (-0,014 \cdot T + 7,638)] \quad (\text{Eq. 24})$$

On:

- A és el volum d'alimentació (mm)
- H és l'altura de la capa de fang (m)
- T és el període entre alimentacions (d)
- EVT és l'evapotranspiració (mm/dia)

Conclusions

A partir del treball realitzat en el present document s'arriba a les següents conclusions:

S'ha desenvolupat un model numèric capaç de simular el comportament d'un sistema d'aiguamolls construïts pel que fa a l'evolució d'humitats en el temps sempre i quan aquestes no atenyin valors excessivament petits: humitat < 50% volumètric aprox. Les variables d'entrada del model són l'altura de la capa de fangs, període entre alimentacions i evapotranspiració (aquesta s'obté de les variables meteorològiques).

A partir dels resultats del model es determina que el temps òptim que maximitza el rendiment és funció quadràtica de l'altura de la capa de fangs, també es determina el volum de l'alimentació que iguala l'aigua perduda durant el període entre alimentacions, aquesta és funció del temps, espessor i evapotranspiració. S'obtenen les expressions de manera numèrica en ambdós casos

Amb la funció que relaciona temps i altures de la capa de fang es proposa una periodificació de les alimentacions compatible amb els horaris laborals, s'obtenen així uns intervals del valor de l'espessor de la capa, per a cadascun dels quals es dona un període i un volum d'alimentació.

Recomanacions

Els resultats del model han permès obtenir equacions que correlacionen els períodes i volums d'alimentació amb les variables d'entrada, per tal de brindar una eina útil als operadors de les plantes es proposen uns intervals d'espessor als quals correspon un període i volum d'alimentació.

| H (m) | Període T (dies) | Volum deshidratat = volum alimentació (mm/alimentació) |
|-----------|------------------|---|
| 0-0,25 | 1 | $A = (0,477 \cdot EVT + 3,132) \cdot \ln H + 1,537 \cdot EVT + 9,736$ |
| 0,25-0,35 | 3,5 | $A = (1,964 \cdot EVT + 14,55) \cdot \ln H + 4,682 \cdot EVT + 30,25$ |
| 0,35-0,5 | 7 | $A = (3,946 \cdot EVT + 28,72) \cdot \ln H + 8,018 \cdot EVT + 50,03$ |
| 0,5-0,6 | 14 | $A = (8,301 \cdot EVT + 55,01) \cdot \ln H + 13,58 \cdot EVT + 78,45$ |
| >0,6 | 28 | $A = (16,80 \cdot EVT + 107,2) \cdot \ln H + 21,40 \cdot EVT + 118,5$ |

Taula 12. Criteris d'operació, període i volum d'alimentació.

Bibliografia

- [1] Agència Catalana de l'Aigua, 1995. Programa d'actuacions per a la gestió dels fangs de depuració d'aigües residuals urbanes.
- [2] Chapra, Steven C., 2007. Métodos numéricos para ingenieros .México, McGraw-Hill, 5a ed.
- [3] Giraldi, D., Iannelli R., 2009. Short-term water content analysis for the optimization of sludge dewatering in dedicated constructed wetlands (reed bed systems) *Desalination*, 246 (1-3), p.92, Sep 2009
- [4] De Maeseener, J.L., 1997. Constructed wetland for sludge dewatering. *Water Science and Technology* 35 (5), 279–285.
- [5] Diputació de Barcelona, 2008. La gestió de fangs de les estacions depuradores d'aigües residuals.
- [6] Uggetti, E., Llorens, E., Pedescoll, A., Ferrer, I., Castellnou, R., García, J., 2009. Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: Characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. *Bioresource Technology* 100 (2009) 3882–3890
- [7] Behzad, F., Khabbaz, H., Indraratna, B., 2009. Parametric studies on bioengineering effects of treeroot-based suction on ground behaviour.
- [8] Hoffman, J.D., 2001. Numerical methods for engineers and scientists. New York, (2001) 2a ed.
- [9] Jimenes, J.A., de Justo Alpañes, J.L., 1975. Geotecnia y cimientos, vol. 1: propiedades de los suelos y de las rocas. Madrid, 2a ed.
- [10] Noumsi, K., I. M., Amougou, A., Bemmo, N., Strauss, M., Troesch, S., Ntep, F., Tsama Njitat, V., Ngoutane Pare, M., Koné, D., 2006. Potentials of sludge drying beds vegetated with *Cyperus papyrus* L. and *Echinachloa pyramidakis* (LAM.) Hitchc. & Chase for faecal sludge treatment in tropical regions. In: Proceedings of the Conference on The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. Lisbon, Portugal. Dias V. and Vymazal J. (ed).
- [11] Konnerup, D., Koottatep, T., Brix, H., 2009. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecol. Eng.* 35, 248–257.
- [12] Obolewski, K., Skorbilowicz, E.B., Skorbilowicz, B., Glin'ska-Lewczuk, K., Astel, A.M., Strzelczak, A., 2011. The effect of metals accumulated in reed (*Phragmites australis*) on the structure of periphyton. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74 (2011) 558–568.
- [13] Liénard, A., Duchène Ph., Gorini, D. 1995. A study of activated sludge dewatering in experimental reed-planted or unplanted sludge drying beds. *Water Science and Technology* 32 (3), 251-261.
- [14] Melidis, P., Gikas, G.D., Akrotos, C.S., Tsihrintzis, V.A., 2010. Dewatering of primary settled urban sludge in a vertical flow wetland. *Desalination* 250, 395–398.

- [15] Panuvatvanich A, Koottatep T, Koné D., 2009. Hydraulic behaviour of vertical-flow constructed wetland under different operating conditions. *Environ Technol.* Sep;30(10):1031-40.
- [16] Mujeriego, R., Sala, Ll., 1994. Biosòlids i aigües depurades com a recursos. Universitat Politècnica de Catalunya, Consorci de la Costa Brava, Girona.
- [17] Stefanakis, A.I., Tsihrintzis, V.A., 2009. Performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands treating simulated municipal wastewater: effect of various design parameters. *Desalination* 248, 753–770.
- [18] Tao, T., Peng, X.F., AySu, Lee, A.D.-J., Mujumdar, A.S., 2008. Modelling convective drying of wet cake. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers* 39. 287–290
- [19] Troesch, S., Liènard, A., Molle, P., Merlin, G., Esser, D., 2008. Sludge drying reed beds: a full and pilot-scales study for activated sludge treatment. In: *Processing of Conference: 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. 1–7 November, Indore, India.
- [20] Vincent, J., Molle, P., Wisniewski, C., Lienard, A. 2010. Sludge drying reed beds for septage treatment: towards design and operation recommendations. *Proceeding of Conference: 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. 4-8 October. Venice (Italy).
- [21] Von Sperling, M., Goncalves, R.F., 2007. Sludge characteristics and production. In: *Cleverson, V.A., von Sperling, M., Fernandes, F. (Eds.), Sludge Treatment and Disposal*. IWA Publishing, London, UK.
- [22] Lambe, W., Withman, R.V., 1972. *Mecánica de suelos*. México, Limusa-Wiley.
- [23] Wei, Y., Van Houten, R.T., Borger, A.R., Eikelboom, D.H., Fan Y. 2003. Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment. *WaterResearch* **37**(18),4453-4467.
- [24] Yubo, C., Tieheng, S., Lihui, Z., Tingliang, J., Liping, Z., 2008. Performance of wastewater sludge ecological stabilization. *Journal of Environmental Sciences* 20, 385–389.

Annexes

Codi model íntegre:

parabolica.m

```

a=0;
b=1;
m=60
Ax=(b-a)/m;
x=[a:Ax:b];

H=0.4
Cv=3e-8
Tau=H^2/Cv;

temps= 3,5
tfin = temps/Tau*86400
npast=30
At=tfin/npast;
t=[0:At:npast*At];

n0=0.86
e0=n0/(1-n0);
Em=40000
av=(1+e0)/Em
gamma=25000;
Sinf=1/Em*H^2/2*(gamma*(1-n0)+9800*n0)
qevt=8,6
q=(qevt*0.5/1000*Tau/Sinf)/86400

% condició inicial i condicions de contorn
f=x;
g=0;
h=0;

u=parabolica_im(a,b,m,At,npast,f,g,h,H,Cv,Tau,q);
'Resolución de u_t=u_{xx} con el método implícito';

% canvi de base per passar de sobrepressions a humitat
v=(Sinf/n0/H)*u/mean(u(0.3*m:0.5*m,1))+(1-Sinf/n0/H);

% càlcul de la derivada
sd=100*n0*mean(v(2:fix(0.1*m),:));

deriv=0;
for nr = 1:npast
deriv(nr)=(sd(nr)-sd(nr+1))/At;
end
deriv(npast+1)=deriv(npast);

```

```

% càlcul de la mitjana de la derivada en funció de T
integ=0;
for nr = 1:npast
integ(nr)=sum(deriv(1:nr)/nr);
end
integ(npast+1)=integ(npast);

% Vectors de resultats
b_fu=[deriv;integ];
b_cases=n0*100*mean(v);
b_valid=n0*100*mean(v(fix(0.3*m):fix(0.5*m),:));

b_tr=t* Tau/3600/24;
AW=b_cases(1)-b_cases(npast)

% Presentació dels resultats en gràfiques
figure(1),clf

subplot(1,2,1)
surf(t,x,u, axis([0 npast*At a b min(u(:,npast)) max(u(:,1))+0.1])
xlabel('t'), ylabel('x'), zlabel('u')
axis square

subplot(1,2,2)
plot(t,mean(u))
xlabel('t'), ylabel('u')
axis square, axis([0 At*npast min(u(:,npast)) max(u(:,1))])
title('evolució en el temps mitjana en tota la profunditat, sobrepressions')

figure(2),clf
plot(b_tr,n0*100*mean(v(fix(0.3*m):fix(0.5*m),:)))
xlabel('temps(d)'), ylabel('humitat(% vol.)')
axis normal, axis([0 temps 45 85])
title('evolució en el temps en una profunditat promig donada (30-50%) humitat')

figure(3)
plot(b_tr,n0*100*mean(v))
xlabel('temps(d)'), ylabel('humitat(% vol.)')
axis normal, axis([0 temps 45 85])
title('evolució en el temps mitjana profunditat humitat')

figure(4)
plot(b_tr,b_fu)
xlabel('temps(d)'), ylabel('derivada humitat (%/dia)')
axis normal, axis([0 temps 0 max(deriv)])
title('derivada remoció humitat sobre el 10% superior')

```

parabolica_im.m

```

function U = parabolica_im(a,b,m,At,npast,f0,g0,h0,H,Cv,Tau,q)
% Resolució mitjançant un esquema implícit en diferències finites d'un pas de la edp parabòlica %u_t =
u_xx+q amb x en (a,b), amb condicions de contorn de Dirichlet.
%U = parabolica_im(a,b,m,At,npast,f0,g0,h0) genera una matriu que emmagatzema la solució %en cada
pas de temps en una columna.

%Comprovació de les condicions inicials i de contorn
[n0 m0] = size(f0);
if((n0==1)&(m0==1))
    f = f0*ones(1,m+1);
elseif((n0==1)&(m0==m+1))
    f = f0;
else
    error('Error en la dimensió del vector de CI.')
end
[n0 m0] = size(g0);
if((n0==1)&(m0==1))
    g = g0*ones(1,npast+1);
elseif((n0==1)&(m0==npast+1))
    g = g0;
else
    error(strcat('Error en les CC en x=',num2str(a)))
end
[n0 m0] = size(h0);
if((n0==1)&(m0==1))
    h = h0*ones(1,npast+1);
elseif((n0==1)&(m0==npast+1))
    h = h0;
else
    error(strcat('Error en les CC en x =',num2str(b)))
end

%càlcul de les constants i definició i descomposició de la matriu A
Ax = (b-a)/m;
r = At/(Ax^2);
unos = ones(m-1,1);
A = spdiags([-r*unos (1+2*r)*unos -r*unos], -1:1, m-1, m-1);
[LA,UA]=lu(A);

%condicions inicials i de contorn en la matriu solució
U = zeros(m+1,npast+1);
U(:,1) = f;
U(1,:) = g;
U(m+1,:) = h;

%Bucle per als passos de temps
for n = 1:npast
    t = U(2:m,n);
    t(1) = t(1) + r*g(n+1);
    t(m-1) = t(m-1) + r*h(n+1);
    U(2:m,n+1) = UA\((LA\t)-q*At;
%En el cas d'utilitzar un vector en el terme font: U(2:m,n+1) = UA\((LA\t)-q(n)*At;
end
    
```