

Influència del context geològic i hidrogeològic en l'eficiència energètica dels sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia



Memòria de Projecte de Fi de Carrera
Llicenciatura de Ciències Ambientals

Presentat per:
Albert Gomà i Roca

Dirigit per:
Dr. Albert Folch i Sancho

Bellaterra, setembre 2010

Continguts

Agraïments

1. Introducció	7
1.1. Aproximació als sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia	8
1.2. Antecedents i objectius	10
1.3. Metodologia de treball	12
1.4. Marc normatiu	13
2. Marc conceptual i estat actual dels sistemes de GSHP	17
2.1. Sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia	18
2.1.1. Energia geotèrmica de molt baixa entalpia i el seu caràcter renovable	18
2.1.2. Bombes de calor i energia geotèrmica	21
2.1.3. Fonaments d'una bomba de calor	21
2.1.4. Eficiència energètica i ecoeficiència d'una bomba de calor geotèrmica	23
2.1.5. Funcionament d'un sistema geotèrmic de GSHP	28
2.1.6. Tipus de sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia	31
2.1.7. Sostenibilitat dels sistemes de GSHP	38
2.1.8. Situació actual i perspectives de creixement dels sistemes geotèrmics de GSHP a Espanya	42

2.2. Importància del context geològic i hidrogeològic	48
2.2.1. Propietats tèrmiques	48
2.2.2. Propietats hidrogeològiques	58
3. Casos d'estudi	73
3.1. Metodologia	74
3.2. Resultats i Discussió	76
3.2.1. Evolució de la càrrega tèrmica anual	77
3.2.2. Zona de la Riera de Santa coloma de Farners	78
3.2.3. Zona d'Olot	99
3.2.4. Estudi de l'efecte de la temperatura i el nivell hidràulic en l'eficiència dels col·lectors de calor	104
3.3. Conclusions	111
4. Propostes de millora	115
5. Bibliografia	117
6. Annexos	123

Agraïments

He d'agrair al Dr. Albert Folch i Sancho, de la Unitat de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia, el fet d'haver-me donat la oportunitat de desenvolupar aquest projecte, ahora que aprofundia els meus coneixements en el camp de la hidrogeologia. Més concretament, li he de regradar, entre d'altres, la idea inicial del projecte, la valuosa ajuda en la cerca bibliogràfica i les llargues tutories comentant el desenvolupament del treball.

D'altra banda, també dono les gràcies al Dr. Joan Bach i Plaza, cap de la Unitat de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia, per haver-me facilitat les dades i informacions, del DIVER situat a la Garrotxa, així com per haver confiat amb mi per al seu tractament.

No puc oblidar l'aportació gràfica de l'Anna Tarafa i Mata, hidrogeòloga de l'empresa INYPSA. També he de fer esment a les facilitats que he rebut d'aquesta persona en la conciliació temporal del present projecte amb les pràctiques en empresa realitzades a l'entitat esmentada.

Finalment, aquest treball no sols ha estat possible gràcies a les persones que hi han pres un paper actiu, sinó que darrera de tot plegat apareix molta gent a qui, segurament, serà difícil resumir en aquestes quatre línies. En aquest sentit, no puc deixar de banda a mons pares, en els que hi he trobat un suport incondicional en cada decisió que he pres al llarg de la vida. Tanmateix, he d'agrair als meus amics el caliu que m'han deixat sentir en els moments més difícils d'aquests últims anys.

A tots vosaltres, les meves més sinceres gràcies.

1. Introducció

1.1. Aproximació als sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia

És ben sabut que l'elevat consum d'energia (Figura 1.1) associat a les activitats humanes, així com la impossibilitat de sostenir-lo a llarg termini representen, actualment, dues de les preocupacions més importants a nivell ambiental i econòmic.

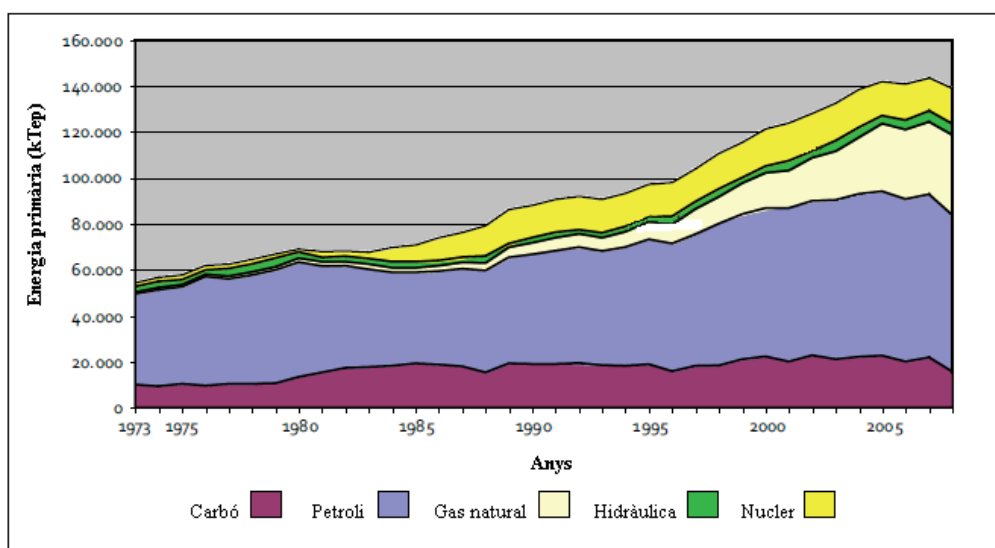


Figura 1.1: Evolució de la demanda d'energia primària entre les dècades 1970-2000 a Espanya. Adaptat d'Espanya, 2008.

Tan és així que, des dels últims anys ençà, s'ha fet cada cop visible l'escassetat de recursos, així com els conflictes socials, econòmics i ambientals que se'n deriven. En aquest sentit, a poc a poc, es comencen a percebre els esforços per modificar els patrons de consum energètic de les societats.

Tanmateix, aquests avenços no només es fan notar en relació als hàbits de consum sinó que, a mida que passa el temps, s'amplien els horitzons existents en l'obtenció d'energia. Així, els exemples per excel·lència que il·lustren aquesta situació són, entre d'altres, l'energia hidràulica, l'eòlica i la solar. De totes maneres, tot i ser els tres grans puntals de les energies renovables, aquestes sols representaven, respectivament, un 1,4%, un 1,9% i un 0,3% del còmput total de l'energia primària consumida a Espanya durant l'any 2008.

De la mateixa manera que en els casos anteriors, l'energia geotèrmica constitueix un altre tipus de recurs renovable tot i que, en general, gaudeix d'un menor grau d'implantació territorial. De les múltiples vessants que engloba aquest tipus d'energia, probablement la més coneguda sigui l'energia geotèrmica d'alta temperatura, és a dir, aquella que s'aprofita directament per a la generació d'electricitat. No obstant, l'energia calorífica procedent de la terra engloba un gran ventall d'aprofitaments.

En aquest sentit, l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia es defineix com la calor emmagatzemada, a molt baixa concentració, en els primers metres de l'escorça terrestre. Tenint en compte la modesta temperatura (5-25°C) que caracteritza aquesta calor, és imprescindible, per tal de fer-la aprofitable, l'ús de dispositius mecànics addicionals. Així doncs, les bombes de calor geotèrmiques (d'ara endavant GSHP, de l'anglès Ground Source Heat Pump) permeten, mitjançant uns col·lectors de calor subterranis, processar aquesta calor per, més tard, invertir-la en la climatització dels habitatges i en l'escalfament d'aigua sanitària domèstica. Aquí cal tenir en compte que en el global de la Comunitat Europea, el 40% de la demanda energètica es consumeix, conjuntament, en el sector residencial i terciari. A banda d'això, els consums energètics d'aquests dos sectors són els que han experimentat, en els darrers anys, un creixement més marcat

Essencialment, l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia, troba els seus orígens en dues fonts de calor diferents. Una és el flux de calor intern de la terra ($4,42 \cdot 10^{13} \text{W}$) i la segona, la més important, és l'energia procedent del sol ($7,87 \cdot 10^{16} \text{W}$). Si bé en termes absoluts ambdues fonts representen quantitats ingents d'energia, el gran volum de la terra, així com l'elevada capacitat calorífica dels materials que la conformen comporten una capacitat molt important de dissipació de l'energia. Aquest fet justifica la modesta concentració de l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia en el si de l'escorça terrestre.

El fet que els sistemes geotèrmics de bomba de calor tinguin la capacitat de generar un poder calorífic entre 3 i 5 vegades superior a l'energia consumida, pot situar-los, davant un context normatiu cada cop més restrictiu des del punt de vista energètic, com una bona alternativa als sistemes de calefacció/refrigeració convencionals. Així, amb el Protocol de Kyoto com a precedent, la Directiva Europea 2002/91/CE, referent a l'eficiència energètica dels edificis, en vigor des de l'any 2003, exigeix el compliment d'uns estàndards mínims d'eficiència energètica en el sector residencial i terciari.

Aquests valors de referència no són iguals per a qualsevol emplaçament, sinó que depenen de les característiques climàtiques de cada zona.

Finalment, aquests sistemes tan àmpliament implantats als Estats Units i al nord d'Europa, avui en dia, tot just s'estan descobrint als països més meridionals del vell continent. Si bé en alguns edificis públics, com al nou Hospital de Mollet del Vallès, ja s'hi aprecia una certa influència, a nivell privat, on realment es pot desenvolupar el potencial d'aquests sistemes, encara queda molt camí a recórrer en comparació amb els països més septentrionals.

1.2. Antecedents i objectius

El primer sistema de refrigeració basat en els principis d'una bomba de calor neix l'any 1824 quan el físic francès Nicolas Carnot argumenta, contra les lleis de la termodinàmica, que mitjançant el treball mecànic es pot transferir la calor d'una zona freda a una altra de més càlida. Més tard, just a l'equador del segle XIX, William Thomson (Lord Kelvin) expressa la possibilitat de revertir el procés de refrigeració de Carnot, convertint-lo així, també en un sistema d'escalfament. En aquest moment s'introdueix, per primer cop, el concepte de bomba de calor (ECONAR, 1993).

Després de dècades de perfeccionament i ja en el camp de la geotèrmia, la primera GSHP s'instal·la a Suïssa, l'any 1912, de la mà de l'enginyer Heinrich Zoelley. A partir d'aquí, aquests sistemes s'extenen, gradualment, per tot el centre-nord d'Europa i pels Estats Units.

A mitjans del segle XX, Robert C. Webber, natural d'Indianàpolis, als Estats Units, dissenya el primer sistema d'emmagatzematge tèrmic en el subsòl (d'ara endavant UTES, de l'anglès Underground Thermal Energy Storage). Aquest inventor americà reaprofitava la calor emmagatzemada en el seu celler per escalfar la resta de l'habitatge. Poc després, construeix el que probablement és el primer sistema tancat de circulació directa amb clorofluorocarbons (d'ara endavant CFCs) com a refrigerant. Cal tenir en compte que l'any 1989, arrel del Protocol de Montreal signat l'any 1987, es prohibeix

l'ús d'aquest grup d'haloalcans a causa dels efectes adversos que presenten en la capa d'ozó.

Actualment, els treballs referents als sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia es divideixen en tres branques diferents. En aquest sentit, els esforços se centren en la divulgació, l'optimització i la modelització i la cerca de nous tipus d'aprofitaments geotèrmics.

Donat que aquests sistemes pateixen un notable grau de desconeixença, avui apareixen nombrosos documents que engloben total o parcialment el marc conceptual i el transmeten d'una forma clara i entenedora (Banks, D., 2008; Clauser, C., 2006; Florides, G., & Kalogirou, S., 2006; NRCan, 2005).

D'altra banda, també se centra l'atenció en la millora dels dissenys de GSHP existents. Per aquest motiu, es treballa en l'optimització dels materials i la modelització del seu comportament en situacions reals (Chow, T., et al., 2004; Demir, H., et al., 2009; Rafferty, K., et al., 1999; Sanaye, S., et al., 2009; Zhao, Y., et al., 2003).

Finalment, tot i ser una tecnologia amb més de mig segle d'antiguitat, els sistemes de UTES, acaparen les últimes investigacions en l'àmbit de la geotèrmia de molt baixa entalpia (Kabus, F., & Seibt, P., 2000; Zhang, H.F., et al., 2007).

Per tant, amb els anteriors estudis com a precedents, l'objectiu primordial d'aquest treball és avaluar l'efecte del context geològic i hidrogeològic en l'eficiència energètica dels sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia.

Més específicament, aquest objectiu es divideix en tres branques d'estudi diferents. Així doncs, s'analitza quantitativament l'efecte de les variacions del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua subterrània en l'eficiència de l'intercanvi calorífic entre el medi i el col·lector de calor del complex geotèrmic.

En segon terme, és pretén estudiar les diferències de rendiment energètic en funció dels paràmetres tèrmics (conductivitat tèrmica i capacitat calorífica) i hidrogeològics (permeabilitat i porositat) de la zona de treball, relacionant sempre aquestes alteracions amb el context geològic.

Paral·lelament, es busca corroborar la relació existent entre els episodis de pluja i les variacions de nivell i temperatura de l'aigua que experimenten els aqüífers després d'un fenomen meteorològic d'aquest tipus.

Finalment, aquest document ha de servir per comprendre i adquirir els fonaments conceptuals bàsics que envolten els sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia.

1.3. Metodologia de treball

Deixant de banda aquest primer bloc de conceptes introductoris, el present document s'estructura en dos grans capítols ben diferenciats, però que alhora mantenen una estreta relació entre ells.

Així doncs el primer d'ells, fa referència al marc conceptual dels sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia. Dividit en dos punts, en primer lloc es destaca la presentació detallada del funcionament, dels tipus, de l'eficiència energètica i del grau de sostenibilitat dels complexos geotèrmics que són objecte d'estudi. Més tard, aquest primer bloc, es conclou amb un repàs dels paràmetres hidrogeològics i tèrmics del compartiment geològic. En aquest mateix apartat, també s'exposen les lleis físiques que expliquen el transport de calor i d'aigua subterrània.

Per tant, el marc conceptual que envolta els sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia es redacta en base a una intensa recerca bibliogràfica, que es realitza durant les etapes inicials del projecte.

Acte seguit, en aplicació dels conceptes adquirits en el primer capítol, es presenten els casos d'estudi. Tal i com el seu nom indica, aquí s'estudia l'efecte de diferents contextos geològics i hidrogeològics reals en el funcionament i l'eficiència dels col·lectors de calor subterranis. Més concretament, són quatre les situacions d'estudi, totes elles situades a Catalunya, tres s'emmarquen a la comarca gironina de La Selva i una a La Garrotxa. Al final d'aquest punt es reserva un espai per a l'exposició de les conclusions derivades de l'anàlisi precedent.

D'aquesta manera, el desenvolupament del segon bloc esmentat es basa en l'anàlisi de les variacions màximes mensuals del nivell hidràulic, i de la temperatura de l'aigua.

Finalment, apareix un darrer apartat on es recull, en format d'annexes, bona part de la informació emprada en la realització dels càlculs. Val a dir, que per tal d'estalviar paper i espai, la totalitat dels càlculs realitzats es detallen en els annexes degudament indicats en el suport digital adjunt.

1.4. Marc normatiu

De mica en mica, la legislació en matèria energètica es va actualitzant, per tal de respondre a les noves necessitats de la societat. Tot i així, s'observa com la situació reglamentària avança sempre un pas per darrera de la realitat, fent que les eines actuals siguin, en molts casos, insuficients per abordar la complexitat del context energètic. Seguint el context global de les societats actuals, la legislació pren una estructura totalment vertical (Figura 1.2). En altres paraules, les bases sempre s'estableixen a escala mundial o europea i acte seguit, es van adoptant, paulatinament, a nivells més locals.

Així mateix, a nivell global el document de referència és el Protocol de Kyoto, firmat l'any 1997 i posteriorment ratificat per gairebé la totalitat de països. Aquest acord, està emmarcat en la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (d'ara endavant UNFCCC, de l'anglès United Nations Framework Convention on Climate Change) de l'any 1992, i té com a objectiu reduir les emissions dels sis gasos més influents en l'efecte hivernacle.

D'altra banda, l'any 2000, des d'Europa, es publica el Llibre Verd, de l'estratègia energètica que cal seguir a llarg termini a la Unió Europea (d'ara endavant UE). Essencialment, aquest document segueix tres vies d'acció: reequilibrar l'oferta energètica, implementar un sistema fiscal sòlid per regular la demanda i finalment,

afavorir l'ús d'energies renovables. Ara bé, la funció legislativa europea no s'acaba aquí.

Si bé el Llibre Verd instaura els grans postulats a seguir en matèria energètica, les Directives Europees són l'eina de referència per donar un caire vinculant a tots aquests fonaments. En aquest sentit, la Directiva Europea 2002/91/CE, referida a l'eficiència energètica dels edificis, connecta i actualitza tota la normativa anterior en matèria energètica, a fi d'adaptar-la a la nova situació definida pels documents internacionals anteriorment citats. Sense deixar de banda, la promoció de les energies renovables, aquesta Directiva enfoca la solució als problemes energètics dels edificis cap a una reducció de l'actual consum, establint així, uns estàndards mínims per als paràmetres tèrmics de les edificacions. Alguns dels textos legals que harmonitza la Directiva 2002/91/CE són les també Directives Europees 2006/32/CE i 89/106/CEE, respectivament, sobre l'eficiència i ús final de l'energia i sobre les disposicions legals, reglamentàries i administratives dels estats membres sobre els productes de construcció.

Finalment, també cal fer menció al Programa Energia Intel·ligent per a Europa 2007-2013 (d'ara endavant EIE), que substitueix a la primera fase del mateix (2003-2006) i que en el seu moment, va actualitzar altres iniciatives en l'àmbit d'eficiència energètica durant el període 1998-2002 (programes SAVE, CARNOT, ETAP...). Tot i donar-se aquesta substitució, l'EIE segueix treballant en les mateixes línies que els seus antecessors, és a dir, en la recerca de noves tècniques de construcció, l'estalvi i el desenvolupament d'energies renovables i en la promoció de sistemes de transport més nets.

Donat que la normativa de referència en matèria de medi ambient ve marcada per la Comunitat Europea (CE), els estats membres han de transposar, en la seva pròpia legislació, aquestes directives europees. En aquest cas, l'Estat Espanyol divideix el procés d'adaptació en dos moments diferents.

En primer lloc, es redacta el nou Código Técnico de la Edificación (d'ara endavant CTE), aprovat pel Real Decreto 314/2006. Posteriorment, aquest nou codi dona peu, l'any 2007, a l'elaboració del que avui en dia es coneix com el Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética. De la mateixa manera que en el cas del Llibre verd, ara però a escala estatal, aquest document identifica els

objectius de caràcter estratègic, així com el camí a seguir en la política energètica per tal d'executar-los.

En segon lloc, es culmina la transposició de la normativa europea a través del també Real Decreto 47/2007, pel que s'aprova el procediment bàsic en la certificació de l'eficiència energètica en edificis de nova construcció.

Per acabar, cal puntualitzar el fet que l'estat aglomeri les competències en matèria energètica (Capítol 3er, Articles 148 i 149 de la Constitució Espanyola) comporta la manca d'una normativa directa a nivell autonòmic.

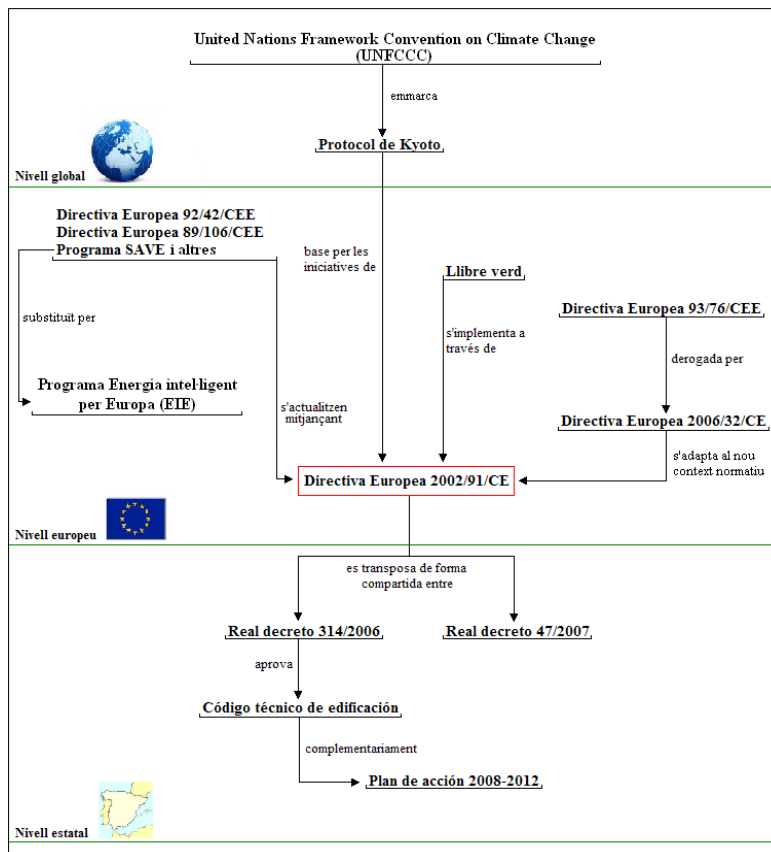


Figura 1.2: Diagrama de flux de les principals normatives en l'àmbit energètic. Elaboració pròpia.

Tot i la baixa presència de legislació a nivell autonòmic, no existeix una absència total de regulacions. Així doncs, la normativa més important que incideix en l'eficiència dels edificis a Catalunya és el Decret 21/2006 que regula l'adopció de criteris ambientals i d'ecoeficiència en els edificis. Aquesta regulació és d'aplicació directa en habitatges i

edificis públics, tant si són de nova construcció, com acabats de rehabilitar. Cal tenir en compte que la part l'eficiència energètica és només una secció del document, també fa referència a l'ecoeficiència en l'ús d'aigües, en els materials de construcció i en els residus.

A nivell hídric, ni a nivell estatal ni a nivell autonòmic, existeix una legislació específica per als sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia, especialment per als de tipus obert. Tan és així, que són pocs els països que compten amb una legislació sòlida en aquest àmbit. Tanmateix, la "Fundación para la Energía de la Comunidad de Madrid" ha publicat nombroses guies per a la correcta aplicació dels sistemes de GSHP (Llopis, G., & Rodrigo, V., 2007). Aquest fet ha situat Madrid com a la Comunitat pionera en el camp de les bombes de calor geotèrmiques.

Si bé tots els tipus de col·lectors de calor haurien d'estar regulats, els sistemes oberts, són els comporten una pressió més important sobre l'entorn. Així mateix, en els països amb un marc legal més o menys sòlid, els paràmetres més controlats són el salt tèrmic amb el que es retorna l'aigua a l'aqüífer i el cabal extret de l'aqüífer a través del pou de captació.

Sense caràcter vinculant, però amb una proposta reguladora, la guia CLIMACA, publicada l'any 2010 per l'Agència Catalana de l'Aigua, encamina un seguit de tràmits administratius per a l'aprovació de l'ús de sistemes de GSHP. Així, el document preveu l'autorització de les perforacions per part de l'administració competent. També, com a requisit constructiu, estableix el fet d'evitar contaminacions col·laterals d'altres nivells saturats. Finalment, en el cas dels col·lectors oberts, cal demanar i obtenir una concessió administrativa per explotar l'aqüífer. Aquest últim requisit és independent del cabal de la captació.

2. Marc conceptual i estat actual dels sistemes de GSHP

2.1. Sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia

En aquest subcapítol es defineixen els sistemes geotèrmics de GSHP i se'n detallen les principals característiques. Al final de la secció, es reserva un espai per conèixer la situació actual a nivell europeu d'aquests complexos geotèrmics, així com les possibilitats del seu creixement d'aquesta tecnologia a l'Estat espanyol.

Per tant, aquest punt pretén transmetre els coneixements bàsics sobre els sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia. D'altra banda es vol fer entendre aquesta tecnologia com una alternativa interessant a l'ús dels combustibles fòssils en l'àmbit de la climatització residencial i del sector terciari.

2.1.1. Energia geotèrmica de molt baixa entalpia i el seu caràcter renovable

A grans trets, l'energia geotèrmica és la calor, ja sigui sensible o latent, continguda a l'interior del planeta, així com en els seus fluids. Alimentada tant per fonts d'energia internes com externes, la terra representa un sistema d'abastament energètic molt poc explorat i de possibilitats gairebé inesgotables (Clauser, C. 2006).

Per aquest motiu, durant les últimes dècades hi ha hagut, en molts països, una forta aposta pel desenvolupament d'aquest potencial, especialment als Estats Units, Canadà i nord d'Europa.

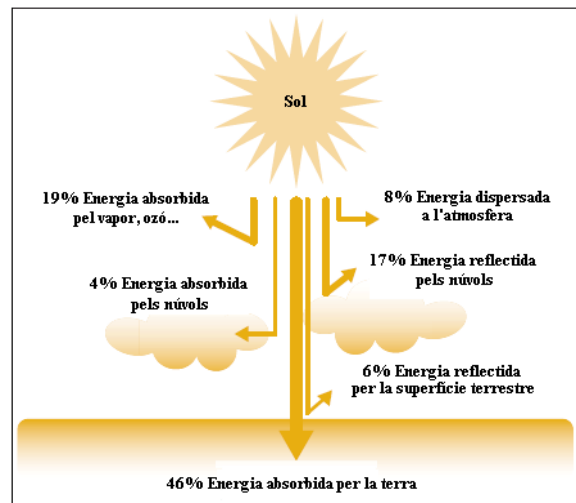


Figura 2.1: Distribució de l'energia solar incident a la terra. Adaptat de NRCan, 2005.

A causa l'heterogeneïtat física que caracteritza l'interior del planeta, la calor que s'hi emmagatzema no es troba distribuïda de forma regular, sinó que es reparteix en un gran ventall de situacions, fent que el seu aprofitament sigui, sovint, poc evident. D'aquesta manera, en funció de la forma com es manifesti tal calor seran possibles uns o altres usos (generació elèctrica, aprofitament directe de la calor...).

Si bé són múltiples les fonts que proporcionen calor a la terra, en aquest cas, l'interès se centra, sobretot, en el sol i en el flux de calor geotèrmic.

De mitjana, el planeta rep cada dia $1370 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, del quals gairebé la meitat són absorbits pel sòl i la resta són emesos, un altre cop, cap a l'exterior (Figura 2.1). Aquesta gran quantitat d'energia, s'emmagatzema en els primers metres de l'escorça terrestre en forma de calor. Ara bé, cal tenir en compte que la radiació solar no és constant al llarg de l'any, sinó que varia en funció de l'estació considerada. Conseqüentment, la temperatura atmosfèrica i de la superfície terrestre, també es veu alterada (NRCan, 2005).

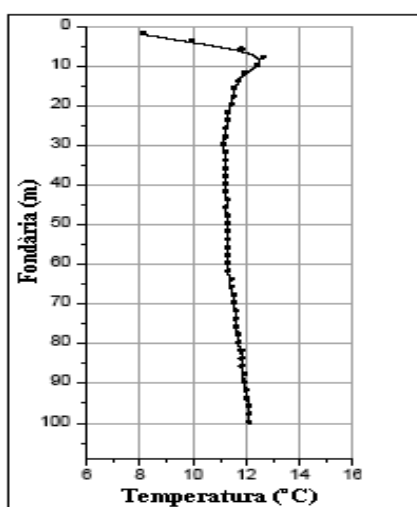


Figura 2.2: Perfil típic de temperatura vs fondària del sòl. Adaptat de SANNER, B., 2007.

Els efectes d'aquestes fluctuacions tèrmiques s'acostumen a diluir de forma exponencial en el transcurs dels primers metres de subsòl (Figura 2.2), fins que arriba un punt on la temperatura es manté pràcticament constant al llarg de l'any. En aquesta fondària la temperatura del medi és aproximadament igual a la temperatura mitjana anual de la superfície terrestre, que varia en funció de la regió climàtica del planeta. Cal tenir en compte que la profunditat on es troba tal temperatura constant és funció de la quantitat de radiació incident, així com del flux geotèrmic natural de la zona considerada (Banks, D., 2008).

A partir d'aquest punt, comença l'anomenat gradient geotèrmic, el qual és de l'ordre de 2°C a 3°C per cada 100 metres de fondària. Així mateix, donada la gran capacitat calorífica dels materials que conformen el subsòl, així com la seva modesta conductivitat tèrmica (annex A), l'energia procedent del sol, aparentment difícil d'explotar, es troba emmagatzemada a temperatures que es oscil·len entre els 5°C i

els 25°C (Taula 2.1). Justament aquest rang de temperatures dóna nom a l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia. Per les seves característiques tèrmiques, aquest recurs no és directament aprofitable, ja que prèviament ha de patir un seguit de processos de concentració. Un cop processada aquesta energia, generalment és destinada a usos residencials i del sector terciari.

Tipus de jaciment	Temperatura	Tecnologia
Molt baixa temperatura	5°C<T<25°C	Bomba de calor
Baixa temperatura	25°C<T<100°C	Ús directe de bomba de calor
Mitja temperatura	100<T<150°C	Electricitat - cicle combinat
Alta temperatura	T>150°C	Electricitat

Taula 2.1: Tipus d'energia geotèrmica en funció de la seva temperatura. Adaptat de GIROD GEOTERMIA.

Juntament amb energies com l'eòlica o la solar, l'energia geotèrmica en general és una de les energies renovables més populars, tot i estar menys desenvolupada que les seves homòlogues. En efecte, la relació de sinèrgia que s'estableix entre les fonts que l'alimenten i la gran capacitat del medi geològic per emmagatzemar calor implica que, a escala humana, es pugui considerar com una energia inesgotable.

Tot i que de forma intrínseca l'energia geotèrmica pren un caràcter renovable, la vessant que es qualifica de molt baixa entalpia, es troba envoltada per un fort debat centrat en aquesta característica. Com bé s'ha esmentat en aquest apartat, aquesta calor es troba a molt baixa concentració, fet que comporta el consum d'energia addicional per tal de fer-la útil. Tal i com es veurà més endavant, en funció de l'origen del subministrament energètic suplementari els sistemes de GSHP es tornen més o menys sostenibles.

2.1.2. Bombes de calor i energia geotèrmica

En el punt anterior s'expressa el fet que el subsòl és capaç d'emmagatzemar energia, mantenint-se així a una temperatura que volta els 15°C durant tot l'any. Partint de tal premissa, cal buscar doncs, la manera d'aprofitar aquesta calor tan poc concentrada.

Segons les lleis de la termodinàmica, la calor sempre flueix espontàniament seguint un gradient de temperatures decreixents. En altres paraules, un got d'aigua calenta que es troba a 60°C transmet la seva calor a l'entorn (suposant que l'ambient es troba a una temperatura inferior) de forma espontània fins assolir l'equilibri tèrmic amb el mateix. Per tant, a fi de mantenir la temperatura de confort en un edifici a través d'aquest tipus d'energia, no queda més remei que forçar l'entorn a cedir la seva calor (Figura 2.3). D'aquesta manera, la bomba de calor geotèrmica permet, mitjançant el treball mecànic, extreure i concentrar la calor latent del subsòl (Banks, D. 2008).

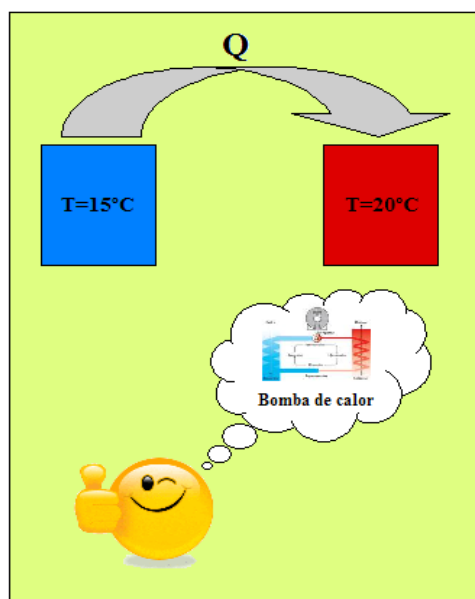


Figura 2.3: Relació entre la bomba de calor i l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia. Elaboració pròpia.

2.1.3. Fonaments d'una bomba de calor

Una bomba de calor és un dispositiu, generalment electromecànic, basat en el principi termodinàmic de canvi d'estat d'un fluid a través de la seva compressió i descompressió, amb l'objectiu d'extreure la calor d'un punt i alliberar-lo en un altre (NRCan, 2004). En altres paraules, es mobilitza una determinada quantitat de calor, mitjançant un fluid, normalment gas a temperatura ambient (25°C), que en el moment d'aportar-li una petita quantitat d'energia d'alta qualitat (electricitat, combustibles

fòssils...) és capaç de canviar el seu estat físic de líquid a gas o a l'invers. Així mateix, una bomba de calor geotèrmica segueix aquest principi en l'extracció de la calor del subsòl i en la seva posterior concentració.

Essencialment, qualsevol mecanisme d'aquest tipus es compon de quatre unitats funcionals diferents (evaporador, compressor, condensador i vàlvula d'expansió), connectades entre elles per un circuit tancat de fluid refrigerant (Figura 2.4).

Quan la bomba de calor funciona en mode calefactor, la calor transportada pel col·lector subterrani es transferida al refrigerant, fins ara en estat líquid, en el primer dels dos intercanviadors de calor, és a dir l'evaporador. El fet de rebre aquesta calor implica un augment de temperatura per al refrigerant, i consegüentment, un canvi del seu estat de líquid a gas. No obstant això, el fluid es manté a baixa pressió.

Acte seguit, el refrigerant passa per un compressor, generalment elèctric, que gràcies a l'increment de pressió provoca un important augment de la seva temperatura, complint així amb l'equació d'estat dels gasos ideals.

Més tard, el gas a elevada pressió i temperatura, expulsat pel compressor, arriba al condensador, el segon intercanviador. En aquest punt, la calor del refrigerant es transmet al fluid finalista (aire o aigua), que més tard serà utilitzat en un dels seus múltiples usos domèstics. Mentre el refrigerant es troba més calent que el fluid receptor, la calor es transfereix de forma espontània seguint la segona llei de la termodinàmica. Ara bé, a mesura que el refrigerant cedeix la calor, la seva temperatura disminueix lleugerament i condensa.

Finalment, el gas, encara a alta temperatura, arriba a l'últim compartiment abans de tancar el cicle i retornar a l'evaporador. D'aquesta manera, la vàlvula d'expansió, redueix la pressió del refrigerant, a fi de retornar-lo, de nou, a l'estat líquid (NRCan, 2002).

Si bé aquest és el procés que entén la bomba de calor com un mecanisme calefactor, el procés contrari es refereix al cicle refrigerant, per tant només cal invertir el cicle anterior. De fet, no cal commutar tot el cicle sinó que es suficient amb la inversió de la vàlvula d'expansió. Aquesta capacitat de revertir el procés és el que diferencia una bomba de calor geotèrmica d'un frigorífic convencional (NRCan, 2004).

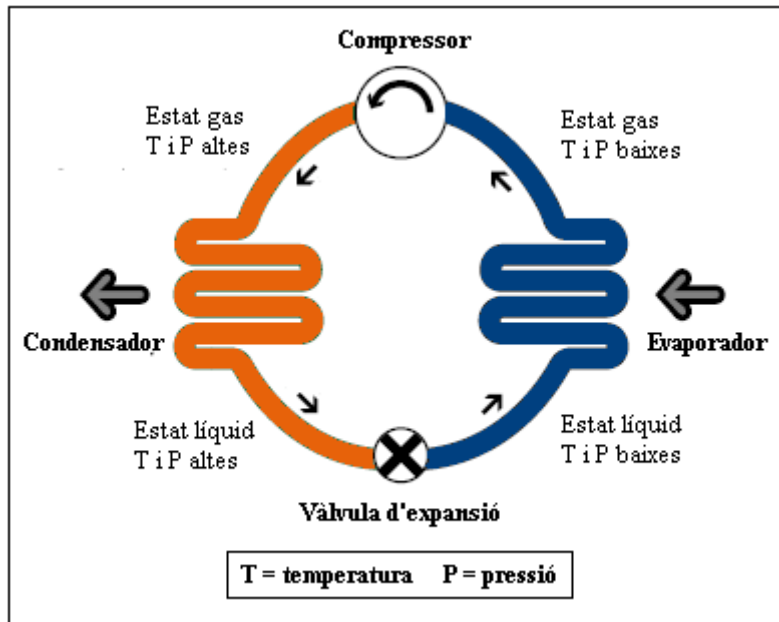


Figura 2.4: Esquema d'una bomba de calor de compressió.
Adaptat de NRCAN, 2005.

2.1.4. Eficiència energètica i ecoeficiència d'una bomba de calor

De la mateixa manera que qualsevol altre dispositiu electromecànic, una bomba de calor geotèrmica té un rendiment determinat. Entenent el terme eficiència com la forma en que el dispositiu en qüestió utilitza els recursos que se li administren, es pot qualificar aquest artefacte de molt eficient.

Teòricament, la calor despesa per una GSHP, és la suma de la calor extreta del subsòl i l'energia aportada al compressor (Banks, D., 2008). En canvi, per obtenir la mateixa quantitat d'energia, una caldera convencional ha de transformar la quantia equivalent d'energia d'alta qualitat. Per tant, es pot dir que l'alt rendiment de les GSHP recau en dos factors. D'una banda, l'ús d'un fluid amb millors propietats termodinàmiques que l'aigua permet mobilitzar una calor que per si sola és aparentment inservible. De l'altra, la capacitat d'obtenir més energia que la

subministrada en un inici per a realitzar el procés fa d'aquest sistema altament efectiu (Collins, P.A., et al., 2002).

Donat que el terme eficiència necessita ser relativitzat, existeixen nombrosos paràmetres que mostren d'una forma quantitativa i comparable l'eficiència energètica d'un dispositiu d'aquest tipus (NRCan, 2004). - Per una qüestió de nomenclatura i a fi d'evitar confusions, els següents paràmetres s'expressen en anglès –

El més important d'aquests índexs és el "Coefficient Of Performance" (d'ara endavant COP), que es defineix com la relació entre la potència (en W) mobilitzada per la bomba de calor i la potència (en W) consumida pel compressor. En altres paraules, expressa la potència retornada i susceptible de ser utilitzada per cada unitat de potència invertida. Per a les bombes de calor geotèrmiques el valor d'aquest indicador sol oscil·lar entre 2 i 4, encara que en alguns casos, pot ser més elevat, és a dir, per cada kW que es subministra al sistema se n'obtenen entre 2 i 4 (Taula 2.2). Per contra, en dispositius convencionals, aquest valor rarament supera el 0,8. (Banks, D., 2008).

Tecnologia	COP
Cremador de gas	0,6-0,9
Cremador de gas-oli	0,5-0,75
Resistència elèctrica	1
GSHP	2-4

Taula 2.2: Valors mitjans del paràmetre COP_H en funció de la tecnologia. Adaptat d'ECONAR, 1993.

Si bé existeixen altres paràmetres d'eficiència, aquest acostuma a ser el més utilitzat en sistemes geotèrmics de GSHP. Tanmateix, ja que no contempla l'energia dissipada pel propi sistema, ni l'energia consumida per altres dispositius complementaris (apartat 2.1.5), cal tenir en compte que el COP no mesura l'eficiència de tot el sistema, sinó que, únicament, expressa el rendiment de la bomba de calor.

Donada la versatilitat d'aquests aparells, es pot definir un COP pel mode calefactor i un altre pel mode refrigerant. Tot i que conceptualment són els dos molt similars, és convenient fer aquesta separació teòrica (Rafferty, K., 2001).

a) Eficiència energètica en mode calefactor

Partint de la base que, en condicions ideals, la potència emesa, en kWh, per una bomba de calor geotèrmica (H) en kWh, és la suma de l'energia mobilitzada en el subsòl (G), en kWh, i l'energia consumida pel compressor (E), en kWh, es defineix el COP_H com la relació entre H i E.

$$H \approx G + E \quad (\text{expressió 2.1})$$

$$COP_H = \frac{H}{E} \quad (\text{expressió 2.2})$$

$$G \approx H \left(1 - \frac{1}{COP_H} \right) \quad (\text{expressió 2.3})$$

El rendiment d'aquest tipus de sistemes geotèrmics disminueix dràsticament en augmentar la diferència tèrmica entre la font de calor i el punt a escalfar. Això és degut a que com major és la diferència de temperatures, més energia addicional cal subministrar al sistema per assolir la temperatura desitjada (Banks, D., 2008).

b) Eficiència energètica en mode refrigerador

En efecte, una GSHP pot assumir, també, funcions de refrigeració. Concretament, en comparació amb els aparells d'aire condicionat convencionals, els sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia gaudeixen d'un rendiment significativament superior, a causa de la diferència de capacitat calorífica i de conductivitat tèrmica entre l'aire i els materials que formen el subsòl, l'intercanvi calorífic terra-aire és més eficient que l'intercanvi aire-aire.

En general, quan es parla de refrigeració, una bomba de calor és més eficient si treballa amb un salt tèrmic gran. En altres paraules, davant d'un gradient tèrmic decreixent, la calor flueix més ràpidament si la diferència de temperatures entre dos punts és gran, tal i com expressa la Llei de Fourier (expressió 2.10). Per tant, en compliment de la segona Llei de la Termodinàmica, partint d'una habitació a 25°C, el

fet de dipositar la calor en un medi que es troba a 15°C (subsòl) comporta un rendiment major que si la mateixa quantitat de calor es transmet a un medi que es troba a 20°C (atmosfera). Aquest punt també justifica el fet que les GSHP gaudeixin d'un rendiment més elevat que les bombes de calor aire-aire (d'ara endavant ASHP, de l'anglès Air Source Heat Pump).

En aquest cas es defineix el COP_c com la relació entre la quantitat de calor extreta d'un punt (C), en kWh i la potència consumida pel compressor (E) en kWh. En el món industrial, aquesta variant del COP sovint s'anomena "Energy Efficiency Ratio" (d'ara endavant EER). Aquí cal aplicar un factor de conversió pel fet que el EER s'expressa en Btu (de l'anglès British thermal unit). Així mateix, sabent que 1 kWh equival a 3,413 Btu, la conversió queda de la següent manera. (^a NRCan, 2002).

$$COP_c \cdot 3,413 = EER = \frac{C}{E}$$

(expressió 2.4)

Tanmateix, es pot conèixer la quantitat de calor retornada al medi geològic i/o hidrogeològic de forma anàloga al mode calefactor:

$$G \approx C + E = C \left(1 + \frac{1}{COP_c} \right)$$

(expressió 2.5)

Si s'apliquessin les equacions anteriors en un exemple quantitatiu, s'observaria com l'energia necessària per mobilitzar una determinada quantitat de calor és més gran en mode refrigerador que en mode calefactor. La justificació d'aquest fet recau en que, en el mode calefactor, part de l'energia aportada al sistema es dissipa en forma de calor, ajudant així a escalfar l'entorn. Per contra, en l'altre tipus de funcionament, a fi de complir l'objectiu de refrigeració, la calor dissipada pel sistema ha de ser mobilitzada a través del consum d'energia adicional (Banks, D., 2008).

c) Ecoeficiència de les GSHP

D'acord amb la definició d'ecoeficiència del World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), tot i que la instal·lació de les bombes de calor geotèrmiques resulta cara des d'un punt de vista econòmic, ofereixen un efecte climatitzador a un preu molt competitiu, mantenint així un cert nivell de benestar, mentre es redueix la intensitat d'ús d'un recurs energètic determinat. Tal i com més endavant es tractarà amb una mica més de detall (apartat 2.1.7), aquest fet té importants implicacions ambientals.

En l'àmbit de les certificacions d'eficiència energètica, els referents mundials es troben als Estats Units, on les GSHP gaudeixen d'un notable grau d'implantació. Així mateix, les dues institucions més importants en aquest sentit són l' "Air-Conditioning, Heating and Cooling Institute" (AHRI) i l' "Energy Star" (Figura 2.5). En el primer cas, es tracta de l'associació que representa els fabricants de sistemes de climatització i es fa únicament referència a les bombes de calor de circulació directa. Els requeriments tècnics queden recollits en l'"Standard 870" (AHRI, 2009). Per la seva banda, l'"Energy Star", és un programa conjunt entre el "U.S. Environmental Protection Agency" i el "U.S. Department of Energy", creat amb l'objectiu d'ajudar als consumidors a protegir el medi ambient, així com, a estalviar recursos econòmics. En aquest cas s'exigeix un COP mínim de 3,5 per aconseguir aquesta etiqueta. Per tant, si bé avui en dia la majoria de sistemes superen, amb escreix, aquest valor, fa un dècada difícilment era assolit. Aquí és on s'observa la millora del rendiment en els sistemes de molt baixa entalpia.

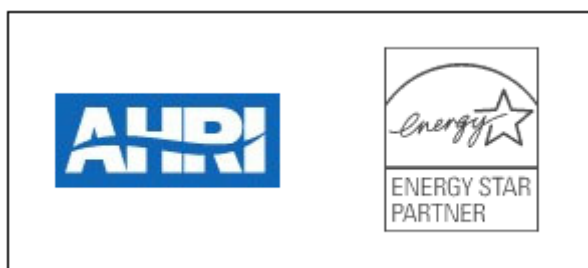


Figura 2.5: Etiqueta AHRI (esquerra) i etiqueta Energy Star (dreta).
Adaptat de EARTHLINKED TECHNOLOGIES, 2009.

2.1.5. Funcionament d'un sistema geotèrmic de bomba de calor

Des del moment que s'extreu la calor del subsòl, fins que es troba prou concentrada per ser utilitzada, aquesta, passa a través d'un seguit de circuits, que compresos en conjunt formen la totalitat del sistema geotèrmic. Si bé existeixen certes variacions a nivell de disseny entre els diferents tipus de sistemes, se sol seguir sempre un mateix patró dividit en tres circuits diferenciats (Figura 2.6).

El primer d'ells fa referència al col·lector de calor subterrani o circuit primari. Aquí, tant l'extracció, com el retorn de l'energia es pot realitzar de dues maneres distintes, en funció del tipus de sistema considerat (apartat 2.1.6). Així mateix, en el cas de treballar amb conjunts oberts, el fluid que es mou a través del circuit és la pròpia aigua del subsòl. Per contra, si el complex és tancat, el fluid de treball és sempre un refrigerant.

D'altra banda, en els sistemes tancats, segons el recorregut del fluid, es pot distingir entre la circulació directa i la indirecta. Així mateix, en el cas de la circulació directa, el circuit primari i el referent a la bomba de calor s'integren en un de sol, a causa que el fluid que intercanvia la calor amb el medi és el mateix que circula per la bomba de calor (Banks, D., 2008). Per contra, en la circulació indirecta es manté la separació de trànsits.

Un cop extreta la calor del terra, aquesta, es transmet al circuit de la bomba de calor, també anomenat secundari, a través de l'intercanviador primari. És important recordar que en aquesta part del sistema, l'energia pateix tots els processos de concentració amb la finalitat d'obtenir una energia útil per a usos domèstics.

Finalment, l'últim dels components citats és el circuit terciari o de distribució. Després de passar pels intercanviadors secundaris, la calor arriba al seu objectiu final a través de la xarxa de distribució. Aquí cal separar dues canalitzacions diferents en funció del seu destí. Per tant, si l'energia es destina a tasques de climatització, la xarxa rep el nom aigua-aire, mentre que si s'envia a usos d'aigua sanitària s'anomena canalització aigua-aigua.

Cal remarcar que l'explicació, aquí present, dels sistemes geotèrmics de molt baixa temperatura és la referent al mode calefactor, per conèixer el funcionament en mode refrigerador n'hi ha prou amb invertir el procés.

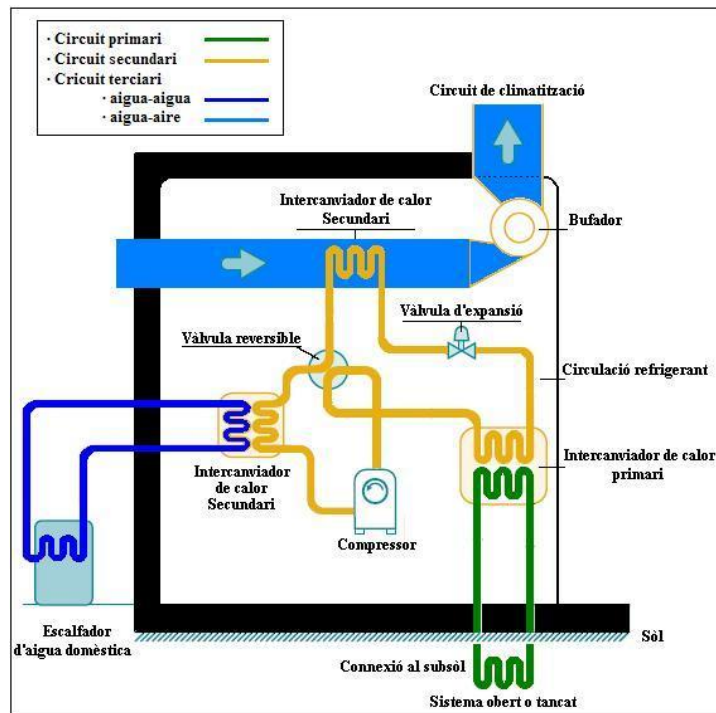


Figura 2.6: Esquema bàsic d'un GSHP per compressió.
Adaptat de ^b NRCan, 2002.

Tot i que les GSHP són aparells que gaudeixen d'una eficiència molt elevada, cal tenir present que són múltiples els factors que en limiten el rendiment. No obstant, les pèrdues d'eficiència no vénen donades per la pròpia bomba de calor, sinó que recauen en les imperfeccions de tot el sistema geotèrmic, en aquest cas, de molt baixa entalpia.

Si bé algunes d'aquestes deficiències són intrínseques del sistema i en conseqüència han de ser assumides en el disseny, n'hi ha d'altres que són susceptibles de ser atenuades. Si és així, les vies per disminuir-ne l'efecte acostumen a ser variacions en el propi disseny o bé, en els casos més extrems, cal recórrer a solucions d'enginyeria (Collins, P.A., et al., 2002).

Així mateix, els factors que afecten el rendiment d'aquest tipus de sistemes es poden agrupar en dos grans blocs. En primer lloc, apareix el gradient de temperatures entre la font de calor i el punt a climatitzar. Per tant, donat el caràcter reversible de les bombes de calor, cal trobar un equilibri en el diferencial tèrmic de treball. En aquest sentit, el medi geològic permet l'ús d'un gradient prou petit per tenir una bona eficiència en mode calefactor, així com un gradient suficientment gran per obtenir un rendiment acceptable en mode refrigerador. En qualsevol cas, a la regió mediterrània tal diferència tèrmica se sol restringir entre els 5 i 10 °C.

D'altra banda, tenint en compte que, sovint, la calor dissipada pels edificis representa un percentatge important de les pèrdues de calor, el disseny del propi sistema (des del col·lector de calor fins al sistema de distribució), així com l'aïllament de l'edifici formen el segon grup de factors limitants (NRCan, 2004).

Finalment, no es pot deixar de banda el fet que el clima de la zona, així com les propietats geològiques i/o hidrogeològiques del subsòl són fonamentals en la decisió del tipus de disseny a implementar, especialment pel que fa dels col·lectors subterranis de calor.

Cal recordar que els paràmetres definits en l'apartat anterior no expressen l'eficiència de tot el sistema. Per tant, és necessari definir un nou índex que integri els consums energètics de tot el conjunt. El "System Seasonal Performance Factor" (d'ara endavant $SSPF_H$) es defineix com la relació entre H i la suma de consums energètics del sistema (E_T), en kWh (Banks, D., 2008). De fet, es pot dir que és un COP referit a tot el sistema. En qualsevol cas, el resultat d'aquest càlcul (expressió 2.6) sempre donarà un valor inferior a l'homòleg obtingut en el COP.

$$SSPF_H = \frac{H}{E_T}$$

$$SSPF_H = \frac{H}{\underbrace{E + E_{bomba} + \dots}}_{}$$

(expressió 2.6)

2.1.6. Tipus de sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia

Un cop explicades les generalitats d'un sistema geotèrmic de GSHP, és el moment de diferenciar-ne els tipus existents. Abans però, tenint en compte que les GSHP permeten concentrar la calor emmagatzemada en una ampla gama de situacions, cada tipus de sistema no és més que una adaptació a les propietats tèrmiques, geològiques i hidrogeològiques d'un medi determinat. Tot i que el procés de perforació és similar en cadascun dels complexos (Figura 2.7), i tenint en compte que les variacions es donen en el moment d'extreure la calor de l'entorn, no és errat pensar que les diferències més importants es trobaran en el disseny del circuit primari.

A partir d'aquí, i tal com s'esmentava en l'apartat anterior, es poden diferenciar dos grans grups de col·lectors de calor: els oberts i els tancats (McQuay Air Conditioning, 2002). Si bé, és cert que dins d'aquestes dues configuracions s'inclouen nombrosos medis de transferència de calor, el present document centra la seva atenció en l'intercanvi d'energia amb l'entorn geològic i/o hidrogeològic.



Figura 2.7: Situació típica del procés de perforació. Adaptat d'EGEC, 2008

a) Sistemes oberts

El principal tret distintiu dels circuits oberts és l'ús directe de l'aigua d'un entorn determinat. Per tant, en aquest cas en concret, l'establiment d'un sistema obert d'intercanvi de calor depèn, essencialment, de l'existència d'un aqüífer a la zona de treball, així com de les seves propietats hidràuliques (permeabilitat, K i capacitat d'emmagatzematge d'aigua, S) i geotèrmiques (conductivitat tèrmica, λ i capacitat calorífica específica, S_{VC}) (Banks, D., 2008). Aquestes variables es troben més detallades en l'apartat 2.2, referent a la importància del context geològic i hidrogeològic.

Tanmateix, l'intercanvi de calor és factible amb qualsevol cos d'aigua, ja sigui subterrani (aqüífer) o superficial (riu i/o llac). Ara bé, l'eficiència dels sistemes en els casos superficials, sovint, es veu més alterada que en els casos subterranis, degut a la variabilitat estacional que caracteritza el compartiment atmosfèric.

Pel que fa al funcionament dels col·lectors oberts, un cop captada l'aigua de l'aqüífer es bombeja pel circuit primari fins arribar a l'intercanviador primari de calor, donant part de la seva energia al fluid de la bomba de calor.

Acte seguit, després de passar per l'intercanviador, es retorna l'aigua a l'aqüífer amb un salt tèrmic determinat, més fred, si el fluid s'ha utilitzat per escalfar, o bé més calent, si s'ha destinat a refrigeració (Figura 2.8).

El fet d'utilitzar una formació geològica amb unes característiques molt singulars, fa dels sistemes oberts uns dissenys molt influenciats per la geologia de l'entorn. Conseqüentment, la seva eficiència es veu sovint limitada per factors difícilment controlables. És important tenir en compte que l'aplicació d'aquest tipus de procediments comporta alteracions sobre el medi. D'una banda, en el moment de retornar l'aigua a l'aqüífer, degut al salt tèrmic del fluid, es produeix un canvi més o menys local de la seva temperatura. De l'altra, el fet d'extreure aigua del subsòl, comporta una determinada disminució del nivell piezomètric (Sanner, B., 2001).

Per tant, en situacions de sobreexplotació de l'aqüífer, es poden donar canvis locals en el gradient hidràulic, fent possible una inversió del flux i paral·lelament induint l'extracció d'aigua afectada pel salt tèrmic. A fi d'evitar pèrdues de rendiment d'aquest

tipus, és fonamental tenir ben caracteritzada la formació hidrogeològica a través d'assajos de bombeig en situacions de preexplotació, així com un disseny que compregui una distància suficient entre el punt d'extracció i el de descàrrega.

A banda de tot això, s'ha de tenir present que donada l'escassetat d'aigua que caracteritza els climes mediterranis, sovint, els aqüífers d'aquests ambients es troben fortament explotats. Com a conseqüència d'això, tals sistemes geotèrmics es poden veure afectats negativament per altres explotacions properes. A més, determinades regulacions limiten l'ús d'aigües subterrànies, provocant, en ocasions, la inviabilitat dels col·lectors oberts. En efecte, després de tenir en compte totes aquestes variables es fa difícil tenir l'aqüífer ben tipificat.

Per contra, l'ús d'un fluid natural com a intercanviador de calor comporta certs avantatges que fan d'aquesta configuració prou atractiva en determinades situacions. En primer lloc, aquest element gaudeix d'una capacitat calorífica molt elevada ($4180 \text{ J}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), fet que el fa susceptible d'emmagatzemar una quantitat important d'energia. Tanmateix, els sistemes oberts són relativament barats, encara que en alguns casos s'ha de perforar desenes de metres per arribar a l'aqüífer (Rafferty, K., 2001). Juntament amb aquest últim factor, els avantatges tècnics que proporciona l'ús directe de l'aigua han comportat la seva consolidació en el món de la geotèrmia de baixa entalpia, tot i que avui en dia els sistemes tancats els hi prenen el protagonisme.

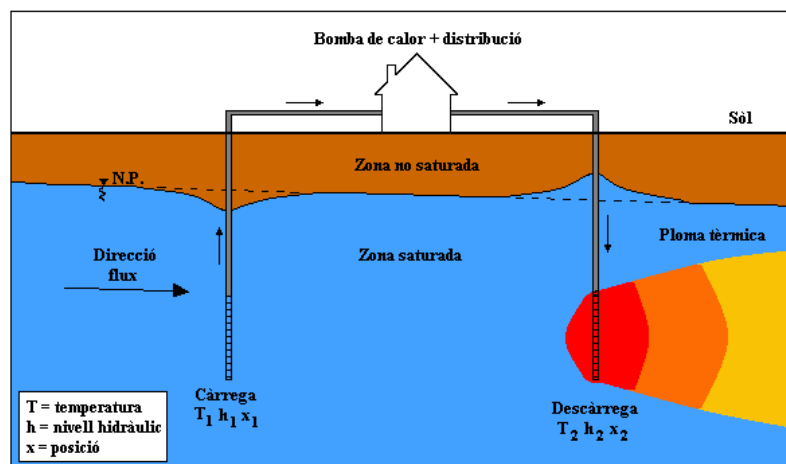


Figura 2.8: Esquema d'un col·lector geotèrmic obert. Elaboració pròpia

b) Sistemes tancats

Pel fet que els aqüífers no són ubics, molts emplaçaments no compleixen els requisits per a la instal·lació d'un sistema obert. Per aquest motiu, es desenvolupen els col·lectors de calor tancats, que suporten gairebé qualsevol tipus d'emplaçament (granits, argiles, entorns saturats i fins i tot abocadors). Per tant, són considerablement més versàtils, en el sentit que no requereixen una formació hidrogeològica productiva per funcionar (BANKS, D., 2008).

En aquest cas, el circuit primari no intercanvia matèria amb l'entorn, d'aquí el nom de sistemes tancats. El fluid que circula pel col·lector de calor no és aigua sinó un refrigerant amb unes propietats termodinàmiques més eficients per aquest tipus d'ús.

Tal com s'anunciava en l'apartat 2.1.6, dins dels sistemes tancats es diferencia la circulació directa i la indirecta. El primer tipus, fa referència a la unió del circuit primari i secundari, amb la conseqüent desaparició d'un dels intercanviadors de calor que apareixen en la figura 2.5. Per contra, en el segon tipus de trànsit, es conserven ambdós circuits i amb diferents espècies de refrigerants respectivament. Si bé els sistemes directes són els que van entrar amb més força en els inicis dels complexos geotèrmics de molt baixa entalpia, actualment els indirectes, que gaudeixen d'una eficiència major, són els dominants en els mercats europeus (ECONAR, 1993).

Tenint en compte que l'espai de treball, així com els recursos econòmics disponibles són sovint elements limitants a l'hora d'executar un projecte, es pot establir una altra divisió de configuracions en funció d'aquestes dues variables. Així mateix, els sistemes tancats verticals i els homòlegs horitzontals representen diferents adaptacions per a diferents tipus de situacions inicials.

➤ **Sistemes tancats verticals**

Amb l'objectiu d'optimitzar l'espai, tot i que a costa d'un increment del pressupost i de la possibilitat de travessar diferents formacions hidrogeològiques, neixen els sistemes tancats verticals.

A causa d'una manca de superfície útil, en molts casos no és possible captar la calor en extensió i cal fer-ho en profunditat. Per tant, aquest tipus de sistemes es basen en un seguit de perforacions a una fondària determinada (Figura 2.9), per on hi circula un fluid refrigerant en règim turbulent. La raó per la qual es prefereix aquest tipus de trànsit recau en el fet que ofereix un major temps d'interacció amb el medi geològic que en el cas d'un règim laminar. Gràcies a aquest major intercanvi de calor, el règim turbulent implica un increment de fins a un 16% en l'eficiència energètica del sistema (Pérez, M., Zubiria, D., 2009).



Figura 2.9: Col·lector vertical instal·lat en un pou de perforació.
Adaptat de PÉREZ, M. & ZUBIRIA, D., 2009

Com a tret distintiu, aquí el circuit del col·lector es troba envoltat d'un conductor tèrmic (bentonita, sorra silícica...), a fi de minimitzar les pèrdues de calor en els pous de perforació que hi hauria en el cas de deixar el pou de perforació buit. D'altra banda, aquests materials tenen uns valors de permeabilitat molt baixos, fet que ajuda a evitar les possibles connexions de diferents nivells saturats.

Generalment, el nombre de forats i la seva fondària són funció de les característiques geològiques, la càrrega de calor que cal cobrir, el clima i per suposat, el pressupost disponible. En referència a la fondària del pous, aquesta sol trobar-se en un rang comprès entre els 15 i 150 metres. Justament per aquesta optimització de l'espai, els ambients urbans s'adapten molt bé a tal configuració (NRCan, 2005).

Normalment, els sistemes verticals gaudeixen d'una eficiència més elevada que els horitzontals per la simple raó que, aquests, intercanvien la calor a major fondària, on les fluctuacions de la temperatura del medi són "mínimes". Ara bé, com sempre existeixen nombrosos factors que en limiten el rendiment. Especialment, en els grans projectes la informació sobre el medi geològic és clau, ja que petites diferències en les estimacions de la conductivitat tèrmica de l'entorn poden comportar considerables variacions en el disseny de tot el sistema.

Per concloure aquest punt, és important esmentar que degut a la relació de semblança entre les expressions que descriuen el flux d'aigua subterrània (Llei de Darcy: expressió 2.19) i el flux de calor (Llei de Fourier: expressió 2.10), el comportament del medi en una situació d'explotació és molt similar en ambdós casos (figura 2.10). Dit d'una altra manera, en tal situació sempre es crea un con d'ascens o de descens de la variable considerada, ja sigui temperatura en el cas de col·lectors tancats verticals, o bé nivell hidràulic en el cas dels sistemes oberts.

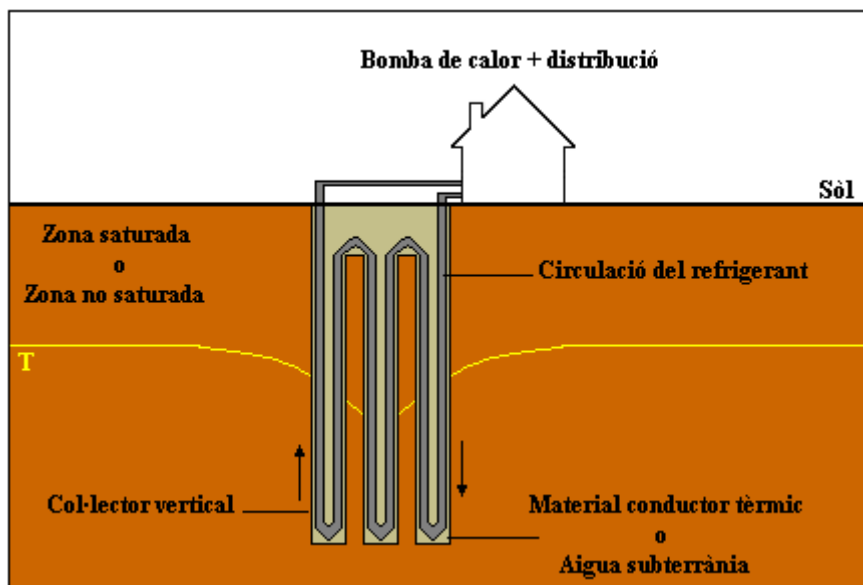


Figura 2.10: Esquema d'un col·lector geotèrmic tancat vertical.
Elaboració pròpia.

➤ Sistemes tancats horitzontals

De tots els tipus de col·lectors de calor descrits fins ara, els sistemes tancats horitzontals són els més barats i els més accessibles en cas d'avaría. La justificació d'aquest fet recau en que la seva instal·lació es duu a terme en forma de rases, a una fondària relativament superficial (1,2-2 m) a diferència dels col·lectors anteriors. En aquest cas el funcionament és idèntic al seu homòleg vertical, amb l'única diferència en el disseny del col·lector de calor que pot ser, entre d'altres, en espiral i pla (figura 2.11).



Figura 2.11: Col·lector horitzontal en paral·lel (esquerra) i col·lector horitzontal en espiral (dreta). Adaptat de Aranzazu, M. & Mayoral, G.R. 2009.

A causa de la seva situació superficial, el col·lector no es troba en una zona de temperatura estable, sinó que en funció de l'estació de l'any, existeixen fluctuacions considerables en les condicions de treball. De totes maneres, amb aquesta posició s'aconsegueix un cert equilibri tèrmic, mitjançant una fondària suficient com per proporcionar una eficiència acceptable tant a l'estiu com a l'hivern. Per tant, resulta ser, de les tres configuracions esmentades, el sistema geotèrmic més dependent de la irradiació solar (Sanner, B., 2001).

A banda de les alteracions en la temperatura, i tot i que els col·lectors horitzontals no solen trobar-se en zones saturades, també hi poden haver canvis importants en el grau d'humitat del sòl. Generalment, a major percentatge d'aigua, més gran és la capacitat d'emmagatzematge de calor però més baixa és la seva conductivitat tèrmica, a causa del modest valor de tal paràmetre en l'aigua ($0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Per tant, les

fluctuacions en la proporció d'aigua continguda en els porus afecten directament al rendiment de la totalitat del sistema (Banks, D., 2008).

Aquest tipus de configuració és especialment recomanada per a les zones rurals, on el sòl disponible difícilment es veu limitat. Encara que amb l'aparició de les xarxes en espiral, que ocupen una superfície més reduïda, ha estat possible la implantació dels sistemes horitzontals en algunes zones urbanes d'Europa (Figura 2.12).

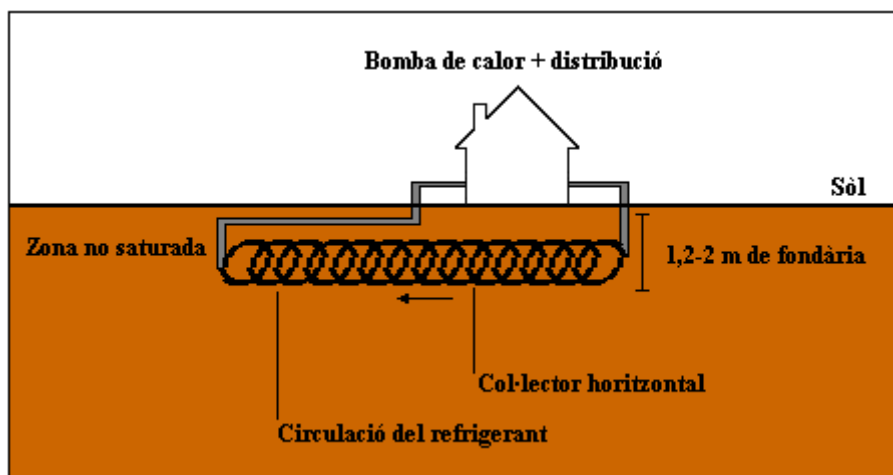


Figura 2.12: Esquema d'un col·lector geotèrmic tancat, horitzontal i en espiral. Elaboració pròpia.

2.1.7. Sostenibilitat dels sistemes de GSHP

En base a l'Informe Brundtland (1987), una activitat és sostenible quan s'executa, en totes les seves etapes, de tal manera que es satisfan les necessitats actuals sense comprometre el benestar de les generacions futures.

Tot i tenir una definició mundialment acceptada, resulta ser un concepte difícil de quantificar de manera absoluta, encara que prou senzill si s'analitza en termes relatius. És a dir, si bé la comparació és més assequible, determinar com de sostenible és un procés, un espai, un objecte... esdevé una tasca molt més feixuga. Aquest fet s'explica per la magnitud de la realitat que intenta explicar el terme sostenibilitat, així com, per les múltiples interpretacions que dóna lloc la seva definició.

Per tant, cenyint-se estrictament a aquest document, la sostenibilitat és una qüestió d'intensitat d'ús i d'escala temporal, en el sentit de trobar un equilibri entre el ritme de transformació i regeneració d'un determinat recurs. Ara bé, no es pot deixar de banda el grau d'eficiència del procés que s'alimenta del recurs en qüestió. Efectivament, en funció del rendiment del procés, el caràcter sostenible del complex augmenta o disminueix.

La sostenibilitat en els sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia es pot valorar des dos punts de vista diferents, des del medi objecte d'explotació, o bé des de la globalitat del propi sistema geotèrmic (Banks, D., 2008).

Pel que fa a la calor emmagatzemada en el medi geològic o hidrogeològic, aquesta, es pot considerar un recurs renovable, degut a la immensa capacitat calorífica que caracteritza el subsòl. Ara bé, en condicions de sobreexplotació, ja sigui a nivell hídic o tèrmic, el sistema esdevé completament insostenible. Aquesta sobreexplotació es pot donar tant a nivell local (una captació) o a nivell d'aqüífer (moltes captacions) i queda palesa quan:

- La temperatura del sistema cau fins a uns nivells que impossibiliten l'explotació del subsòl, a causa d'un ritme d'extracció superior al ritme de reposició
- En els sistemes oberts, es dona una disminució en el cabal d'aigua extret, també degut a un ritme d'explotació més elevat que el ritme de reposició.

D'altra banda, en referència a la totalitat del complex geotèrmic, existeix un cert debat respecte la sostenibilitat d'aquest tipus de sistemes. Si bé, en un procediment correcte d'explotació, l'entorn geològic ofereix un recurs renovable, és cert que, en etapes posteriors, el seu tractament requereix energia addicional per fer-lo aprofitable.

Així mateix, en l'etapa d'ús, els punts crítics que qüestionen la sostenibilitat energètica d'aquests sistemes, són el bombeig del fluid del circuit primari i la compressió del refrigerant a la bomba de calor. Totes dues etapes requereixen una certa quantitat d'energia externa, que en funció del seu origen genera unes repercussions ambientals o unes altres.

Per contra, en condicions correctes de funcionament, és del tot innegable l'elevada eficiència de les GSHP en relació amb els complexos de climatització convencionals (calderes de combustibles fòssils, aire condicionat, ...).

El fet d'obtenir un poder calefactor i/o refrigerant més gran que la quantitat d'energia subministrada fa d'aquests sistemes molt atractius en aquest sentit. Cal recordar de l'apartat 2.1.4, referent a l'eficiència energètica de les bombes de calor, que les calderes convencionals rarament assoleixen un COP superior a 0,8, és a dir que per cada watt (W) subministrat només 0,8, en el millor dels casos, és converteix en energia útil. Per la seva banda, els sistemes de GSHP, aconseguen més de quatre vegades més d'energia. Per tant, proporcionalment, les bombes de calor geotèrmiques consumeixen menys energia primària que els complexos ordinaris (ECONAR, 1993). Conseqüentment, aquesta reducció en el consum es transporta també a les emissions de gasos d'efecte hivernacle (Figura 2.13), sent així una bona alternativa per disminuir les emissions de certs contaminants atmosfèrics (CO₂, SO₂, NO_x...) (b NRCan, 2002).

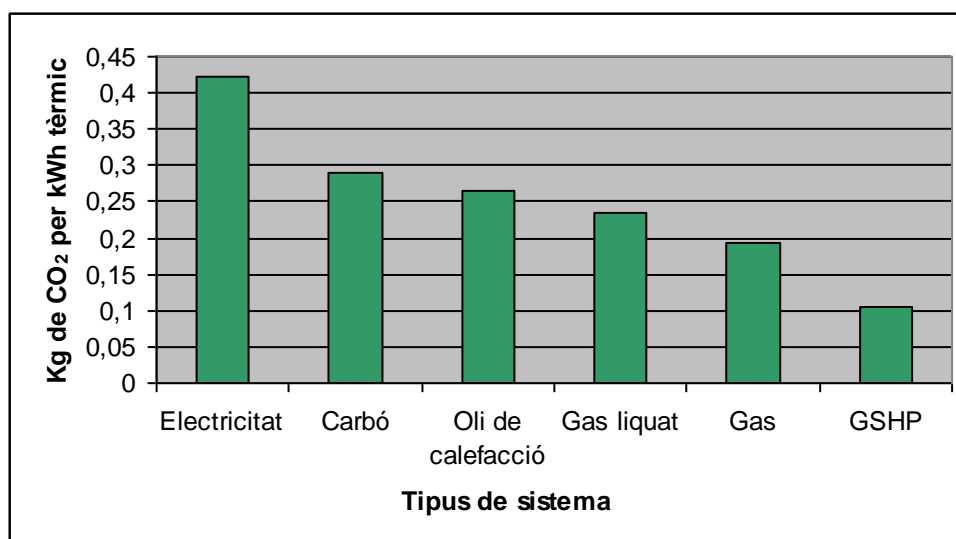


Figura 2.13: Emissions en Kg de CO₂ per cada kWh tèrmic produït en funció de la tecnologia. Adaptat de Banks, D., 2008.

Ara bé, a causa d'aquest aport extern d'energia, les bombes de calor geotèrmiques no es poden considerar uns dispositius amb caràcter renovable. En efecte, aquests aparells no representen una font d'energia, sinó més aviat una màquina tèrmica que requereix una determinada quantitat d'energia per complir la segona llei de la termodinàmica (Soravilla, L., 2009). Per tant, el grau de sostenibilitat dels complexos

de GSHP es basa en un equilibri entre l'eficiència del propi sistema i la quantitat d'energia subministrada, procedent, en molts casos, de fonts no renovables (Figura 2.14). De totes maneres, els treballs més recents en aquest àmbit, suggereixen la substitució dels combustibles fòssils per electricitat generada a través de energia solar.

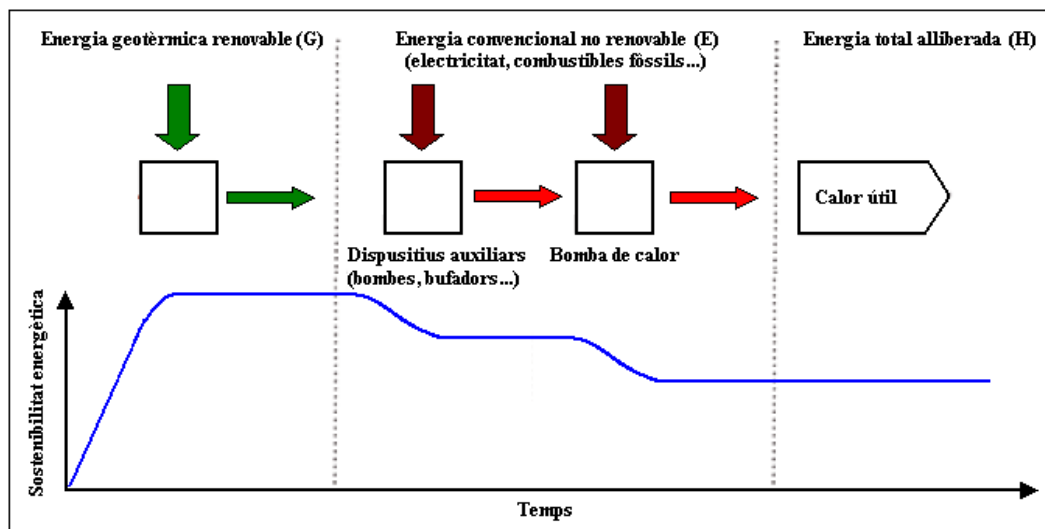


Figura 2.14: Evolució qualitativa del grau de sostenibilitat en el cas d'utilitzar combustibles fòssils o electricitat procedent d'aquests per fer funcionar els dispositius complementaris del complex geotèrmic. Elaboració pròpia.

L'ús de bombes de calor geotèrmiques, com qualsevol activitat d'origen antròpic, comporta uns impactes en el medi que poden tenir conseqüències negatives per a l'entorn.

En la fase d'explotació, sobretot pel que fa als sistemes oberts, cal tenir en compte el salt tèrmic amb el que es retorna l'aigua a l'aqüífer. En alguns casos, grans diferències de temperatura poden ocasionar canvis en les propietats físiques i químiques de l'aigua, així com alteracions dels ecosistemes a nivell biològic. Per aquest motiu, és important tenir un bon control de l'entorn, a més d'una legislació sòlida i coherent que suporti tals controls (GEOPLAT, 2008). En aquest sentit l'administració, de Catalunya en particular i la d'Espanya en general, ha de realitzar un esforç considerable per situar-se al nivell d'altres països Europeus en matèria legislativa.

D'altra banda, apareixen els impactes en l'etapa de construcció del sistema. Tot i ser una fase més curta en el temps, sovint provoca unes pressions sobre l'entorn més

intenses que en la fase d'ús. Aquí les problemàtiques més usuals estan, sobretot, relacionades amb l'estat del sòl. En aquesta etapa, es poden donar episodis de subsidència de la superfície del sòl com a conseqüència directa de les perforacions, així com una vulnerabilitat major davant els processos erosius, a causa de la pressió

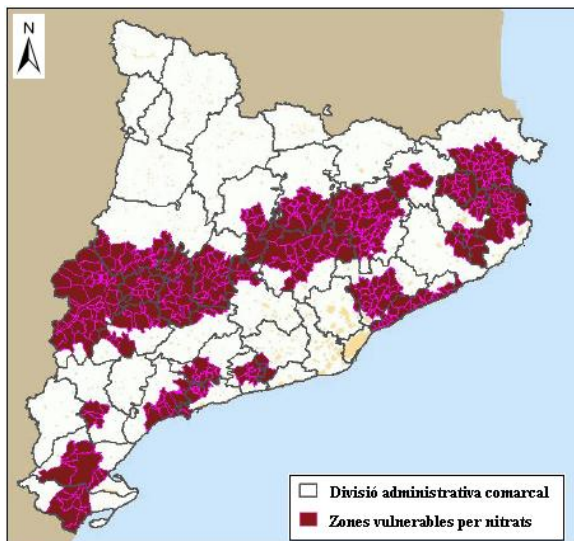


Figura 2.15: Mapa de les zones vulnerables per nitrats a Catalunya. Adaptat de ICC, 2010.

mecànica sobre la coberta del sòl. A més d'aquestes afeccions, en el cas de treballar en zones d'aqüífers, els pous de la xarxa de col·lecció poden induir, si no estan ben construïts, la connexió de diferents nivells saturats, fent més fàcil la dispersió de la contaminació química en el medi hidrogeològic. Aquest cas és especialment problemàtic en zones amb una gran abundància d'aqüífers i amb la presència d'una elevada densitat de cabanes ramaderes, on la

contaminació de les aigües per nitrats és força corrent. A Catalunya, el cas més important que il·lustra aquesta situació es dona, entre d'altres llocs, en algunes zones del gironès moltes d'elles situades a la Comarca d'Osona (Figura 2.15). Tot i que és cert, que la legislació catalana obliga a realitzar la captació i retorn d'aigua en el mateix aqüífer, les connexions entre diferents nivells saturats derivades de les perforacions són un fet que cal tenir en compte.

2.1.8. Situació actual i perspectives de creixement dels sistemes geotèrmics de bomba de calor a Espanya

El buit legal que pateix actualment l'Estat espanyol en matèria geotèrmica no és més que un reflex de la realitat que viu aquest tipus d'energia a la Península Ibèrica. Si bé en les regions més septentrionals del continent les GSHP tenen una història molt més ampla, i avui en dia, gaudeixen d'importants nivells d'implantació, els països de l'est i sud d'Europa tenen, encara, un mercat molt incipient. Per tant, tot i els múltiples

avantatges d'aquests sistemes de climatització, el seu grau d'implantació no ha estat gens homogeni arreu del continent.

a) Exemples d'aplicació

A continuació es presenten dues de les instal·lacions pioneres en matèria d'energia geotèrmica de molt baixa entalpia, construïdes en l'àmbit públic. Cal remarcar que la incidència d'aquests sistemes de climatització és encara insignificant en el sector privat.

➤ Hospital de Mollet del Vallès

El nou hospital de Mollet del Vallès, aixecat entre els anys 2007 i 2010, cobrirà més de 1 MW de climatització amb energia geotèrmica de molt baixa entalpia. L'intercanviador terrestre compta amb 20.000 metres lineals (m.l.) de perforació vertical distribuïts en 144 sondejors (Figura 2.16). Actualment, aquesta instal·lació és la més important d'Espanya i pionera, a nivell europeu, en l'àmbit de la climatització hospitalària a través d'energia geotèrmica de molt baixa temperatura.

Més concretament, el sistema geotèrmic, compta amb dues bombes de calor amb un poder calefactor de 600 kW i de 500 kW en mode refrigerador cadascuna. La resta de potència no coberta amb aquest sistema, serà subministrada a través de mètodes de climatització convencionals.

L'edifici, que donarà assistència sanitària a prop de 150.000 persones i que s'alça sobre una superfície de poc més de 2,5 ha, podrà estalviar fins a un 75% d'energia destinada a climatització i reduir un 50% les emissions de CO₂ (Aranzazu, M., & Mayoral, G.R. 2009).



Figura 2.16: Vista de 3 equips de perforació treballant simultàniament en la construcció de l'hospital de Mollet del Vallès. Adaptat de Aranzazu, & M., Mayoral, G.R. 2009.

➤ Aprofitament geotèrmic de les aigües de Saragossa a nivell de districte

Com a resultat de nombroses avingudes històriques, els rius Ebre i Gállego han anat formant dipòsits al·luvials al seu voltant. Sobre una d'aquestes formacions sedimentàries, just en l'encreuament dels dos cursos fluvials, s'alça bona part de la ciutat de Saragossa. En total, unes 400 captacions aprofiten l'aigua subterrània continguda en els porus que deixen les graves, sorres i llims acumulats sota els fonaments de la ciutat. Fins fa una dècada, tota l'aigua extreta es destinava única i exclusivament a aigua de reg i de consum domèstic i industrial (Figura 2.17). Ara bé, recentment l'arribada a Espanya de les GSHP ha comportat un augment important de l'extracció d'aigua per usos de climatització domèstica. D'aquesta manera, el nombre de pous per a ús geotèrmic arriba, ja, al centenar de captacions, cobrint així, una demanda que s'aproxima als $13 \text{ hm}^3 \cdot \text{any}^{-1}$. Si bé el balanç hídric de l'aqüífer, amb prou feines es veu modificat, l'aigua retornada a la formació té una diferència tèrmica que voreja els 6°C , tot i que en ocasions pot superar els 15°C (Garrido, E.A., Sánchez, J.A., 2009). El cas de Saragossa, és un clar exemple de captació a nivell de districte amb nombrosos punts d'extracció.

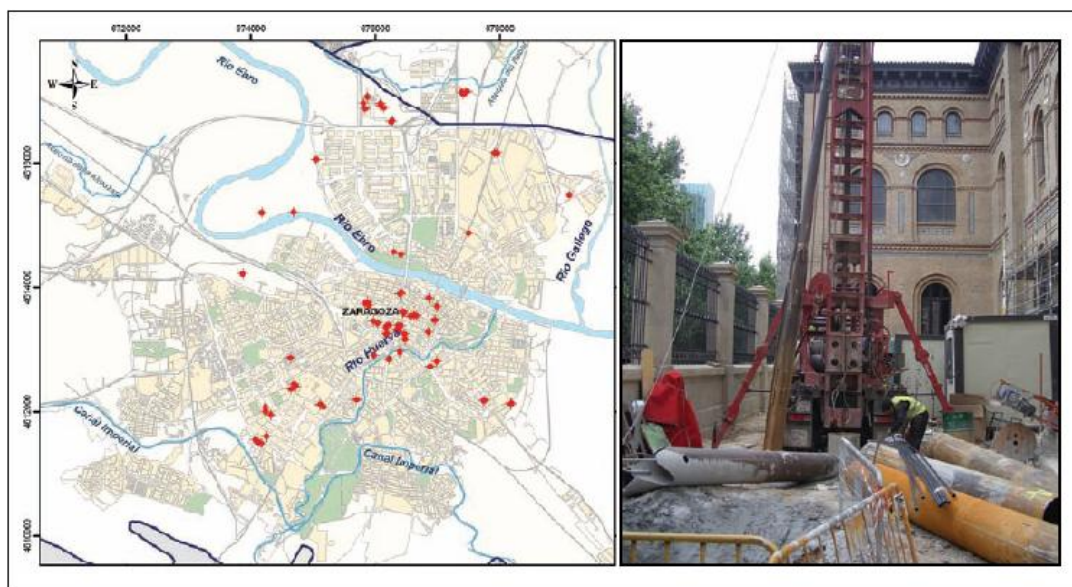


Figura 2.17: Mapa de Saragossa amb els punts de captació d'aigua per a usos geotèrmics (esquerra) i imatge del procés de perforació d'un dels pous de captació (dreta). Adaptat de Garrido, E.A., Sánchez, J.A., 2009.

b) Perspectives de futur

En un context de crisi energètica, on cada dia és més difícil mantenir el nivell de consum actual, de mica en mica, l'energia geotèrmica es comença a obrir pas entre els vectors més rellevants del subministrament energètic. Tant és així, que el desconeixement d'aquesta tecnologia contrasta amb el potencial geotèrmic que pren Espanya, on algunes fonts l'estimen en vora 600 kTep per any (Obras Urbanas, 2009).

En particular les GSHP presenten unes perspectives molt encoratjadores, sobretot en el sector de la construcció, el qual representava l'any 2008 el 27% del consum energètic estatal (GEOPLAT, 2008). Tot i l'elevat cost inicial que comporta la seva instal·lació, l'estalvi energètic que caracteritza aquests dispositius permet un període d'amortització relativament breu (4-8 anys), tot i que és cert que en determinades condicions aquest període pot ser sensiblement superior.

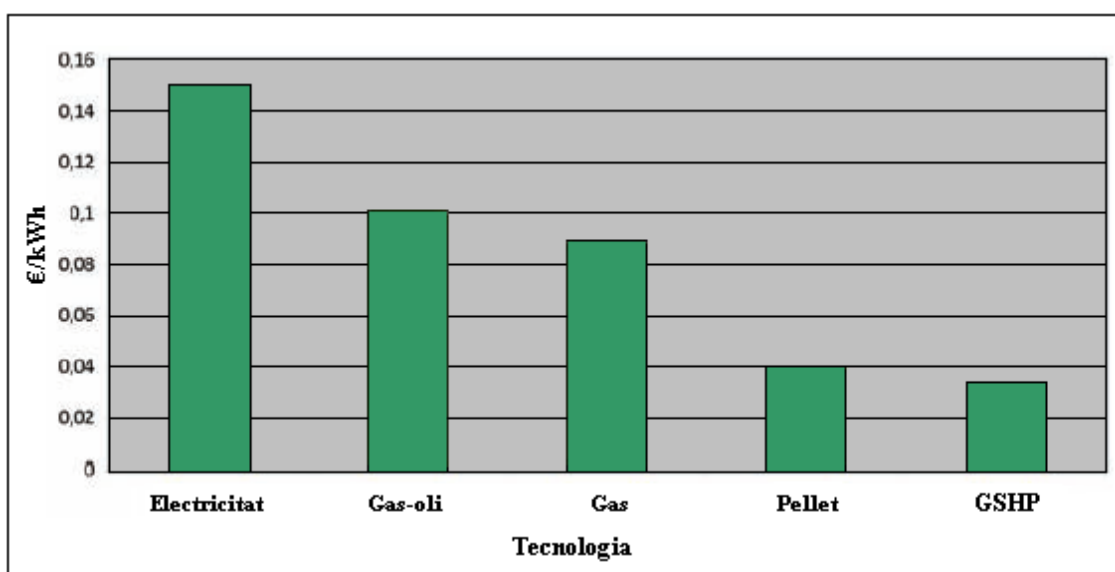


Figura 2.18: Preu en € del kWh tèrmic produït en funció de la tecnologia. Dades actualitzades l'agost del 2008. Adaptat de Nieto, A. 2009.

D'altra banda, a nivell econòmic, el preu per cada kWh tèrmic produït per la bomba de calor geotèrmica és més barat que un kWh extret d'un combustible convencional (Figura 2.18). La justificació d'aquest fet es troba, un cop més, en l'eficiència (COP) de la bomba de calor. En altres paraules, pel cost econòmic d'un kWh s'aconsegueix la mobilització d'una quantitat d'energia superior a l'energia subministrada. Per tant, els

recursos econòmics invertits per generar l'electricitat proporcionada es reparteixen entre tots els kWh finals que s'obtenen (Nieto, A., 2009). Justament pel fet de ser un argument purament econòmic, encara que amb conseqüències ambientals de rerefons, aquest últim punt pot representar un pilar fonamental en la implantació de les bombes de calor geotèrmiques, sobretot a nivell privat.

En el cas concret de Catalunya, cal esperar una implantació bastant heterogènia, des del punt de vista geogràfic, quant a tipus de col·lectors. Així mateix, mentre que a la zona de les Conques Catalanes de l'Ebre (CCE) hi pot haver una predominança dels sistemes tancats, a la regió de les Conques Internes de Catalunya (CIC), cal esperar un major grau d'implantació dels col·lectors oberts, pel fet que els aqüífers potencials per a l'ús dels sistemes de GSHP es troben situats a l'extrem més oriental del territori (Figura 2.19).

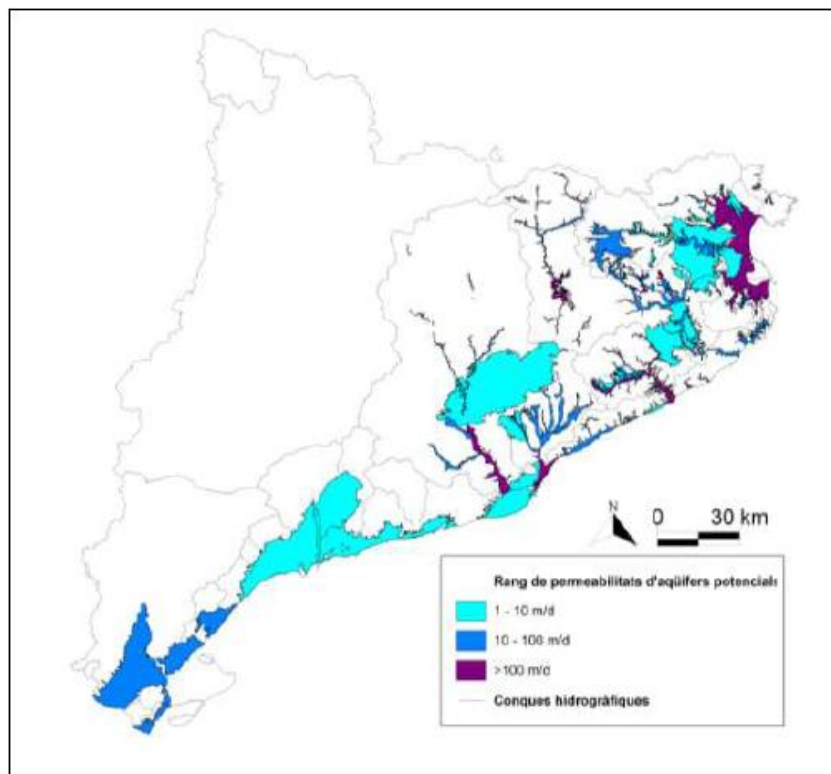


Figura 2.19: Aqüífers de Catalunya susceptibles de ser explotats per a geotèrmia de molt baixa temperatura. Adaptat de ACA, 2010.

Paral·lelament, cal tenir en compte que, ocupant només un 4% més de superfície que les CCE, les CIC, engloben un 90% de la població catalana. Justament per aquest motiu, és fonamental dur un bon control de les captacions a fi d'evitar situacions de sobreexplotació de les formacions hidrogeològiques en qüestió.

Davant d'aquesta situació, cal esperar en els pròxims anys, a l'Estat espanyol i a Catalunya en particular, un creixement important en el nombre d'instal·lacions geotèrmiques, així com una adaptació progressiva de la legislació, de la mateixa manera que ha passat en altres països del continent europeu (Figura 2.20).

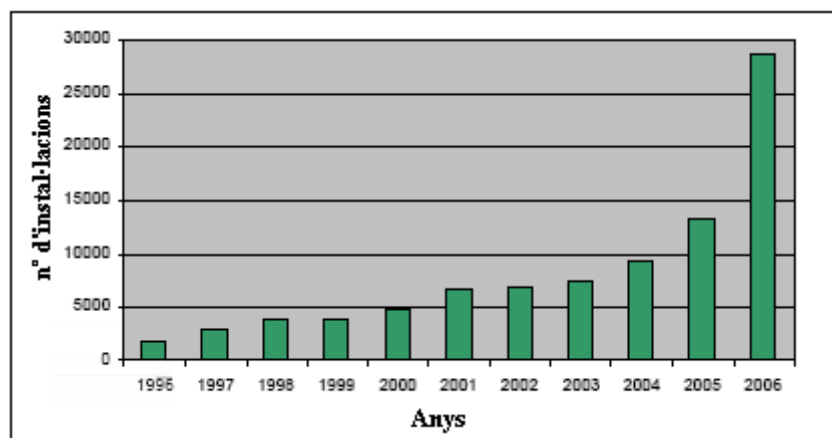


Figura 2.20: Evolució temporal (1996-2006) de les instal·lacions de GSHP a Alemanya. Adaptat de Sanner, B., 2007.

2.2. Importància del context geològic i hidrogeològic

Si en el subcapítol anterior, entre d'altres punts, s'ha realitzat una breu aproximació a les expressions que governen el transport de calor i aigua subterrània, a continuació es reprenen aquestes lleis per tractar-les amb més deteniment.

Tot seguit, es podrà comprovar com els principis que regeixen el flux de calor i d'aigua subterrània són anàlegs en els seus respectius camps, si bé cal tenir en compte que el flux d'aigua subterrània condiona el flux de calor. En aquest sentit, ambdós tipus de fluxos influencien directament a l'eficiència energètica dels sistemes de GSHP.

2.2.1 Propietats tèrmiques

A l'inici del punt anterior, referent als sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia, s'exposa el fet que la temperatura varia exponencialment al llarg dels primers metres de sòl, fins que arriba un punt en el que, aquesta, es manté més o menys estable (Figura 2.2) al llarg de l'any. Per tant, a primer cop d'ull, no és errat pensar en l'existència d'uns determinats fenòmens d'emmagatzematge i transport d'energia calorífica en el subsòl. Efectivament, de la mateixa manera que qualsevol altre cos, la terra té la capacitat d'emmagatzemar i transmetre l'energia que li arriba de les diferents fonts de calor.

a) El balanç energètic de la terra

L'anàlisi quantitatiu dels fluxos de calor a la terra es realitza a través dels balanços energètics, que integren les respectives entrades i sortides del sistema.

En aquest sentit, si bé les sortides són aquells processos que d'alguna manera o altra dissipen l'energia, tenint sempre el seu origen en el propi planeta, les entrades, en

canvi, poden ser internes o externes, sent les primeres, com el seu nom indica, fenòmens físics que proporcionen energia calorífica des de l'interior de la terra.

Des del punt de vista dels sistemes de GSHP, tot i que tant les entrades com les sortides engloben, respectivament, nombroses fonts i processos dissipadors de calor (Figura 2.21), no tots participen en el balanç calorífic planetari de la mateixa manera (Clauser, C., 2006).

Així mateix, en referència a les entrades externes, la més important és la radiació solar. De l'energia emesa per l'astre central del sistema solar apareix la constant solar (S), el valor de la qual disminueix en funció de la distància a tal estrella. En el cas que ocupa el present document, cal recordar que S pren un valor que volta els $1373 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Aquest valor multiplicat per la superfície d'una circumferència de radi 6370 km (radi de la terra) retorna la quantitat d'energia solar interceptada pel planeta. És important tenir present que no tota aquesta energia es susceptible de ser imputada en el balanç energètic de la terra, ja que aproximadament un 30% és reflectida directament com a conseqüència de l'albedo del planeta. L'energia restant, interacciona amb l'atmosfera, de la qual, només un 45-50% queda retinguda en el compartiment geològic. Per tant, dels $1,75\cdot 10^{17} \text{ W}$ interceptats originalment per la terra, són tan sols $7,86\cdot 10^{16} \text{ W}$ els que s'emmagatzemen a l'escorça terrestre.

Una altra font, encara que amb un paper poc rellevant és la força gravitacional que exerceix la lluna i el sol sobre la terra i que es dissipa, en part, en forma de calor ($6\cdot 10^{11} \text{ W}$).

Pel que fa a les entrades internes apareixen, per ordre d'importància decreixent, les cadenes de desintegració radioactiva dels isòtops ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th i ^{40}K ($2,75\cdot 10^{13} \text{ W}$), la calor residual de la formació de la terra ($2,9\cdot 10^{13} \text{ W}$) i l'energia potencial derivada de la continua formació del nucli i l'escorça terrestre ($3,5\cdot 10^{10} - 4,8\cdot 10^{13} \text{ W}$).

Finalment, en referència als processos dissipadors d'energia, el més important és el flux de calor de la terra, el qual indica la taxa global de pèrdua de calor per la superfície terrestre i se situa entorn els $4,42\cdot 10^{13} \text{ W}$. Tanmateix, el vulcanisme i l'alimentació de la dinamo geomagnètica consumeixen $3,2\cdot 10^{11} \text{ W}$ i $1\cdot 10^{12} \text{ W}$ respectivament.

Val a dir, que tret del flux de calor de la terra, els darrers fenòmens esmentats, són difícilment aprofitables a través dels sistemes de GSHP. Per tant, en certa manera, no són objecte d'estudi d'aquest document. Tal i com es podrà observar més endavant, el fet que els materials geològics tinguin una capacitat tan modesta, encara que mesurable, de transmetre l'energia calorífica, implica que l'energia procedent del sol quedi emmagatzemada en els primers metres de sòl. Justament aquesta franja més superficial és la que dona cabuda a la majoria dels sistemes de GSHP. Per tant, tal i com s'avançava en l'apartat 2.1.1, es reafirma el fet que l'energia solar és cabdal per la implementació dels complexos de GSHP.

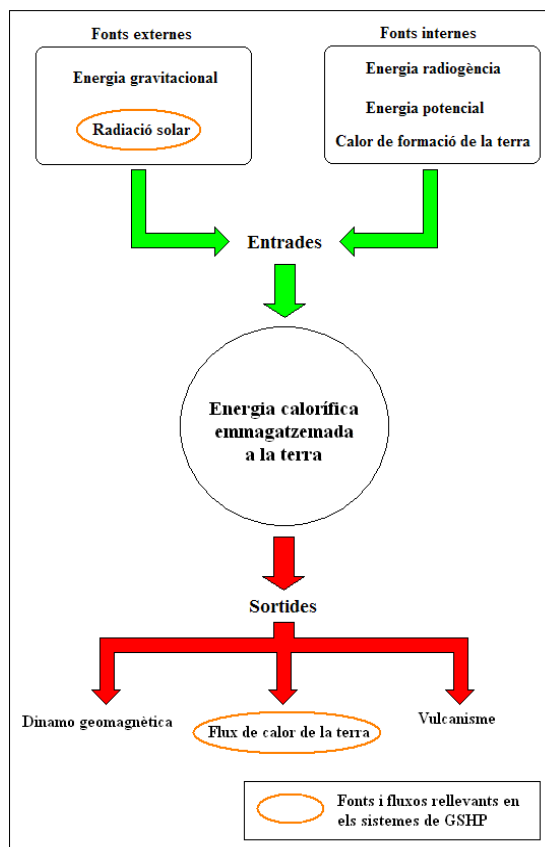


Figura 2.21: Principals fonts i processos dissipadors d'energia del balanç calorífic planetari. Elaboració pròpia.

b) Paràmetres termogeològics i flux de calor

Des del punt de vista tèrmic, el medi geològic es caracteritza per la seva capacitat d'emmagatzemar i transmetre calor. Ambdós fenòmens es troben extremadament lligats a les característiques i condicions del medi. En aquest sentit, la litologia, la granulometria, el nivell de saturació d'aigua, la temperatura, entre d'altres factors, són variables que influeixen directament en les propietats tèrmiques del subsòl.

Així mateix, la capacitat calorífica (S_c) i la conductivitat tèrmica (λ) són els paràmetres més importants en el moment d'expressar la relació entre l'energia calorífica i la geologia. Val a dir, que les explicacions que apareixen tot seguit són una molt bona base conceptual per comprendre el següent apartat referent a les propietats hidrogeològiques.

➤ Capacitat calorífica

La capacitat de retenir la calor en un entorn determinat, format per un material o element concret, s'anomena capacitat calorífica. Per tant, estrictament, aquest paràmetre es defineix com la calor (ΔQ) necessària per elevar la temperatura d'un cos determinat a ΔT .

$$S_c = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

(expressió 2.7)

Amb l'objectiu de facilitar la comprensió conceptual, aquest valor s'acostuma a expressar per unitat de massa o de volum. Així mateix en el primer cas, s'estableix el nom de capacitat calorífica específica o isobàrica (S_{cp}) en $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$, mentre que en el segon cas el paràmetre s'anomena capacitat calorífica volumètrica (S_{cv}) en $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$. Tot i tenir aquestes dues maneres d'expressar la capacitat calorífica, en aquest document s'aplicarà la nomenclatura referida a unitat de volum (S_{cv}).

Pel fet que els materials geològics no es formen per un sol tipus de molècules, sinó que són una amalgama de minerals i altres elements (principalment aire i aigua) és necessari establir una capacitat calorífica que ponderi els valors d'aquest paràmetre referents a tots els minerals constitueixen un determinat context geològic. Per tant, s'estableix, en compliment de la Llei de Kopp, que la capacitat calorífica específica d'un determinat compost és igual a la suma proporcional dels valors dels seus respectius components (Clauser, C, 2006; Le Feuvre, P., 2007).

$$S_{cv} = \sum_{i=1}^N n_i \cdot S_{cv_i}$$

(expressió 2.8)

on S_{cv} és la capacitat calorífica específica ($J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$), N és el nombre total de components, n_i és la proporció del component i (adimensional) i S_{cv_i} és la capacitat calorífica específica del component i ($J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$)

Com bé s'ha exposat en el paràgraf anterior, el fet de poder establir un coeficient calorífic ponderat és especialment útil en situacions reals, no només pel que fa a la

gran diversitat de minerals que conformen les roques, sinó perquè en el compartiment geològic sol haver-hi un contingut molt variable d'aigua (sobretot en estat líquid) i d'aire, ambdós elements amb valors d'aquesta constant molt diferents.

➤ **Conductivitat tèrmica**

Juntament amb la capacitat calorífica, el segon paràmetre que descriu les característiques tèrmiques de les roques és la conductivitat tèrmica. Aquesta propietat fa referència a la facilitat que té un cos per transmetre la calor en termes de $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ (Banks, D, 2008; Le Feuvre, P., 2007).

Donat que és un paràmetre característic de cada mineral és necessari, per tractar amb situacions reals, calcular, de forma anàloga a l'expressió 2.8, un valor ponderat de conductivitat tèrmica en funció de la composició del material en qüestió. En aquest sentit a la natura existeix, en funció del tipus de roca, una gran variabilitat dels valors d'aquesta propietat.

El fet que, a nivell microscòpic, la conductivitat tèrmica indiqui la capacitat d'una molècula amb una energia tèrmica determinada per excitar-ne a una altra d'adjacent, implica, tal i com es constata en el següent apartat, una forta relació amb el transport de calor per conducció.

De la mateixa manera que la capacitat calorífica, la conductivitat tèrmica d'un material determinat augmenta en incrementar la seva temperatura. Ara bé, en aquest treball es considera una propietat constant donat el rang de temperatura amb el que es treballa.

És important fer esment a la relació que s'estableix entre la capacitat calorífica i la conductivitat tèrmica. Així mateix, el producte de la capacitat calorífica específica es relaciona amb la conductivitat tèrmica (λ) i la difusivitat tèrmica (κ) (Clauser, C, 2006).

$$\rho \cdot Scv = \frac{\lambda}{\kappa}$$

(expressió 2.9)

on ρ és la densitat en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, S_{cv} és la capacitat calorífica específica en $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$, λ és la conductivitat tèrmica en $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ i κ és la difusivitat tèrmica en $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

c) Fenòmens de transport de calor

Fins ara, ha quedat palès el fet que els materials, en aquest cas geològics, tenen la capacitat d'emmagatzemar (S_c) i transmetre energia (λ). Tenint en compte aquesta premissa, a continuació s'exposen els diferents tipus de transports d'energia calorífica continguda en els materials.

D'aquesta manera, la transmissió de calor queda resumida a tres processos diferents: conducció, convecció i radiació. Cal avançar el fet que tot i que existeix tal diversitat de fenòmens, el referent a la conducció acostuma a ser notablement més important que els altres dos. No obstant això, en determinades situacions la convecció, també anomenada advecció, i la radiació poden prendre un cert protagonisme, fins i tot comparable al fenomen normalment dominant.

➤ Conducció

El transport de calor per conducció és la transmissió de calor a través d'un determinat material per contacte molecular directe seguint un gradient tèrmic (Figura 2.22). En aquest sentit, existeixen grans diferències en el flux de calor en funció de l'estat (sòlid, líquid, gas) en el que es troba l'entorn.

El fet que la conducció depengui directament de la interacció física de les molècules, implica que l'estat físic amb un grau d'agregació molecular major (baixa entropia) és capaç de transmetre, per conducció, la calor més eficaçment (Zhang, H.F, et al, 2006; Niemi, A et al, 2003).

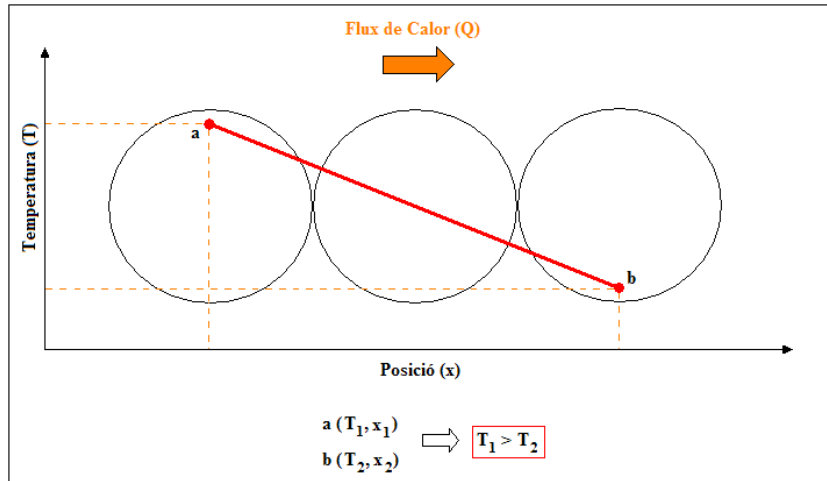


Figura 2.22: Representació del transport de calor per conducció. Elaboració pròpia.

La figura anterior, sintetitza el principi que regeix la Llei per excel·lència del transport de calor. Així, la Llei de Fourier (expressió 2.10), anàloga tal i com es veurà més endavant a la Llei de Darcy (expressió 2.19), expressa el flux de calor que es transmet a través d'un material amb una conductivitat tèrmica concreta i per una secció determinada (Banks, D., 2008).

$$Q_c = -\lambda A \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)$$

(expressió 2.10)

on Q_c és el flux de calor (W) transportat per conducció, λ és la conductivitat tèrmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), A és la secció del material per on flueix la calor (m^2) i $\Delta T/\Delta x$ és el gradient tèrmic ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$).

➤ Convecció

A l'inici d'aquest apartat s'avançava el fet que el transport de calor per conducció acostuma a ser, tret d'algunes situacions, el més important. Així doncs, la convecció, esdevé rellevant en els entorns saturats d'aigua. No obstant això, aquesta no és l'única condició sinó que, a més a més, és important que hi existeixi moviment, és a dir, un

flux d'aigua en aquest cas. En conseqüència, la permeabilitat del medi, o la transmissivitat de l'aqüífer que conté l'aigua és un paràmetre fonamental.

Qualitativament, la convecció, també anomenada advecció, és el transport de calor a través d'un fluid transportador. En altres paraules, l'energia calorífica emmagatzemada en un determinat volum d'aigua i a una temperatura concreta és mou seguint la direcció del flux subterrani. Per tant, no sols és important considerar els paràmetres hidràulics de la formació hidrogeològica, sinó que la quantitat de calor transportada depèn de les característiques tèrmiques del fluid transportador (Banks, D., 2008).

A nivell quantitatiu, les lleis físiques que intervenen en el flux de calor són la Llei de Darcy per descriure el flux subterrani (apartat c, punt 2.2.2.) i la Llei de refredament de Newton per quantificar la calor transmesa d'un cos a un fluid en moviment. Aquesta última expressió es descriu a continuació (Banks, D., 2008).

$$Q_a = \bar{h} \cdot (T_{\text{cos}} - T_{\text{fluid}})$$

(expressió 2.11)

on Q_a és la calor transmesa del cos cap al fluid ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), \bar{h} és el coeficient de transmissió de calor ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), el qual depèn de les característiques del fluid, i $(T_{\text{cos}} - T_{\text{fluid}})$ és la diferència de temperatures entre la matriu o cos i fluid ($^{\circ}\text{K}$).

Finalment, a través dels conceptes anteriors, es pot deduir la quantitat d'energia calorífica transportada pel flux subterrani com el producte de la capacitat calorífica, la diferència de temperatures entre l'entorn i el fluid transportador i el flux subterrani (Banks, D., 2008).

$$Q = Sc_{\text{fluid}} \cdot \Delta T \cdot Z$$

(expressió 2.12)

on Q és la quantitat de calor continguda en el fluid transportador (W), Sc_{fluid} és la capacitat calorífica volumètrica del fluid ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$), ΔT és la diferència de temperatures (K) entre l'entorn i el fluid i Z és el cabal subterrani ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

➤ **Radiació**

L'últim dels fenòmens de transport de calor és la radiació. Tot i que cal fer-li esment a causa de la seva existència, no és objecte d'estudi del present document. Això és degut a causa de la poca importància que pren en el rang de temperatures que es considera en el present treball.

Segons la Llei de Stefan-Boltzmann, la quantitat de calor radiada, és directament proporcional a la quarta potència de la temperatura. Per tant, donat que es tracta de sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia, la radiació queda molt relativitzada enfront la conducció i, en alguns casos la convecció (Banks, D, 2008).

$$E_r = \sigma \cdot T^4$$

(expressió 2.13)

on E_r és l'energia radiada per un determinat cos ($W \cdot m^{-2}$), σ és la constant de Stefan-Boltzmann que val $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ i T és la temperatura del cos en qüestió (K)

➤ **Fenòmens de transport i tipus de sistema de GSHP**

Sabent que cada tipus de sistema de GSHP (apartat 3.1.7) s'adapta a unes determinades característiques de l'entorn geològic, consegüentment, en funció del tipus de circuit primari, seran protagonistes uns o altres fenòmens de transport en l'intercanvi de calor.

Així mateix, el següent esquema (Figura 3.23) sintetitza el tipus de transport dominant en cada una de les etapes de l'intercanvi de calor.

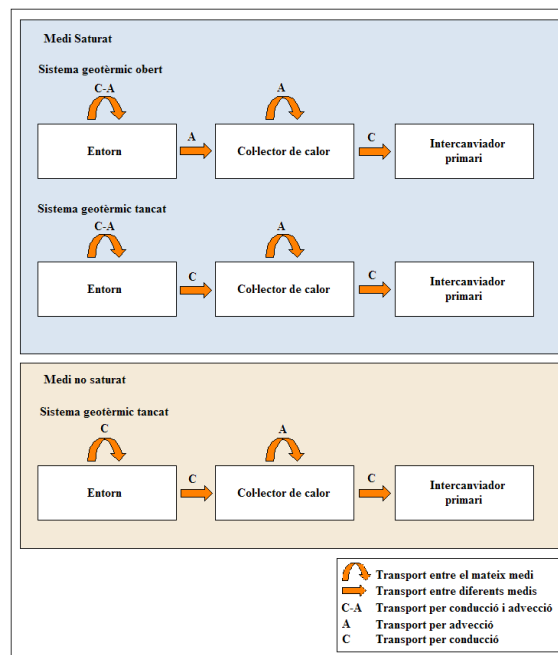


Figura 2.23: Fenòmens de transport de calor en funció de la saturació hídrica del medi i del sistema de GSHP. Elaboració pròpia.

d) Test de Resposta Tèrmica

En el disseny dels sistemes de GSHP, és fonamental comptar amb valors fiables dels paràmetres tèrmics descrits en els apartats anteriors. En aquest sentit, existeixen 3 vies per esbrinar tals característiques (Banks, D, 2008).

- Taules genèriques de valors semblants a les presents a l'annex A.
- Mesures de laboratoris a través de testimonis procedents de la zona d'estudi.
- Proves de camp com per exemple els Tests de Resposta Tèrmica (TRT), de l'anglès "Thermal Response Test".

De les tres metodologies aquí presents, els TRT són els procediments que acostumen a donar més bon resultat. El fet de treballar en condicions reals, així com la possibilitat de prendre una mesura directa de λ , comporta l'obtenció d'uns resultats molt precisos.

Aquesta prova pilot "in situ" consisteix a grans trets, en monitoritzar, durant un període de temps comprès entre les 48h i 72h, un fluid portador de calor que transcorre a través d'un sondeig geotèrmic (Figura 2.24). Aquest control permet mesurar la temperatura del fluid a l'entrada i a la sortida del sondeig, del que s'obté directament el valor de λ (Gehlind, S. 2002).

Els requisits més destacats per assolir uns resultats satisfactoris, són: d'una banda la realització de la prova en les mateixes característiques de sondeig (diàmetre, profunditat...) que la posterior instal·lació geotèrmica; i de l'altra, el fet que la circulació del fluid comporti sempre una entrada constant de calor a la perforació.

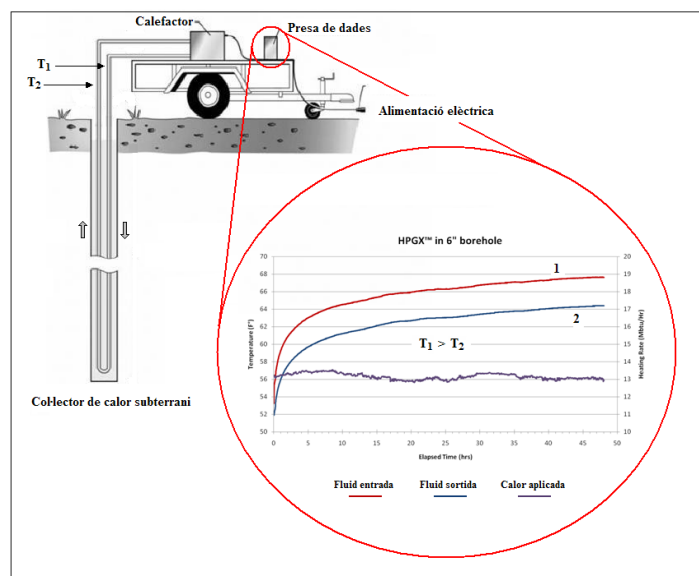


Figura 2.24: Equipament i resultats d'un TRT. Adaptat de THERMONEXUS, (2010).

2.2.2 Propietats hidrogeològiques

Si bé és cert que no tots els sistemes de GSHP acostumen a treballar en medi saturat, com per exemple els complexos tancats horitzontals, per a alguns tipus de dispositius les propietats hidrogeològiques de l'entorn són fonamentals per obtenir uns rendiments acceptables. Així doncs, aquest apartat fa referència, sobretot, als sistemes oberts i tancats verticals, sempre i quan aquests últims funcionin en medi saturat. Sent així, cal destacar que els casos d'estudi que es presenten posteriorment (capítol 3) s'emmarquen tots en medi saturat.

De totes maneres, no es pot oblidar que els col·lectors horitzontals, es troben molt a la vora de la superfície terrestre, i per tant, certs paràmetres pateixen fluctuacions considerables al llarg de l'any. En aquest sentit, canvis en el grau d'humitat del sòl poden comportar, alteracions en la seva capacitat d'emmagatzematge de calor, així com variacions en la respectiva capacitat de transmetre aquesta energia. Aquests dos últims conceptes es tracten amb deteniment en el següent punt.

En definitiva, ja sigui de forma directa o no tan directa, el contingut d'aigua en el compartiment terrestre afecta, en major o menor mesura, a tots els tipus de sistemes geotèrmics de GSHP. Per tant, les condicions geològiques i hidrogeològiques de treball són les que dicten, en última instància, el tipus de col·lector a utilitzar.

a) Concepte i tipus d'aqüífers

Abans fer èmfasi en les variables hidrogeològiques és convenient, en primer lloc, fer un repàs al concepte d'aqüífer, així com als diferents tipus de formacions hidrogeològiques existents amb capacitat de transmissió d'aigua. Cal, però, tenir en compte que no tots els materials tenen aquesta capacitat. Per tant, i només com a títol informatiu, existeix una classificació de les formacions hidrogeològiques en funció del seu potencial en la transmissió d'aigua. Ara bé, aquest treball centra la seva atenció en els aqüífers, els únics capaços de cedir aigua en quantitats significatives i susceptibles de ser econòmicament rentables.

Així mateix, segons el Diccionari de Geologia de l'Institut d'Estudis Catalans, un aqüífer es defineix com aquella “*Formació geològica porosa i permeable en la qual s'emmagatzema i circula l'aigua subterrània, tot aprofitant la porositat de la roca que l'acull i la pressió hidrostàtica present allà. Hi és possible una captació d'aigua*”.

Partint d'aquesta definició i donats els nombrosos contextos geològics existents, cadascun amb unes propietats hidràuliques concretes, és fàcil intuir que existeix més d'un tipus d'aqüífer. Concretament es poden definir, en funció dels materials que constitueixen la zona saturada, tres formacions hidrogeològiques diferents amb capacitat de transmetre aigua.

➤ Aqüífer lliure

Es parla d'aqüífer lliure (Figura 2.25) quan els porus o fissures del medi geològic estan saturats d'aigua a pressió atmosfèrica. Conseqüentment, el fluid contingut en la formació no es veu afectat per cap més força que la pròpia gravetat. Aquí, el nivell freàtic, coincideix amb el nivell piezomètric (d'ara endavant N.P.).

En aquest tipus de formacions, la zona saturada tindrà sempre una secció menor o igual que la formació geològica corresponent. En el cas que els dos gruixos s'igualin es donarà una situació de surgència i per tant hi haurà una interacció directa entre les aigües subterrànies i superficials. Normalment, les planes al·luvials conformen un context ideal per l'existència d'aqüífers lliures (Martínez, P.E., et al., 2005; Sánchez, F.J., 2004).

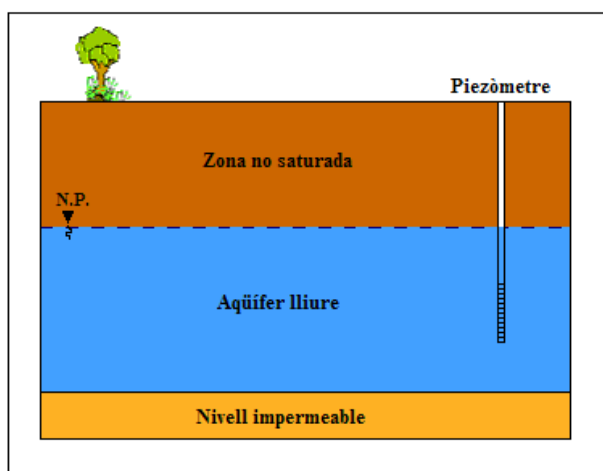


Figura 2.25: Esquema d'un aqüífer lliure. Elaboració pròpia.

➤ Aqüífer semiconfinat

Encara que és cert, que són tres les diferents vessants de les formacions hidrogeològiques, a partir d'aquí s'obre, en certa manera, un segon grup de formacions dins el grup d'aqüífers. Així mateix, en aquest cas, la zona saturada es troba compresa entre un nivell impermeable a la part inferior i un aqüítard (permeabilitat baixa, tot i que no impermeable) a la part superior (Figura 2.26). Sovint, l'aigua continguda en el gruix saturat, es troba a una pressió més elevada que en el cas d'un aqüífer lliure. Per tant, aquí, a més de considerar la gravetat, també cal tenir en compte la pressió que exerceix l'excés d'aigua. Aquesta força addicional, queda pal·lesa quan el nivell piezomètric és troba per sobre del nivell freàtic. Quan a nivell de pous de captació es dona aquesta situació, es parla de pous artesianos. Si la pressió intersticial és suficientment important com per situar el nivell piezomètric de l'aqüífer a la superfície terrestre, caldrà parlar d'un pou surgent (Martínez, P.E., et al, 2005; Sánchez, F.J., 2004).

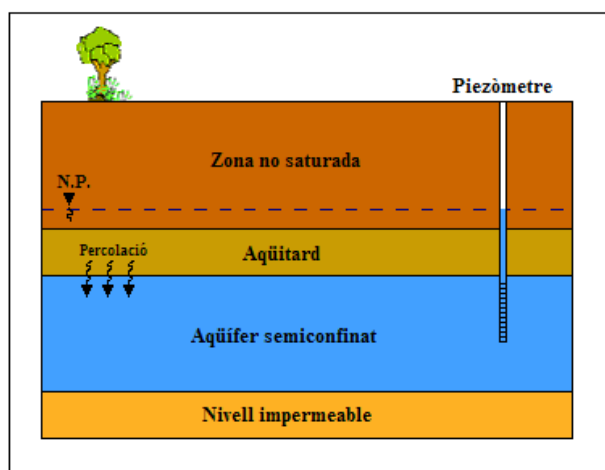


Figura 2.26: Esquema d'un aqüífer semiconfinat. Elaboració pròpia.

➤ Aqüífer confinat

Tot i presentar característiques molt similars als aqüífers semiconfinats, en el sentit que aquests també es troben a una pressió major que l'atmosfèrica, cal fer aquesta distinció ja que les formacions hidrogeològiques confinades (Figura 2.27) comprenen un nivell "impermeable" a la part superior. De fet, els aqüífers semiconfinats s'haurien d'incloure, per definició, en aquesta categoria, degut que també es troben a una certa

pressió. Per tant l'única diferència que hi ha entre ambdós formacions és l'escala temporal en el ritme de filtració de l'aigua a través del nivell confinant (estrat impermeable o aquítard), sent relativament baix en els sistemes semiconfinats, i extremadament lent en els nivells impermeables (Martínez, P.E., et al, 2005; Sánchez, F.J., 2004)

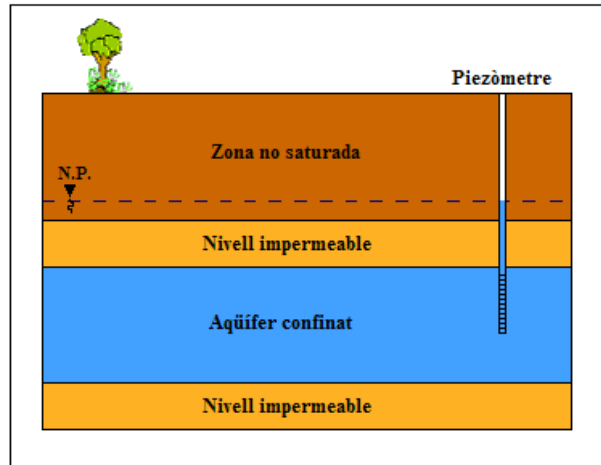


Figura 2.27: Esquema d'un aqüífer confinat. Elaboració pròpia.

És important destacar que l'existència d'un aquítard o bé d'un nivell "impermeable" per sobre de la formació hidrogeològica no comporta, sempre, l'etiqueta d'aqüífer semiconfinat o confinat (Figura 2.28). A fi de poder realitzar tal classificació, és indispensable la saturació total de l'aqüífer. Per tant, sempre que el nivell hidràulic sigui el mateix que el piezomètric, s'haurà de classificar la formació com a aqüífer lliure. En el cas que els dos nivells difereixin, es podrà qualificar la formació d'aqüífer confinat o semiconfinat, sempre en funció de la permeabilitat del nivell aïllant.

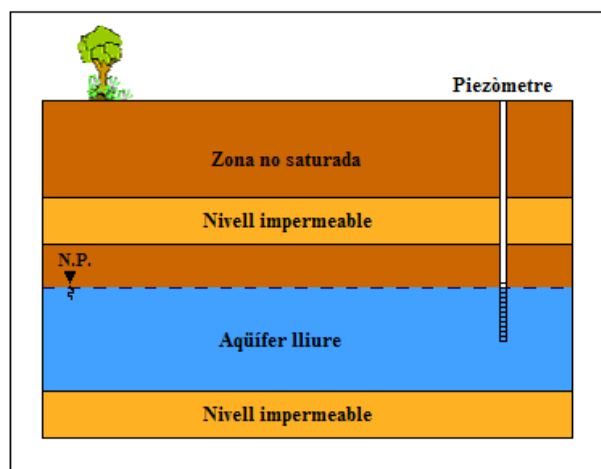


Figura 2.28: Esquema d'un aqüífer lliure entre dos nivells confinants. Elaboració pròpia.

b) Els aqüífers en el cicle hidrològic

Després de clarificar diferents conceptes lligats als aqüífers, a fi d'entendre com interacciona l'aigua subterrània amb la resta de compartiments ambientals, és important contextualitzar-la en el cicle hidrològic.

Tot i que els aqüífers engloben un 30,1% de tota l'aigua dolça que hi ha a la terra, aquesta només acapara el 2,5% de tota la massa d'aigua del planeta, la resta, un 97,5%, correspon a l'aigua salada dels mars i oceans (Shiklomanov, I.A. 1997).

Una de les principals funcions que prenen les aigües subterrànies és el manteniment del cabal del riu després d'un episodi plujós. El fet que l'escolament subterrani sigui molt més lent que l'escolament superficial fa del medi geològic un bon reservori hídric. Sense l'ocurrència d'aquest fenomen, el cicle hidrològic es completaria en un període de temps molt més curt i conseqüentment, molts components dels ecosistemes tindrien dificultats en assolir el seu cicle biològic (Martínez, P.E., et al., 2005).

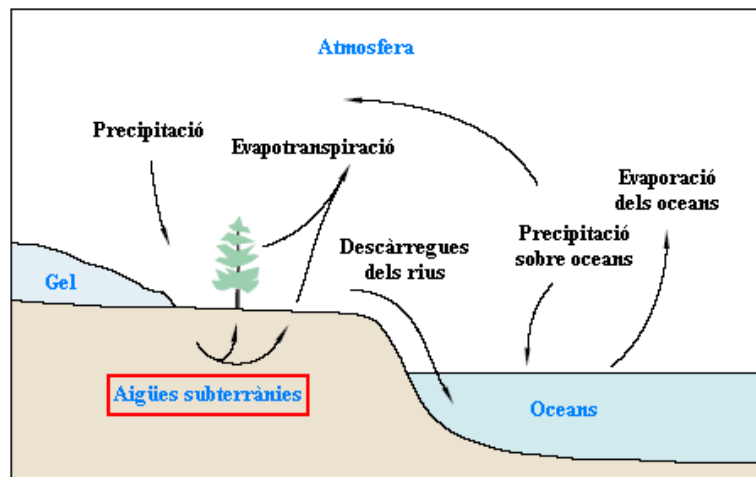


Figura 2.29: Les aigües subterrànies en el cicle hidrològic. Adaptat de Winter, T.C. et al., 1998.

Pel sol fet de formar part del cicle hidrològic, les aigües subterrànies interaccionen amb els diferents compartiments del cicle amb el conseqüent intercanvi de matèria (Figura 2.29). Si bé existeixen fluxos unidireccionals, altres poden prendre protagonisme en les entrades o les sortides en funció del moment i/o situació considerada.

En general, un aqüífer pot relacionar-se amb les altres etapes del cicle a través de quatre processos: la recàrrega, interaccions amb aigües superficials i marines i l'evapotranspiració (Figura 2.30).

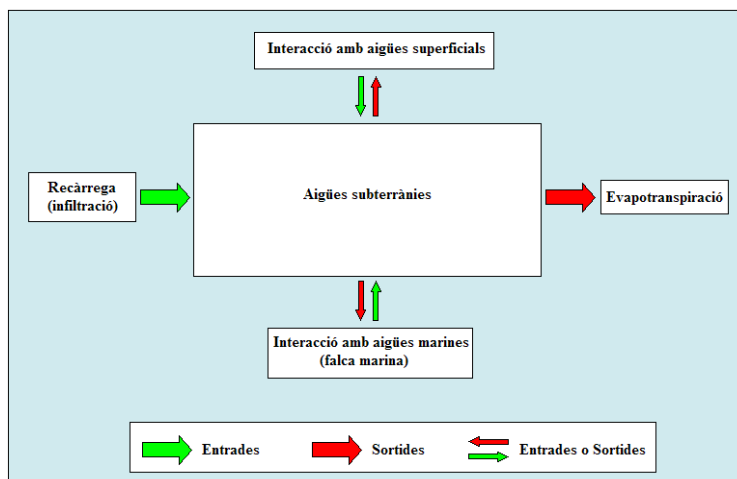


Figura 2.30: Relació de les aigües subterrànies amb altres fenòmens del cicle hidrològic. Elaboració pròpia.

Tal com el seu nom indica, la recàrrega representa el principal flux d'entrada, a través del qual s'alimenten les formacions hidrogeològiques. L'aigua precipitada s'infiltra per la zona vadosa, fins arribar a la superfície freàtica. Cal tenir present que no tota l'aigua precipitada acaba arribant al subsòl. La quantitat infiltrada depèn de múltiples factors, entre els quals hi apareixen la intensitat de la pluja i les característiques de la coberta del sòl. Tot aquell fluid que no continua el seu trajecte pel compartiment subterrani, passa a formar part de l'escolament superficial i, en menor mesura, de l'escolament subsuperficial (Sánchez, F.J., 2004).

Seguint amb les interaccions de l'aigua subterrània amb els altres compartiments ambientals, aquesta pot ser evapotranspirada pels components de la biosfera i/o bé evaporada en el propi sòl. En aquest cas, una part de l'aigua dels aqüífers i de la zona vadosa pot ascendir, per capil·laritat, fins als horitzons més propers a la superfície.

En tercer lloc, les aigües subterrànies també es poden relacionar amb altres cossos d'aigua superficials, com ara rius, llacs, aiguamolls... A diferència dels punts anteriors, aquí no hi ha una via únicament d'entrada o sortida, sinó, que en funció de la situació d'ambdós compartiments (aigües subterrànies i aigües superficials), hi pot haver una

pèrdua, o bé un guany d'aigua (Winter, T.C. et al., 1998). Així mateix, es realitza la següent diferenciació conceptual segons la relació riu-aqüífer:

- Riu influent: el riu cedeix, per gravetat, aigua a l'aqüífer tenint en compte que el nivell hidràulic de la formació hidrogeològica es troba per sota de la cota del riu.
- Riu efluent: l'aqüífer cedeix aigua al riu perquè el seu nivell hidràulic es troba per sobre de la cota del riu.

Per tant, el fet que un riu sigui influent o efluent depèn de la posició del nivell hidràulic de l'aqüífer respecte de la cota del riu. De fet, tals variacions impliquen un canvi en el sentit del gradient hidràulic (Figura 2.31).

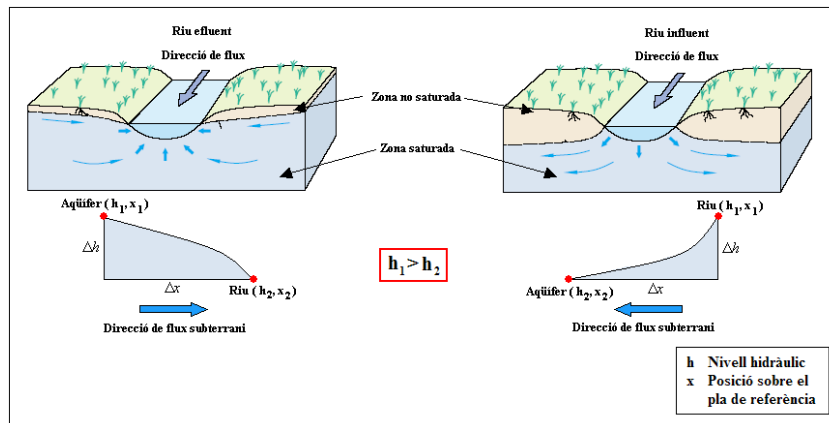


Figura 2.31: Relació riu-aqüífer. Adaptat de Winter, T.C. et al., 1998.

En aquest sentit durant els períodes estivals, quan els episodis d'estrès hídic són freqüents, es poden donar situacions d'escassetat d'aigua temporal. Aquest fenomen resulta especialment preocupant per les masses d'aigua superficial. Pel fet no existeix cap barrera física entre elles i l'atmosfera, fa a les aigües superficials especialment vulnerables a les alteracions d'un sistema tan inestable com és el compartiment atmosfèric.

Finalment, l'últim dels grans punts d'interacció de l'aigua subterrània amb els altres compartiments ambientals es dona a les zones litorals, concretament a la costa. Aquí l'aigua dolça dels aqüífers es troba amb l'aigua salada del mar, sent el primer tipus d'aigua menys dens que el segon. Aquesta diferència de densitats dona lloc a

l'anomenada intrusió marina, una mescla d'ambdós tipus de fluids amb una densitat superior a la respectiva de l'aigua dolça però inferior a la densitat de l'aigua salada. (Martínez, P.E, et al, 2005).

c) Paràmetres hidràulics i flux subterrani

Abans de fer èmfasi en l'expressió empírica que governa el flux subterrani, és necessari introduir els principals paràmetres que defineixen un aqüífer. Reprenent la definició d'aqüífer del Diccionari de Geologia de l'Institut d'Estudis Catalans, un aqüífer és aquella "Formació geològica [...] en la qual s'hi emmagatzema i circula l'aigua subterrània [...]". Per tant, són dos els paràmetres que caracteritzen una formació hidrogeològica; el coeficient d'emmagatzematge (S) i la permeabilitat (K).

➤ Coeficient d'emmagatzematge

Tal i com el seu nom indica, aquest primer paràmetre expressa la quantitat d'aigua que pot oferir una columna saturada de base unitària i d'alçada el gruix de l'aqüífer, en un descens de nivell unitari. És important no confondre'l amb el coeficient d'emmagatzematge específic (S_s), que tot i ser molt similar al concepte aquí present, només fa referència a l'aigua continguda en un m^3 d'aqüífer.

El valor d'aquest paràmetre varia uns quants ordres de magnitud en funció del tipus d'aqüífer considerat, sent major en les formacions lliures i menor en les confinades. La justificació d'aquest fet recau en l'origen (pressió adicional o bé porositat efectiva) de l'aigua extreta en cada cas (Sánchez, F.J., 2004).

$$S = m_e$$

(expressió 2.14)

on S és el coeficient d'emmagatzematge en un aqüífer lliure (adimensional) i m_e és la porositat efectiva (adimensional).

Així mateix, una captació en un aqüífer lliure, proporciona la quantitat d'aigua corresponent a la porositat efectiva (porus interconnectats entre si) del propi aqüífer,

amb el conseqüent descens del nivell freàtic. Generalment, el coeficient d'emmagatzematge en aquestes situacions sol prendre valors compresos entre els ordres de magnitud 10^{-1} i 10^{-2} .

Per contra, en un aqüífer confinat o semiconfinat, l'aigua prové de l'excés de pressió intersticial. Per tant, el volum de fluid susceptible de ser extret es troba directament relacionat amb les característiques elàstiques de l'aigua i del propi medi geològic. En aquest cas, no apareix una disminució física del gruix saturat, tot i que sí que s'aprecia un descens del nivell piezomètric. Tanmateix, cal puntualitzar que en el moment que el gruix saturat experimenta una davallada, la formació hidrogeològica passa d'una situació confinada a una de lliure, és a dir, a pressió atmosfèrica.

Així mateix, la capacitat d'emmagatzematge en una situació confinada acostuma a trobar-se en ordres de magnitud compresos entre 10^{-3} i 10^{-5} i ve donada per la següent expressió:

$$S = \gamma \cdot b \cdot (m_e \cdot \beta + \alpha)$$

(expressió 2.15)

on S és la capacitat d'emmagatzematge en un aqüífer confinat o semiconfinat (adimensional), γ és la massa específica de l'aigua ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$), b és el gruix saturat de l'aqüífer (m), m_e és la porositat efectiva (adimensional), β és el mòdul de compressibilitat de l'aigua ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) i α és el mòdul de compressibilitat de l'aqüífer ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$).

Donada la baixa capacitat de compressió que té un fluid com l'aigua líquida, es pot extreure relativament poca aigua d'un aqüífer confinat. En la majoria dels casos, tot i que la compressibilitat de l'aqüífer també és molt baixa, la major part de l'aigua extreta en aquesta situació prové d'aquest terme (Martínez, P.E, et al, 2005).

En qualsevol cas, la porositat efectiva acaba prenent un paper important en la capacitat d'emmagatzematge d'una formació hidrogeològica, si bé en els casos de confinament, el seu valor queda relativitzat pel mòdul de compressibilitat de l'aqüífer, el qual és considerablement més petit. Arribats a aquest punt, és necessari recordar que no tota l'aigua continguda en l'aqüífer es susceptible de ser aprofitada, sinó que

únicament es podrà extreure el fluid que ocupa els buits creats per la porositat efectiva.

➤ Permeabilitat

Si bé la variable anterior fa referència a l'emmagatzematge d'aigua en un cos porós, ara cal definir el segon paràmetre que caracteritza les formacions hidrogeològiques, és a dir, la capacitat de transmetre l'aigua pel seu interior.

Així mateix, la permeabilitat (K) és la constant de proporcionalitat que expressa la relació entre el cabal que passa a través d'un medi porós i el gradient hidràulic entre dos punts del mateix medi (expressió 2.18.). A efectes pràctics, la permeabilitat representa la facilitat que ofereix un material porós en ser travessat per fluid amb una massa específica i viscositat determinades, en aquest cas l'aigua. Per tant, és un paràmetre que recull les propietats del propi medi, corregides per un terme que inclou les característiques de l'aigua (Sánchez, F.J. 2004).

$$K = K_0 \cdot \frac{\gamma}{\mu}$$

(expressió 2.16)

on K és la permeabilitat ($m \cdot s^{-1}$), K_0 és la permeabilitat intrínseca del medi, (m^2), γ és la massa específica de l'aigua ($kg \cdot m^{-3}$) i μ és la viscositat de l'aigua ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$). Tot i que el factor temps es pot expressar en segons, en la majoria dels casos es treballa en unitats de dies per raons de comoditat en el tractament de les dades.

Pel fet que la permeabilitat es refereix, únicament, a un material en concret, aquesta propietat no és característica de tot el gruix saturat. Per aquest motiu cal definir la transmissivitat. D'aquesta manera s'obté la facilitat que té l'aigua en circular horitzontalment per un aqüífer.

$$T = K \cdot b$$

(expressió 2.17)

on T és la transmissivitat de l'aqüífer ($m^2 \cdot s^{-1}$), K és la permeabilitat ($m \cdot s^{-1}$) i b és el gruix saturat de l'aqüífer (m).

Ara bé, fins ara tan sols s'ha considerat una única permeabilitat, és a dir s'ha suposat que tota la matriu de l'aqüífer està formada per un sol tipus de material. En la majoria de les situacions reals el medi geològic és molt heterogeni, és a dir, que compta amb nombrosos tipus de materials, cadascun amb un valor determinat de permeabilitat. Conseqüentment, cal definir un paràmetre que ponderi les propietats de cada capa i doni com a resultat una permeabilitat representativa del gruix saturat en un punt determinat. En altres paraules cal definir una permeabilitat equivalent.

Donat que els casos d'estudi que es presenten en el capítol 3 compten, tots, amb un flux subterrani significatiu, la permeabilitat dels materials que formen l'aqüífer esdevé un paràmetre més important que el coeficient d'emmagatzematge en la transmissió de la calor. Per tant, a l'hora d'avaluar el rendiment dels sistemes de GSHP en un aquífer el paràmetre més crític és la permeabilitat dels seus materials.

➤ Flux subterrani

La hidrogeologia és una ciència relativament recent, que fins a mitjans del segle XIX no disposa d'una expressió empírica capaç d'explicar el moviment de l'aigua a través d'un cos porós. Concretament, l'any 1856 l'enginyer francès Henry Darcy desenvolupa el que avui en dia és la llei més important en el camp de la hidrogeologia.

En els seus estudis, Darcy conclou que el cabal que circula per un medi porós és directament proporcional a la secció transversal al flux, a la permeabilitat del medi, i a la disminució del potencial de pressió al llarg del medi (Martínez, P.E., et al, 2005).

$$Z = -KA \left(\frac{\Delta h}{\Delta x} \right)$$

(expressió 2.18)

on Z és el cabal d'aigua proporcionat per l'aqüífer ($m^3 \cdot s^{-1}$), K és la permeabilitat ($m \cdot s^{-1}$), A és la secció de l'aqüífer (m^2) i dh/dx és el gradient hidràulic (adimensional).

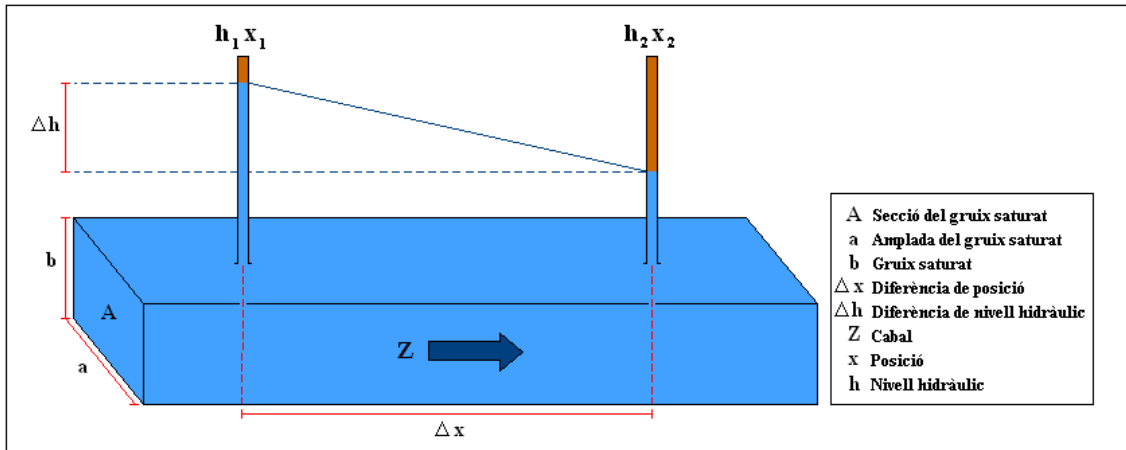


Figura 2.32: Representació gràfica de l'experiment de Darcy a través d'una zona saturada amb una permeabilitat K i un cabal Z de pas constant. Elaboració pròpia.

D'altra banda, la Llei de Darcy també es pot expressar en termes de cabal de pas per unitat de secció. Aquesta velocitat, també anomenada velocitat de Darcy, considera el fet que l'aigua de aquífer es mou a través de tota la secció de la zona saturada. Davant d'aquest fals supòsit, a fi d'obtenir el valor real de velocitat, cal integrar el concepte de porositat efectiva en el present paràmetre. Donat que s'ha de complir la llei de Darcy, el cabal de pas s'ha de mantenir constant a costa d'un increment en la velocitat del flux (Winter, T.C., et al., 1998; Sánchez, F.J. 2004).

$$\vec{v}_R = \frac{\vec{v}_d}{m_e}$$

(expressió 2.19)

on \vec{v}_R és la velocitat real del flux subterrani ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), \vec{v}_d és la velocitat de Darcy ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) i m_e és la porositat efectiva (adimensional).

A causa de la modesta velocitat amb la qual l'aigua transcorre a través dels porus, la Llei de Darcy és vàlida en la majoria de contextos hidrogeològics. Ara bé, en determinades situacions, on la velocitat és més important, el flux pren un règim turbulent i, conseqüentment, es deixa de complir la linealitat que exigeix Darcy entre la velocitat i el gradient hídrulic. Un exemple típic d'aquesta última situació són els aquífers càrstics, on la velocitat de flux és relativament gran degut a l'elevada porositat

secundària formada per dissolució que caracteritza aquests medis. Per comprovar el compliment de tal linealitat, cal recórrer nombre de Reynolds.

d) Assaig de bombeig

Un assaig de bombeig, tal i com el seu nom suggereix, és un mètode de camp dissenyat per obtenir els paràmetres hidràulics d'un aqüífer.

És important tenir en compte que existeixen diferents tipologies de captacions a implementar en funció del context geològic. Tan sols a títol informatiu i sense entrar amb més detall, algunes de les metodologies d'extracció d'aigua existents són els pous, les galeries, els drenatges i els sondeigs, sent els últims els més popularitzats en l'actualitat.

A nivell estructural, un dels punts fonamentals pel bon funcionament de la captació, és el revestiment de la canonada amb el material adequat. En funció de l'estrat geològic interceptat s'utilitza un o altre material. A fi d'evitar pèrdues d'eficiència, el recobriment a la zona saturada se sol realitzar amb materials, com les graves, amb una permeabilitat molt elevada, a ser possible, superior a la del propi material que forma l'aqüífer. Per contra, l'espai de perforació que queda entre la canonada i la zona no saturada, es farceix amb materials molt poc permeables, com per exemple la bentonita. Aquest segon tipus de revestiment es justifica per evitar possibles contaminacions de l'aigua subterrània a través de la perforació, així com les indesitjables connexions físiques entre diferents nivells d'aqüífer. L'últim de tots els recobriments es dona a la zona de la superfície per aïllar el pou del compartiment atmosfèric.

Després d'aquest incís referent a l'estructura d'una captació d'aigua subterrània, es reprèn l'assaig de bombeig com a procediment de determinació dels paràmetres hidràulics. En aquest sentit, generalment es tracta d'una metodologia, que en funció del tipus d'aqüífer considerat, s'utilitza per obtenir informació de la transmissivitat, permeabilitat, coeficient d'emmagatzematge, presència límits impermeables, punts de recàrrega...

D'altra banda, un assaig de bombeig no només ofereix dades sobre el propi aqüífer, sinó que permet determinar els paràmetres referents a la captació com són les pèrdues de càrrega degudes als errors estructurals de la mateixa, el cabal òptim d'extracció, el punt òptim de col·locació de la bomba... Finalment, l'assaig de bombeig també permet determinar el radi d'influència de la captació, el qual és molt important de cara a l'afectació a altres masses d'aigua que depenen de les aigües subterrànies. A més, el radi d'influència també és útil per esbrinar l'afectació a altres pous situats a la vora del sondeig en qüestió.

El procediment de treball en un assaig de bombeig es resumeix en bombar un cabal determinat en una captació i acte seguit es mesura el descens de nivell hidràulic produït en el propi pou. Aquest descens també es controla als piezòmetres d'observació situats dins el radi d'influència del pou d'extracció.

A nivell quantitatiu, el tipus d'aqüífer de treball, així com les condicions de l'assaig (en règim permanent o transitori) també condicionen les equacions matemàtiques a implementar (Taula 2.3). A la següent taula, es mostra un resum de les expressions més rellevants utilitzades en els assaigs de bombeig.

Tipus de formació hidrogeològica	Règim de treball	Expressió matemàtica
Aqüífer confinat	Estacionari	Equació de Thiem (1906)
	Transitori	Equació de Theis (1935)
	Transitori	Equació de Cooper-Jacob (1946)
Aqüífer lliure	Estacionari	Equació de Dupuit (1863)
	Transitori	Equació de Newman (1975)

Taula 2.3: Expressions matemàtiques a implementar en un assaig de bombeig en funció de l'aqüífer i del seu règim. Adaptat de Sánchez, F.J., 2004.

Tenint en compte que en els casos d'estudi d'aquest treball (Capítol 3) es considera el règim permanent (Taula 2.3), s'emprarà l'equació de Dupuit (expressió 2.20) per calcular els descensos produïts per una captació en aqüífers lliures, mentre que per als aqüífer confinats s'utilitzarà l'equació de Thiem (expressió 2.21).

$$H_0^2 - H^2 = \frac{Q}{\pi \cdot K} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

(expressió 2.20)

On H_0 és el nivell hidràulic en el moment d'iniciar l'assaig (m), H és el nivell hidràulic a una distància r de la captació un cop estabilitzat el descens (m), Q és el cabal constant de bombeig ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), K és la permeabilitat dels materials ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$), R és el radi d'influència de la captació (m) i r és la distància del piezòmetre d'observació respecte el centre del pou d'extracció (m).

$$s_r = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

(expressió 2.21)

On s_r és el descens de nivell piezomètric que es produeix a una distància r del pou de bombeig (m), Q és el cabal d'extracció ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), T és la transmissivitat de l'aquífer ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), R és el radi d'influència de la captació (m) i r és la distància del piezòmetre d'observació respecte el centre del pou d'extracció (m)

3. Casos d'estudi

En aquest últim capítol, es realitza l'anàlisi quantitatiu de l'efecte de les variacions en el context geològic i hidrogeològic referit a l'eficiència dels sistemes de GSHP verticals.

Més concretament, l'objectiu d'aquest punt és avaluar, l'eficiència energètica dels col·lectors de calor verticals en funció de les alteracions del nivell hidràulic i de la temperatura de l'aigua subterrània. Aquest procediment es repeteix per quatre situacions geològiques i hidrogeològiques diferents, totes elles situades al Nord-Est de Catalunya, més concretament a les Comarques de La Selva i La Garrotxa.

La majoria dels resultats derivats del següent anàlisi es presenten, en forma de gràfics de variacions paramètriques mensuals, fet que ajuda en la posterior comparació dels diferents casos d'estudi. Cada variació percentual es troba referida a la diferència entre el valor màxim i mínim mensual del paràmetre en qüestió. Per consultar, tot el procediment de càlcul s'ha de recórrer als annexos indicats a cada subcapítol.

3.1. Metodologia

El primer pas per analitzar els següents casos d'estudi, és estimar una càrrega tèrmica per calefacció i per refrigeració comuna. A fi de poder comparar els resultats obtinguts en els diferents contextos hidrogeològics, s'ha pres com a referència un habitatge estàndard amb les característiques que es presenten a la figura 3.1.

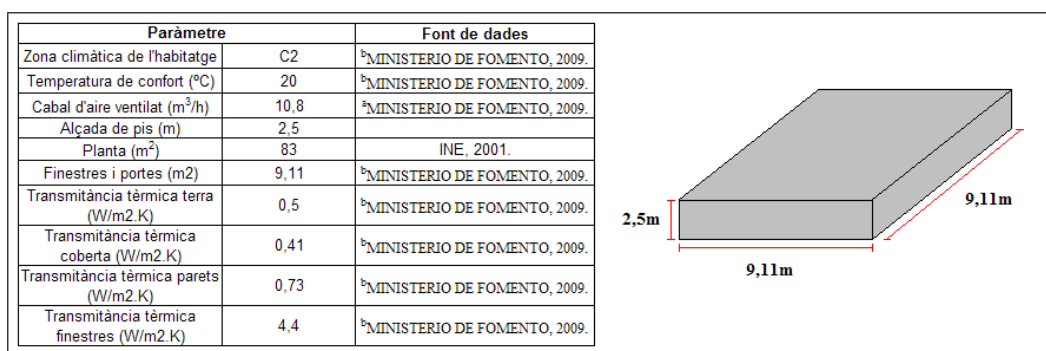


Figura 3.1: Característiques de l'habitatge estàndard utilitzat en els casos d'estudi. Elaboració pròpia

Aquests requisits fan referència, en molts casos, als valors mínims exigits pel Código Técnico de la Edificación (CTE). Conseqüentment, si es comparessin les càrregues

tèrmiques del present habitatge amb les respectives demandes d'un apartament convencional, s'observaria com els valors obtinguts en el present exercici apareixen notablement sobreestimats. La raó d'aquest fet es comprovar l'eficiència dels sistemes de GSHP en l'escenari menys favorable, tèrmicament parlant, que marca la legislació vigent.

Juntament amb els paràmetres tèrmics anteriors, les dades meteorològiques de l'any 2009 a l'estació de Vilobí d'Onyar permeten calcular les respectives càrregues tèrmiques (annex B), entorn les quals es realitzen la resta de càlculs. Els resultats d'aquest exercici es mostren en la figura 3.2.

Pel fet que el present document se centra en les característiques del subsòl, se suposa que la demanda tèrmica per un habitatge situat a les comarques gironines de La Selva i La Garrotxa és la mateixa. D'aquesta manera, s'aconsegueix suprimir la variable climatològica i centrar els càlculs, únicament, en el factor geològic i hidrogeològic.

Per tal de facilitar el tractament de la informació, en l'obtenció de les demandes tèrmiques, sols es tenen en compte les pèrdues de calor per conducció i per advecció. Així, la demanda tèrmica per calefacció equival a la suma de la calor transmesa per les unitats estructurals i la calor extreta per ventilació.

D'altra banda, pel que fa al propi sistema de GSHP, l'estudi se centra en els col·lectors verticals. En referència a la bomba de calor del sistema, es consideren quatre valors de COP (Taula 3.1), d'acord amb els requisits d'eficiència mínims que estableix Energy Star (2010).

Tipus de sistema	COP _C	COP _H
Sistema de GSHP amb col·lector tancat	4,7	3,5
Sistema de GSHP amb col·lector obert	5,33	3,8

Taula 3.1: Valors de COP requerits segons Energy Star, a partir del 1 de gener del 2011. Adaptat de ENERGY STAR, 2010.

Finalment, a fi d'evitar el tractament de punts que no són estrictament l'objectiu de l'estudi, així com per facilitar el tractament de la informació, s'assumeix el compliment dels següents supòsits:

- Càrrega tèrmica mitjana màxima com a referència per a tots els càlculs.
- Principi de mínim cost (mínima profunditat dels pou/s).
- Principi de màxima eficiència (múltiples pous).
- Règim estacionari (radis d'influència fixats).
- Disseny perfecte del sistema. S'assumeix que tot el medi proveeix la totalitat de l'energia requerida pel sistema.

A nivell de la informació hidrogeològica de base, s'han emprat dades de temperatura i de nivell d'aigua de diferents pous de la zona de Santa Coloma de Farners i Olot (Taula 3.2). Aquests resultats de camp, han estat obtinguts a través de sensors (DIVER) de nivell d'aigua i de temperatura instal·lats pel Dr. Albert Folch i Sancho i pel Dr. Joan Bach i Plaza, ambdós de la Unitat de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia del Departament de Geologia de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Tanmateix, el període de mostreig en el cas de Santa Coloma de Farners s'emmarca en diferents lapses mensuals de l'any 2009, mentre que la presa de dades a la Garrotxa engloba tot l'any 2008.

Topònim	Material geològic	Permeabilitat (m/dia)	Porositat (%)	Potència dels materials (m)	tipus d'aquífer
Cultius Myrtus superficial	Al·luvial d'origen granític	2,6	20	7	Lliure
Mas Llunes	Sauló	1,8	15	10	Lliure
Mas Malavila	Arcoses	6,9	3	30	Lliure
Olot	Basalts fracturats	100	27,5	11	Confinat

Taula 3.2: Característiques geològiques i hidrogeològiques de les unitats d'estudi. Adaptat d'ACA 2004.

3.2. Resultats i Discussió

A continuació es presenten els resultats obtinguts en l'avaluació de l'eficiència dels sistemes de GSHP en relació a les variacions de nivell hidràulic i de temperatura en diferents contextos geològics.

Donada la considerable quantitat de càlculs realitzats en aquest apartat, per poder observar, pas a pas, el desenvolupament dels mateixos, cal consultar l'annex que es troba en el suport digital adjunt.

3.2.1. Evolució de la càrrega tèrmica anual

Pel fet que la demanda tèrmica d'un habitatge es calcula en base a les diferències de temperatura entre el seu interior i l'exterior, el resultat d'aquest indicador es troba íntimament lligat amb la diferència d'aquestes dues temperatures.

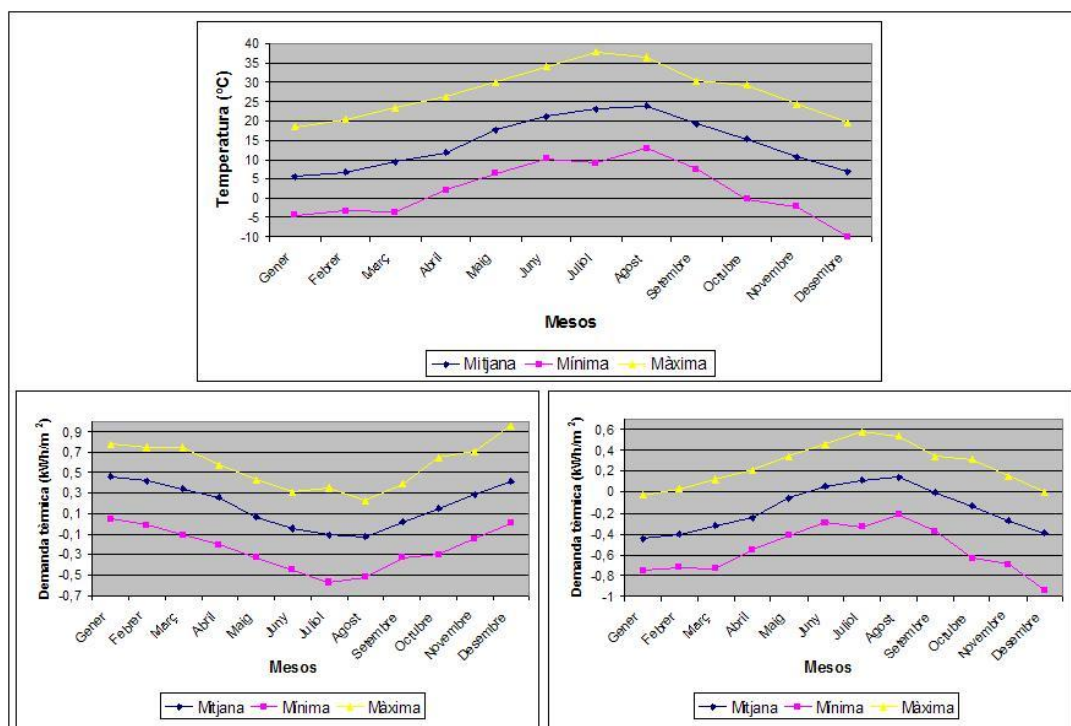


Figura 3.2: Evolució de la temperatura al llarg de l'any 2009 a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar (gràfic superior). Evolució mensual de la demanda tèrmica per calefacció i refrigeració calculada en base a les temperatures de l'any 2009 a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar (gràfic inferior esquerra i inferior dreta respectivament). Elaboració pròpia.

Així doncs la càrrega tèrmica, tant per calefacció com per refrigeració, avaluada per un habitatge que compleix les característiques de la figura 3.1 pren, respectivament, valors extrems compresos entre els 0,77 i 0,01 kWh/m² i entre els 0,03 i 0,58 kWh/m².

Com es pot observar a la figura 3.2, en ocasions la demanda tèrmica es manifesta en forma de valors negatius. Això indica que, en un moment determinat, l'habitatge no requereix calefacció i/o refrigeració.

És important matisar que aquests sistemes s'acostumen a dissenyar per suplir un determinat percentatge dels pics màxims de demanda tèrmica. Tenint present aquesta premissa, tots els càlculs d'aquest document es basen en la mitjana anual de la demanda tèrmica màxima mensual (annex B).

3.2.2. Zona de la riera de Santa coloma de Farners

La conca de la riera de Santa Coloma ocupa una superfície de 321 km² i se situa a la part Sud-Oest de la depressió de la Selva (Girona). Tota ella, es troba envoltada per massissos del Paleozoic de litologia granítica, que amb el pas del temps i gràcies als torrents i rius que connecten la geografia de la conca han anat formant els materials quaternaris que donen lloc al llit del riu (Figura 3.3). Entre aquests materials apareixen les arcoses i les argiles amb una distribució geogràficament heterogènia (ACA, 2004).

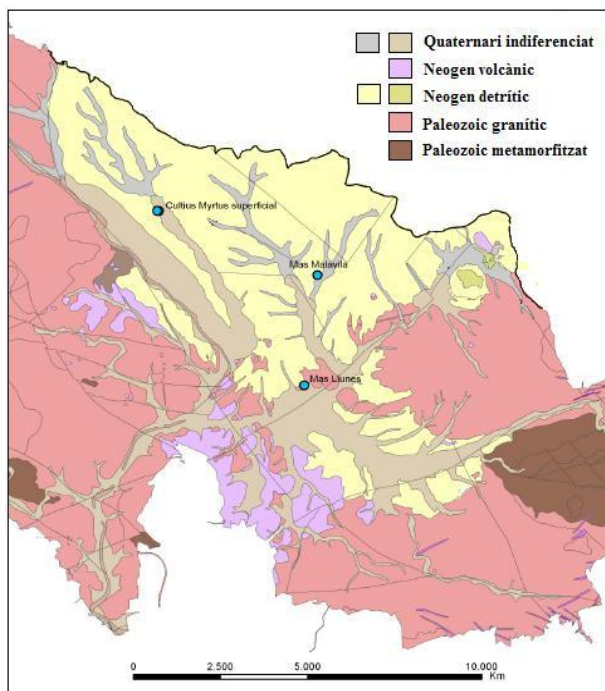


Figura 3.3: Mapa geològic de la zona de la riera de Santa Coloma de Farners amb la situació dels punts d'estudi. Adaptat d'ACA, 2009.

A nivell hidrogeològic es distingeixen quatre aqüífers diferents, l'al·luvial quaternari, el neogen detrític, el neogen volcànic i el paleozoic granític. Tot i que més endavant, en cada cas d'estudi, s'entra una mica més amb detall en cadascuna d'elles, és important tenir clar que totes les formacions hidrogeològiques esmentades es troben hidràulicament connectades en algunes zones. En aquest sentit, l'aqüífer granític, topogràficament situat als punts més alts de la conca, cedeix aigua cap al neogen i/o directament a l'al·luvial.

a) Cultius Myrtus superficial

A continuació es presenta el primer dels quatre casos d'estudi que es tractaran al llarg d'aquest capítol. En primer lloc es realitza una breu explicació del context geològic de l'emplaçament i acte seguit s'exposen els resultats obtinguts.

➤ Context geològic

El primer dels punts analitzats, es troba sobre els materials quaternaris que formen l'aqüífer al·luvial de la riera de Santa Coloma. En aquest punt, els materials acostumen a tenir una potència compresa entre els 15 i 20 metres. Donat que Cultius Myrtus es troba situat a una branca adjacent a la Riera de Santa Coloma, en el transcurs dels càlculs s'ha considerat una potència dels materials de 7 metres. En referència a la composició de la matriu hi predominen les graves, les sorres i els llims, que tot i tenir una litologia diversa, és protagonista el reblliment d'origen granític, procedent dels massissos més propers (ACA, 2004; GeoServei S.L., 2006).

A nivell hidrogeològic l'aqüífer al·luvial es caracteritza per ser una formació que rep aigua de la riera i de la resta d'aqüífers de la zona. En aquest sentit, la seva recàrrega té l'origen, principalment, en l'aflorament de la pròpia formació i, en menor mesura, en la resta d'aqüífers (granític, detrític neogen i neogen volcànic).

➤ Resultats en el DIVER

El DIVER instal·lat des del 30 de gener del 2009 fins al 22 de maig del mateix any mostra alteracions importants tant en la temperatura, com en el nivell hidràulic de l'aqüífer (Figura 3.4). En la seva justificació cal establir una certa relació amb els episodis de precipitació referits en aquest mateix període (Figura 3.5).

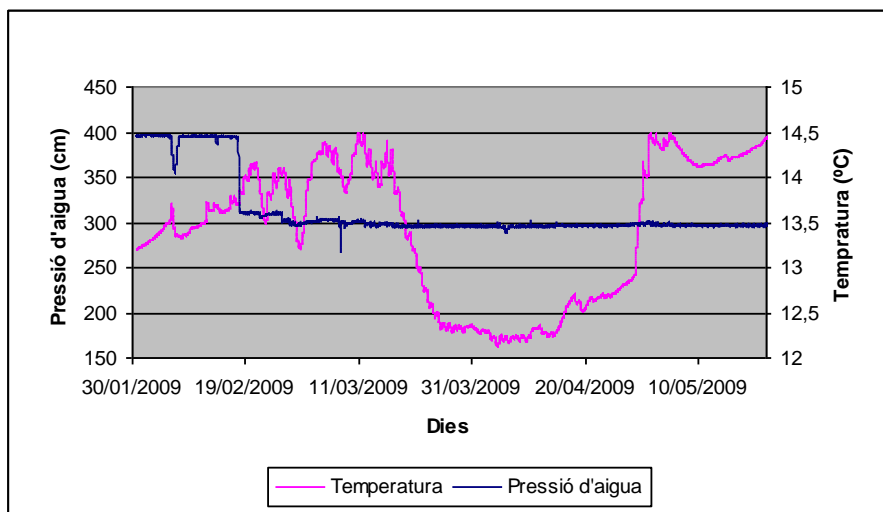


Figura 3.4: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER entre els mesos de gener i maig de l'any 2009, al pou Cultius Myrtus superficial. Adaptat de ACA, 2009

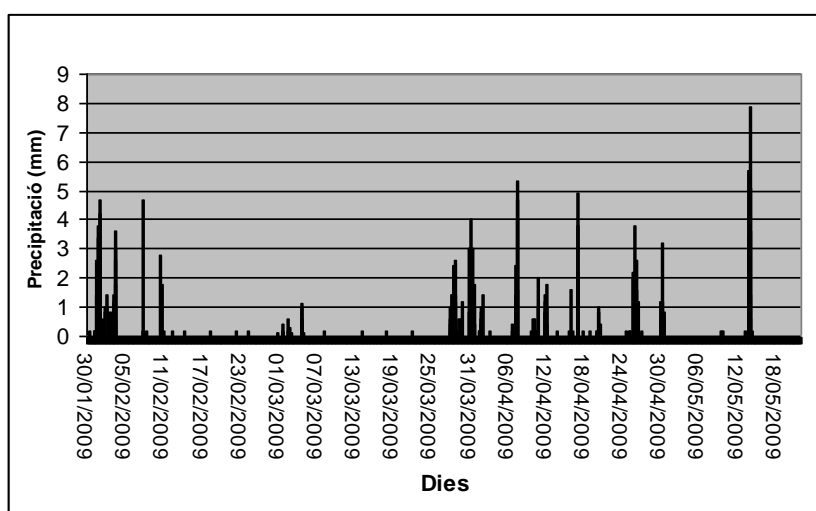


Figura 3.5: Evolució de les precipitacions a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar entre els mesos de gener i maig de l'any 2009. Elaboració pròpia.

En referència a les variacions del nivell hidràulic, es pot observar un descens molt marcat a mitjans del mes de febrer, i que posteriorment es manté constant al llarg de la resta de temps. Si es compara amb l'evolució de la precipitació (Figura 3.5), s'observa com resulta difícil establir una correlació clara entre els episodis de pluja i les variacions de nivell.

Si bé no es poden explicar les variacions de nivell amb les precipitacions, pel que fa a la temperatura sí que existeix una certa relació entre ambdues variables. De totes maneres resulta ser una relació atípica ja que la temperatura hauria de disminuir al cap d'un temps d'haver tingut lloc la precipitació.

Aquestes variacions tant marcades de les dues variables, són degudes, essencialment, a dos fenòmens. El primer d'ells és l'elevada permeabilitat de l'al·luvial, fet que comporta la "ràpida" infiltració de l'aigua a través del subsòl. En segon lloc, tenint en compte que es tracta d'un pou obert en un aqüífer lliure, el DIVER es va col·locar relativament a la vora de la superfície (4,274 metres de fondària), fet que facilita la seva interacció amb l'aigua que porta menys temps a l'aqüífer.

➤ **Resultats en sistema obert**

Com es pot observar a la figura 3.6, en el mode calefacció, increments relativament petits (6%) en la temperatura de l'aigua comporten disminucions molt significatives (23%) del cabal que cal extreure per cobrir una la demanda tèrmica requerida. Paral·lelament, per a increments del 15% en la temperatura de l'aigua, el cabal requerit disminueix prop d'un 50%, respecte la situació inicial (temperatura mensual mínima).

Aquesta davallada en el cabal requerit implica un augment de l'eficiència en l'intercanvi calorífic medi - col·lector. En altres paraules, és més fàcil mantenir un habitatge a 20°C si s'aprofita una aigua a 15°C, que una altra que es troba a 14°C. En efecte, per al mode calefactor, com més petit sigui el gradient tèrmic entre la font de calor (aigua subterrània) i el punt on s'allibera l'energia (habitatge), més fàcilment es duu a terme l'intercanvi calorífic entre ambdós punts (apartat 2.1.4). Per comprendre millor aquests resultats, més endavant, a l'apartat 3.2.4, es presenta la variació en el cabal requerit en funció de successives disminucions de la temperatura.

Val a dir que lògicament, en aquest cas, les diferències de temperatura més grans coincideixen, amb un cert retràs, amb els episodis de pluja dels mesos de març i abril.

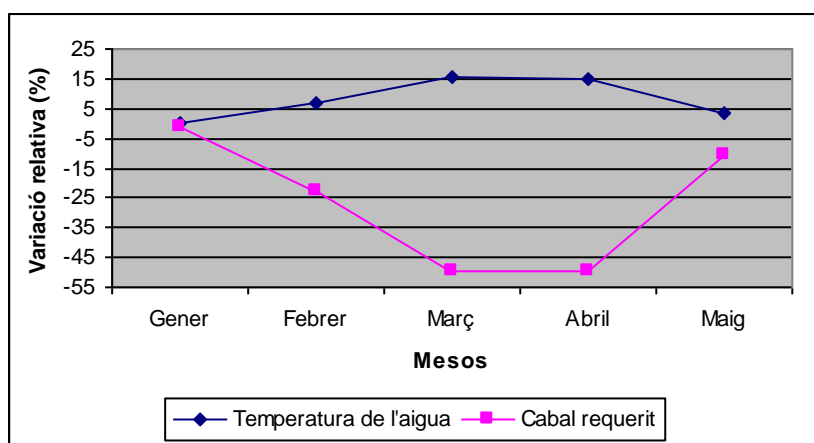


Figura 3.6: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial. Elaboració pròpia

Quant al descens ocasionat per la captació d'aigua cal tenir molt present que es treballa en un aquífer de tipus lliure. Això implica, tenint en compte que es suposa l'estat estacionari, que a l'hora de realitzar aquest càlcul s'ha d'aplicar l'equació de Dupuit (expressió 2.20). D'aquesta manera, s'observa com en aquesta expressió el terme del cabal es troba relativitzat per la permeabilitat i pel nombre pi. Per contra, el terme del gruix saturat inicial queda elevat al quadrat, fent que aquest prengui molta més importància en detriment del cabal requerit.

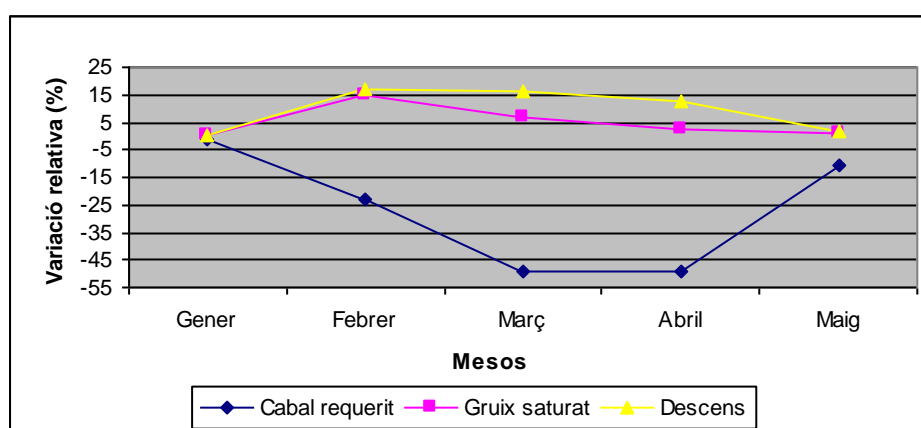


Figura 3.7: Evolució de les variacions del cabal requerit per calefacció, del gruix saturat i del descens entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial. Elaboració pròpia.

Tot plegat implica que les variacions en el descens es vegin fortament condicionades per les alteracions del gruix saturat inicial, fent així que diferències en el cabal sols puguin alterar molt lleugerament el descens ocasionat per la captació (Figura 3.7).

Així doncs, si existeix la possibilitat de crear descensos de nivell importants caldrà estudiar el fet de perforar més d'un pou. La conseqüència d'implementar múltiples captacions és la inducció d'un major nombre de descensos, tot i que menys importants en quant a fondària.

➤ Resultats en sistema tancat

Pel que fa als sistemes tancats, la temperatura de l'aigua influeix de la mateixa manera que en el cas dels sistemes oberts. Aquí però, degut al fet de no intercanviar matèria amb l'entorn, es parla de metres lineals (m.l.) de col·lector instal·lats en el subsòl i no de cabal requerit.

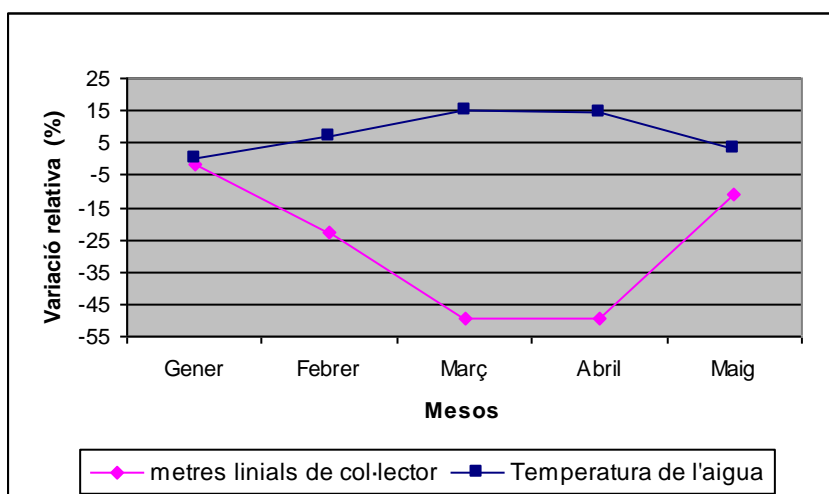


Figura 3.8: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció calculada entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a cultius Myrtus superficial. Elaboració pròpia.

Així mateix, un altre cop, tal i com s'aprecia a la figura 3.8, petites disminucions (6%) de la temperatura comporten increments substancials (23%) dels m.l. de col·lector necessaris. Més concretament, l'efecte de la temperatura en els sistemes tancats és exactament el mateix que en els sistemes oberts. Això s'explica, pel fet que en

ambdós casos, el flux de calor es calcula en base al gradient tèrmic de treball. Donat que la resta de paràmetres que intervenen en el càlcul es consideren constants, una determinada diferència tèrmica comporta, en termes d'eficiència, el mateix efecte en els dos tipus de col·lectors (oberts i tancats).

En termes d'eficiència, la disminució en els m.l. de col·lector induïda per l'augment de la temperatura, s'interpreta, en el mode calefactor, com un increment de l'eficiència en l'intercanvi calorífic medi – col·lector. De la mateixa manera que en els sistemes oberts, el fet de treballar amb un salt tèrmic menor, implica una menor quantitat de m.l. i per tant un increment en l'eficiència del mateix valor percentual (en valor absolut) que la davallada dels m.l.

En referència a l'efecte de les variacions del gruix saturat en els sistemes de GSHP tancats, s'observen grans diferències en funció de si es considera o no el flux d'aigua subterrània (Figura 3.9).

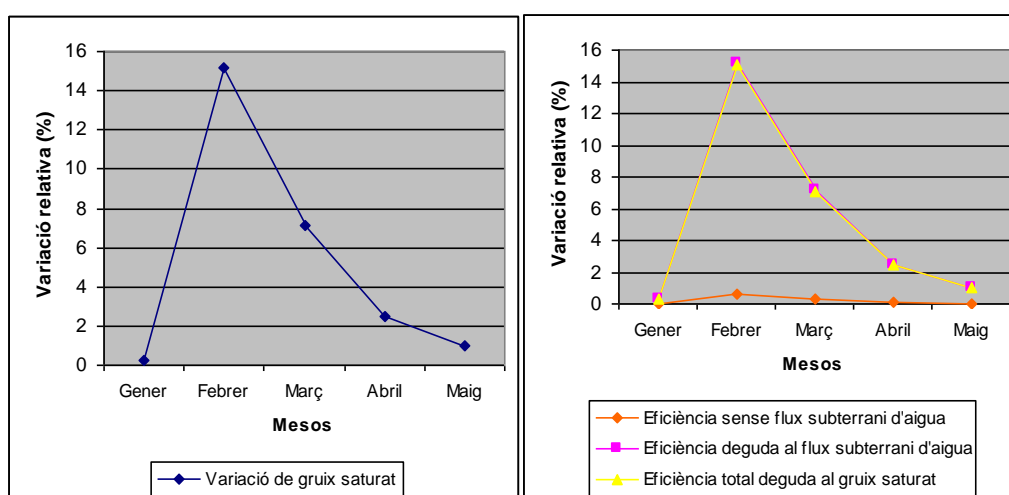


Figura 3.9: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial. Elaboració pròpia.

Nota: Les variacions del transport de calor per conducció (línia taronja de la figura 3.9) han estat calculades a partir de la llei de Fourier (expressió 2.10). Per contra, el transport de calor per advecció (línia porpra de la figura 3.9) s'ha combinat l'ús de la llei de Darcy (expressió 2.18) i l'expressió 2.12 per a quantificar, respectivament, el flux subterrani i la calor que se'n pot extreure. Per a més informació cal consultar els annexos del suport digital adjunt. Aquesta nota és vàlida per les figures 3.16 i 3.23.

En el cas de tenir en compte, únicament, el nivell de saturació del medi (línia taronja de la figura 3.9), es veu com en variar considerablement el nivell hidràulic l'eficiència amb prou feines es veu alterada. Aquest fet s'explica perquè en experimentar un descens de nivell, l'aigua que ocupa els porus és substituïda per aire, el qual compta amb una conductivitat tèrmica de $0,024 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ enfront dels $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ de l'aigua. Malgrat que la capacitat de l'aire per transmetre la calor és quatre cops més petita que la corresponent a l'aigua, cal tenir molt present que aquesta substitució tan sols afecta a un petit volum de l'aqüífer en comparació amb el volum total de la formació. D'altra banda, l'aigua i l'aire compten amb una conductivitat tèrmica molt més petita que la corresponent al material que forma la matriu de l'aqüífer. Com que en aquest cas es treballa amb materials d'origen granític, la capacitat de l'aigua per transmetre la calor és aproximadament 5,5 cops més petita que la corresponent al material de reblliment. Per tant, si no es considera el flux subterrani, la conductivitat tèrmica equivalent de la formació hidrogeològica es veu molt poc influenciada per el descens del nivell freàtic.

Així doncs, en una situació de flux subterrani nul o menyspreable, com menor sigui la porositat dels materials, menor serà la variació en l'intercanvi de calor subterrani.

Ara bé, en una situació com la que ocupa aquest cas d'estudi, considerar únicament la saturació (línia taronja de la figura 3.9) no resulta ser un plantejament vàlid. Per aquest motiu és imprescindible considerar el flux subterrani (línia porpra de la figura 3.9). Cal recordar, del segon capítol, que en presència de flux subterrani, l'advecció, com a fenomen de transport de calor, pren protagonisme en detriment de la conducció. En aquest sentit, s'estarà subestimant el transport de calor, de forma considerable, si no es considera el flux subterrani en un aqüífer.

La figura 3.9 mostra com la variació del nivell hidràulic coincideix amb la variació de l'eficiència del col·lector. En altres paraules, un increment del 15% del gruix saturat comporta un augment del 15% en l'eficiència. Si es pren la Llei de Darcy (expressió 2.18) com a base de la justificació, s'aprecia com davant d'una disminució del gruix saturat, l'únic terme que varia és la secció de pas, la resta, és a dir el gradient hidràulic i la permeabilitat resten constants. Aquest fet implica que si el gruix saturat disminueix en una unitat, el cabal també ha de minvar en la mateixa proporció. Conseqüentment, si el flux subterrani és menor, el transport de calor per advecció disminueix de la mateixa manera.

Finalment, per descriure la situació real de l'efecte del nivell hidràulic en l'eficiència del sistema, cal comptabilitzar juntament la calor transportada per conducció, i per advecció és a dir, la calor que es transporta pel sol fet de tractar-se d'una situació saturada, i la calor transportada pel flux subterrani (línia groga de la figura 3.9).

La figura 3.10 demostra que tant les variacions de temperatura com els canvis de nivell hidràulic afecten als sistemes de GSHP tancats. En aquest sentit, un creixement combinat del 15% en la temperatura de l'aigua i d'un 7% en el nivell hidràulic comporta una millora del 56% en l'eficiència del col·lector. Observant aquests resultats, cal remarcar que la participació de cada paràmetre en aquesta millora de l'intercanvi calorífic no és equitativa. Així, en aquest cas, l'efecte de la temperatura es comptabilitza en un 60-90% de la variació d'eficiència total. En canvi, les variacions de nivell hidràulic comporten entre un 10% i un 40% de les variacions en l'eficiència (veure annex B digital). Tot plegat demostra com l'eficiència del col·lector es veu fortament condicionada per la temperatura de treball, fent que la influència del nivell hidràulic quedi molt relativitzada. De totes maneres, en situacions on l'increment del nivell hidràulic és important, la influència de la temperatura disminueix a favor d'aquest segon paràmetre. En aquest cas es pot associar la dominància de la temperatura al fet que al llarg del període de mostreig, aquesta presenta una variabilitat notablement superior que el nivell hidràulic (figura 3.4).

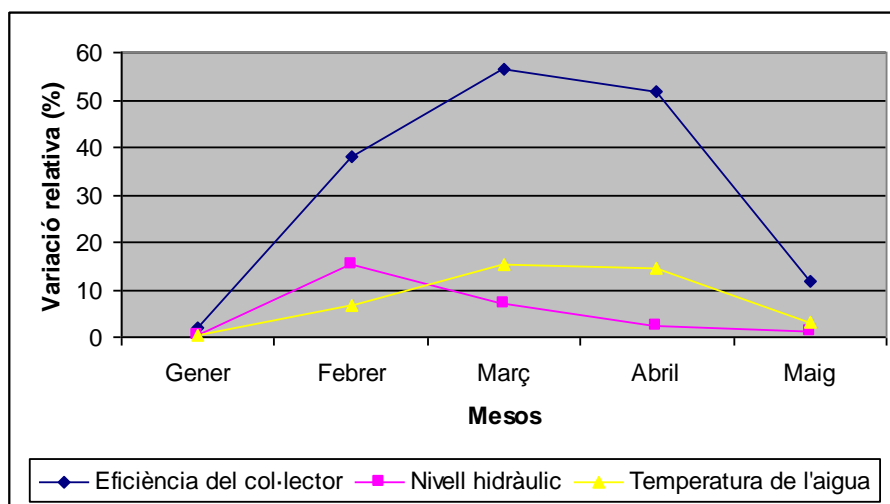


Figura 3.10: Evolució de la variació de l'eficiència com a conseqüència dels canvis de nivell hidràulic i de temperatura entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial. Elaboració pròpia.

b) Mas Llunes

Tot seguit s'exposa el segon cas d'estudi. De la mateixa manera que en la situació anterior, primer es repassa el context geològic de la zona i tot seguit es presenten els resultats obtinguts dels càlculs.

➤ Context geològic

L'aqüífer granític del paleozoic està format per granodiorites i leucogranits, afectats pel metamorfisme, fet que ha induït un important grau de fracturació i diaclast. Tot conjuntament, ha implicat que el sauló domini en el si de l'aqüífer, amb unes potències que, en ocasions, arriben als 50 metres. Aquest notable grau de porositat de tipus secundari (15%) comporta una permeabilitat dels materials que sol estar compresa entre els 5 i els 25 m/dia. La base de l'aqüífer, també d'origen granítica però molt menys alterada que el cos de la formació, generalment, es troba a partir dels 50 metres de fondària. Val a dir, que en alguns casos hi existeixen nombrosos punts de fracturació (ACA, 2009).

➤ Resultats en el DIVER

En aquest segon cas d'estudi, el DIVER instal·lat entre els mesos de febrer i abril, demostra alteracions puntuals del nivell hidràulic tant o més significatives en quant a amplitud que les referents al Cultius Myrtus superficial. Tot i que la temperatura de l'aigua també segueix una tendència similar en les seves variacions ho fa amb uns valors extrems més pròxims entre ells.

En el gràfic que recull la informació del sensor (Figura 3.11) es poden apreciar, a partir del mes de febrer, nombrosos descensos que segueixen el patró típic del comportament d'un pou durant una situació de bombeig, és a dir, un descens sobtat del nivell hidràulic i la posterior recuperació, més lenta, de l'aigua del pou. Cal puntualitzar que la recuperació del nivell hidràulic és relativament lenta, ja que es requereixen de l'ordre de 2 a 3 dies per assolir el nivell inicial.

En referència a les variacions de temperatura, s'aprecia com aquestes diferències són petites (0,7 °C). L'explicació d'aquest fet recau en que la recàrrega del present aquífer

es més lenta que en l'al·luvial del cas anterior, a causa de la modesta permeabilitat dels seus materials ($1,8 \text{ m}\cdot\text{dia}^{-1}$). En aquest cas, la velocitat de l'aigua en infiltrar-se a l'aquífer permet un lapse de temps més gran per tal que aquesta assoleixi la temperatura del seu entorn. Així doncs, quan l'aigua arriba a la zona saturada, ho fa amb un diferencial de temperatura petit en relació amb l'aigua que porta un cert temps a l'aquífer.

Finalment, cal tenir en compte que en relació a l'al·luvial on s'emplaça *Cultius Myrtus*, aquest aquífer granític no rep aigua de les formacions hidrogeològiques més properes sinó que cedeix aigua cap al neogen i l'al·luvial. En aquest sentit la seva recàrrega prové, únicament de la infiltració de les precipitacions en els punts on afloren els seus materials.

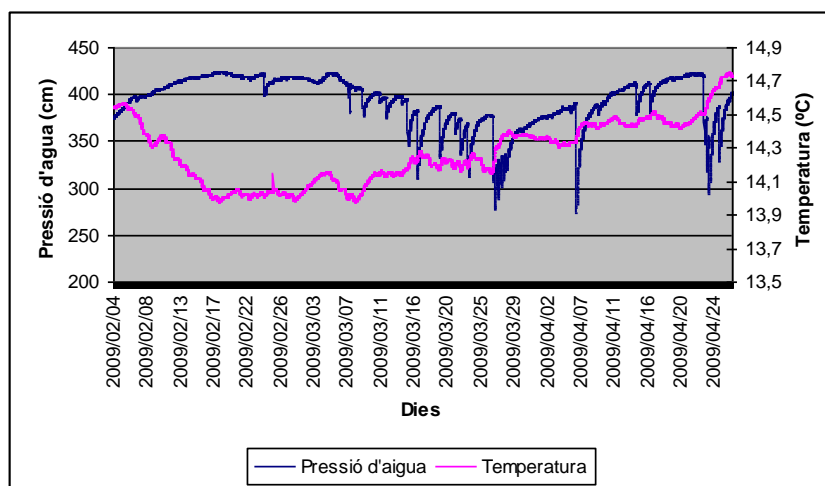


Figura 3.11: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 al pou Mas Llunes. Adaptat de ACA, 2009

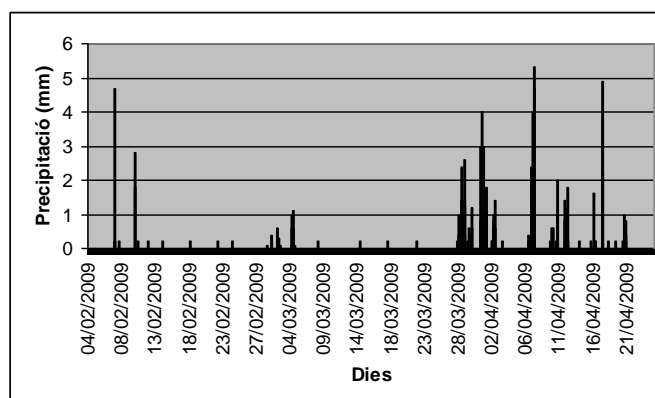


Figura 3.12: Evolució de les precipitacions a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009. Elaboració pròpia.

➤ Resultats en sistema obert

Pel que fa als resultats obtinguts per a un sistema obert, s'aprecia com per aquesta situació hidrogeològica existeixen unes variacions del cabal requerit, al voltant, de quatre cops més petites que en el cas de l'aqüífer al·luvial anterior (Figura 3.6). Un cop més, el fet de gaudir d'una major estabilitat de la temperatura de l'aigua subterrània implica, alhora, una alteració més suavitzada en el cabal que cal extreure. En aquest sentit, això dóna un major grau d'eficiència al sistema obert, ja que en el moment de calcular el rendiment de la totalitat del complex geotèrmic, és a dir el SSPF, existeixen menys alteracions en l'energia requerida per extreure l'aigua del pou.

Tot i així, es corrobora el fet que la temperatura influeix de forma important l'intercanvi de calor. En aquest sentit, davant d'un increment de la temperatura del 3% existeix una disminució del cabal del 10% (Figura 3.13). Això implica una millora energètica del mateix valor percentual (en valor absolut) que la davallada en el cabal requerit.

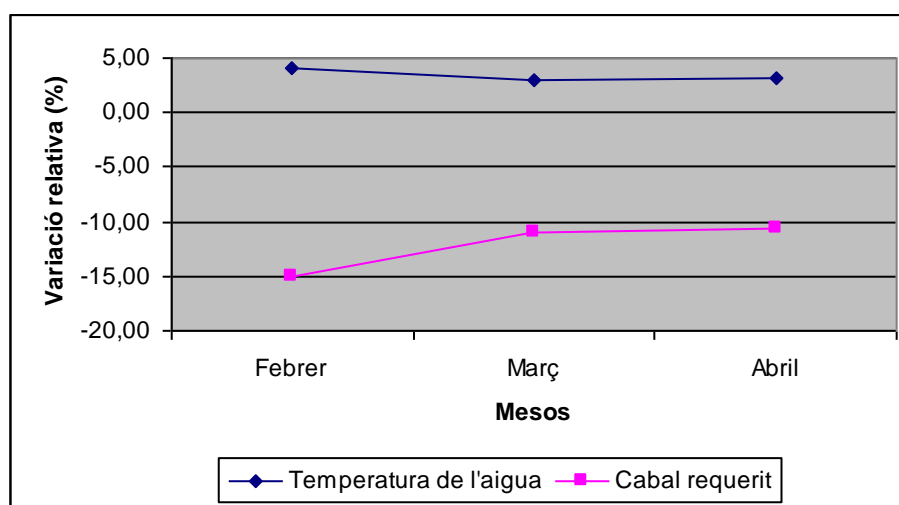


Figura 3.13: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes. Elaboració pròpia.

La figura 3.14 mostra com en un aqüífer lliure, altre cop, la variable que condiciona més fortament el descens induït per una captació és el nivell hidràulic. Al llarg de tot el període de mostreig, es constata que les variacions de gruix saturat i descens són molt similars. Tenint en compte que l'equació de Dupuit relativitza el terme del cabal

requerit, una disminució del 10% en aquest paràmetre, només comporta un efecte en el descens del 4%, respecte a la influència del nivell hidràulic.

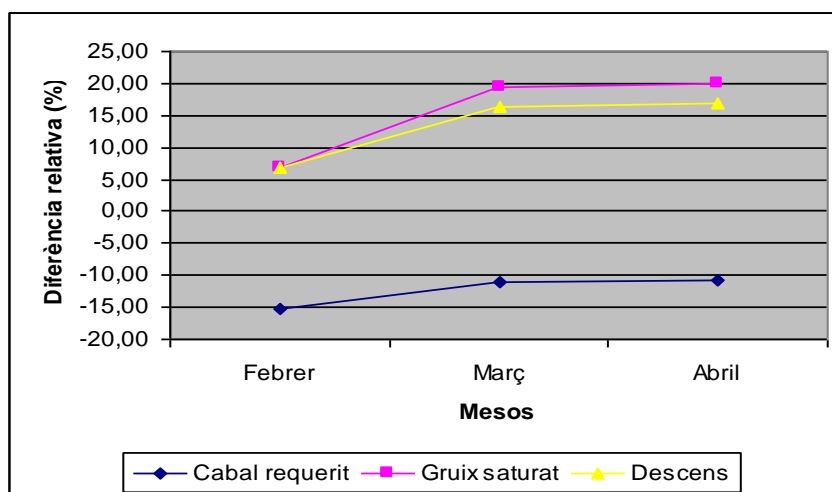


Figura 3.14: Evolució de les variacions del cabal requerit per calefacció, del gruix saturat i del descens entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes. Elaboració pròpia.

➤ Resultats en sistema tancat

De la mateixa manera que en el cas anterior (Figura 3.8), aquí es demostra com davant un increment de la temperatura de l'aigua subterrània, el sistema geotèrmic de GSHP requereix un menor cabal per cobrir la mateixa demanda tèrmica. D'aquesta manera, la figura 3.15 expressa que una pujada de la temperatura entre el 3% i el 5%, s'associa a una davallada del cabal requerit que s'acota entre el 10% i el 15%.

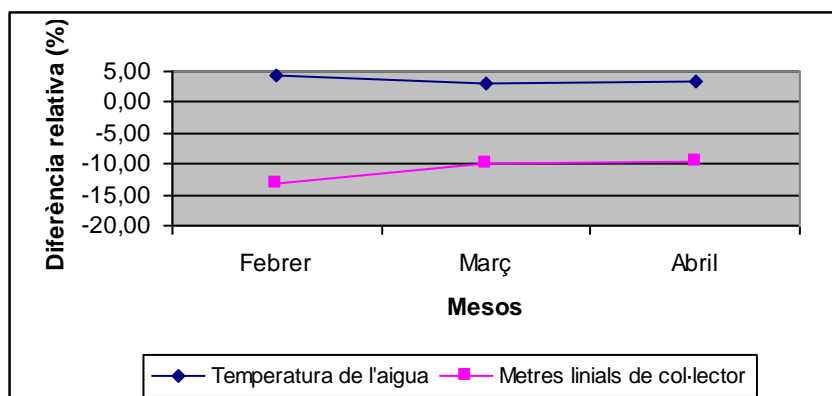


Figura 3.15: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció calculada entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes. Elaboració pròpia.

Per la seva banda, l'efecte del nivell hidràulic en els sistemes de GSHP tancats verticals s'explica de la mateixa manera que en el cas de Cultius Myrtus. Per tant, el transport de calor, generat pel flux d'aigua (línia porpra de la figura 3.16), és molt més important que el transport per conducció (línia taronja de la figura 3.16). Per a recordar la justificació d'aquest fenomen cal veure el cas de Cultius Myrtus, o bé l'apartat d. d'aquest mateix subcapítol.

De totes maneres, aquí, tot i que la relació entre el flux i el seu transport de calor és la mateixa que en la situació al·luvial, l'associació que s'estableix entre una situació saturada i l'intercanvi de calor amb el col·lector és diferent. Això és degut a que en aquest cas l'aquífer compta amb una menor porositat. Tenint en compte que aquí, el valor d'aquest paràmetre és un 5% més petit, un descens d'una unitat en el gruix saturat induïx un 5% més d'eficiència (sense considerar el flux d'aigua subterrània) en relació al mateix descens a Cultius Myrtus. De totes maneres aquest fet, minimitzat per la forta influència del transport de calor degut al flux subterrani.

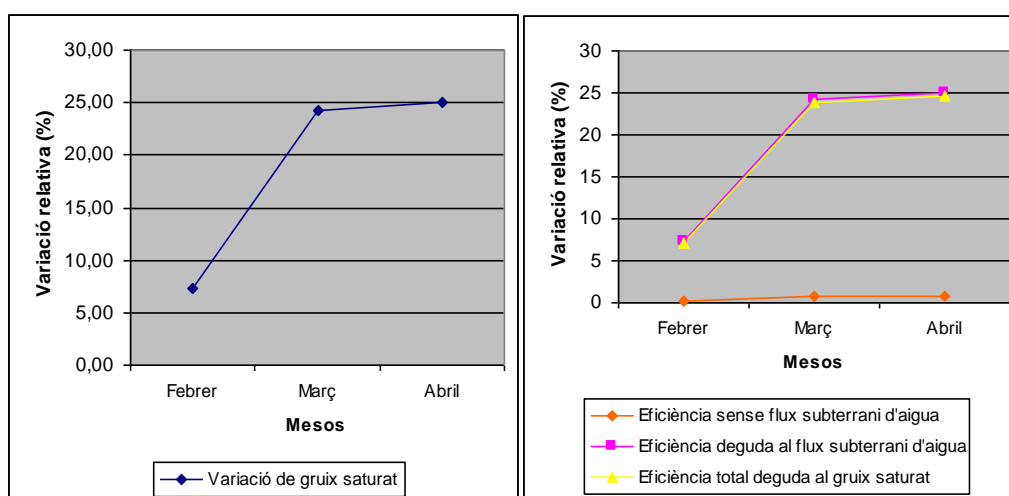


Figura 3.16: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes. Elaboració pròpia.

Finalment, la figura 3.17 mostra, a diferència de la figura 3.10 com les alteracions en l'eficiència de l'intercanvi de calor es veuen més condicionades per les alteracions del nivell hidràulic que no pas per la temperatura. El fet que en aquest cas, el paràmetre més determinant sigui el nivell hidràulic s'explica perquè aquí al llarg del període de mostreig, el DIVER registra una variabilitat més gran del nivell. En aquest sentit,

mentre la temperatura assoleix una variació màxima del 4%, el nivell hidràulic pateix una distància superior als 20 punts percentuals entre els seus valors extrems. Aquí la influència de cada variable es reparteix de manera que la temperatura condiciona entre un 30% i un 60% de les variacions de l'eficiència total, mentre que la resta recau en la influència del nivell hidràulic (veure annex B digital).

Tot i així, cal remarcar que a Mas Llunes davant d'un increment combinat del 3% en la temperatura de l'aigua i d'un 20% en el nivell hidràulic "només" s'aconsegueix augmentar l'eficiència del col·lector en un 34%. Per contra, en el cas anterior (Cultius Myrtus superficial) un acreixement combinat del 15% en la temperatura de l'aigua i d'un 7% en el nivell hidràulic comporta una millora del 56% en l'eficiència del col·lector.

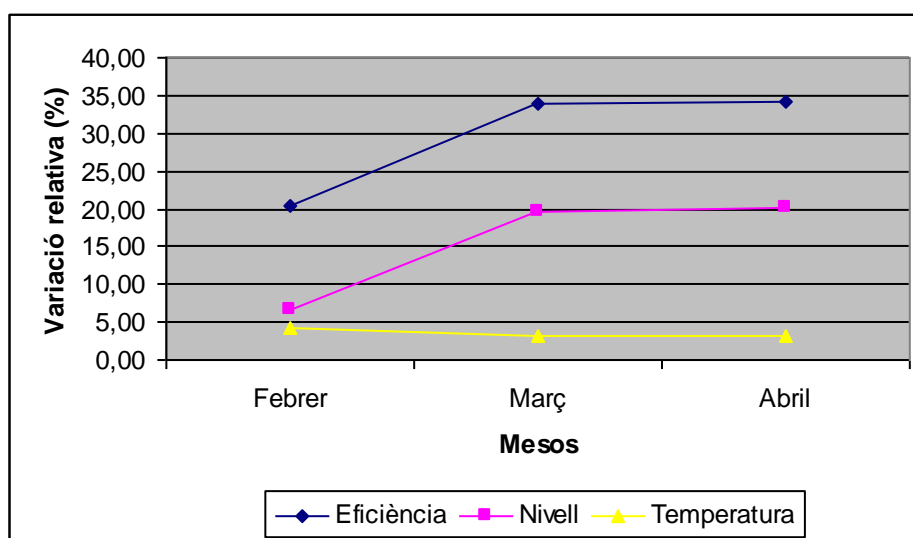


Figura 3.17: Evolució de la variació de l'eficiència com a conseqüència dels canvis de nivell hidràulic i de temperatura entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes. Elaboració pròpia.

c) Mas Malavila

Tot seguit es presenta el tercer cas d'estudi. L'estructura de l'exposició és la mateix que en els casos anteriors.

➤ Context geològic

L'aquífer detrític del neogen, és essencialment una matriu sedimentaria molt heterogènia des del punt de vista de la distribució regional dels materials que la formen. Normalment, els materials de la zona saturada són arenisques i graves. Degut a la presència d'aquestes roques sedimentaries, la permeabilitat i porositat efectiva de les graves es veu molt minvada, assolint així valors que ronden els 0,5-1 m/dia i el 3% respectivament. D'altra banda, aquests materials compten amb una potència que pren valors en el rang de 15m a 250m (ACA, 2009).

D'altra banda, les formacions d'aquest tipus compten amb una recàrrega amb diferents orígens. Encara que l'aflorament dels seus material és el punt on es dona la màxima recarrega, aquesta formació també pot rebre aigua dels granits i de l'al·luvial (ACA, 2004).

➤ Resultats en el DIVER

De les dues situacions hidrogeològiques que s'han analitzat fins ara, la següent és, probablement, el cas on s'estableix una relació més clara entre l'augment del nivell hidràulic i la disminució de la temperatura de l'aigua (Figures 3.18 i 3.19). Tal i com es pot observar a l'inici del període de mostreig, quan el nivell hidràulic es baixa, la temperatura es troba en el seu punt màxim. Tanmateix, en el moment que el nivell comença a augmentar apareix una resposta immediata i inversa de la temperatura.

Tenint en compte que, en gairebé tots els casos (tret del que se situa a Olot), la recàrrega es dona majoritàriament a les zones d'aflorament, això implica que una bona proporció de l'aigua que alimenta els aquífer sigui de la infiltració directa de les precipitacions. Així doncs, quan l'aigua de pluja, normalment més freda que l'aigua que es troba a la formació hidrogeològica, penetra a través dels materials, aquesta assoleix

gradualment la temperatura de l'aqüífer. Ara bé, els casos en que la infiltració és prou ràpida l'aigua acabada d'infiltrar no disposa del temps suficient per igualar la seva temperatura amb la del medi. D'aquí vénen les alteracions de temperatura que s'estudien aquest apartat.

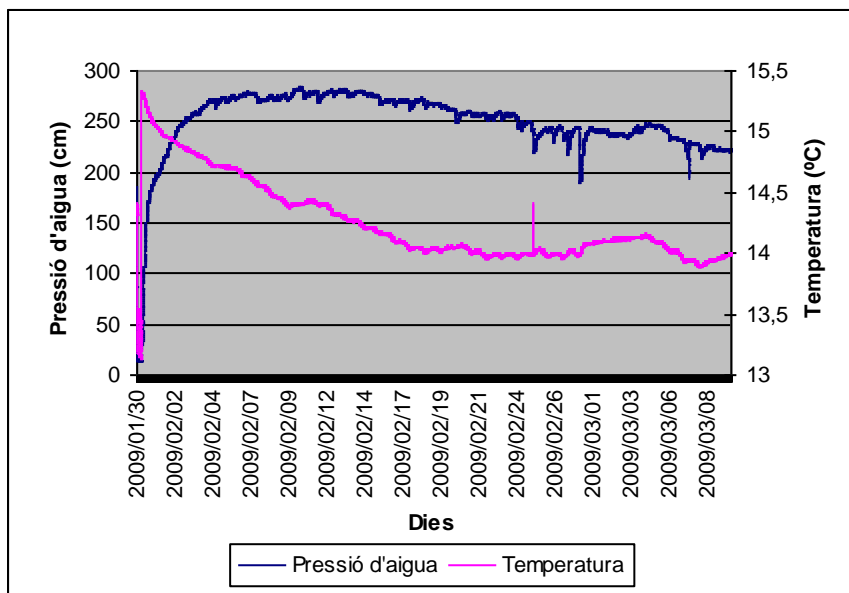


Figura 3.18: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER entre els mesos de gener i març de l'any 2009, al pou Mas Masmalavila. Adaptat de ACA, 2009.

Quant a l'anàlisi de la figura 3.18, s'observa que tot i amb un cert decalatge temporal, el nivell de l'aigua augmenta dràsticament en el moment que tenen lloc les precipitacions dels primers dies de febrer. De totes maneres, aquest augment tan marcat, no només és el resultat de les precipitacions d'inicis de febrer sinó que en part és el propi aqüífer que recarrega el pou després d'una extracció bastant intensa. Més tard, després del nivell màxim, a finals de la primera setmana de febrer, el nivell comença a disminuir arrel de cessament de les precipitacions, aquí tot i que el nivell disminueix, la temperatura segueix minvant com a conseqüència, en part, de les precipitacions que hi ha entre el dies 7 i 10 del mes de febrer. A partir d'aquí, la temperatura es manté més o menys constant, fins que a causa de les precipitacions de finals de febrer, torna a patir una davallada.

Aquesta bona correlació que s'estableix entre les dues variables és deguda a l'alta permeabilitat del medi ($K_{Malavila} = 6,9m/dia$) si es compara amb els casos anteriors ($K_{Myrtus} = 2,6m/dia$ i $K_{Llunes} = 1,8m/dia$).

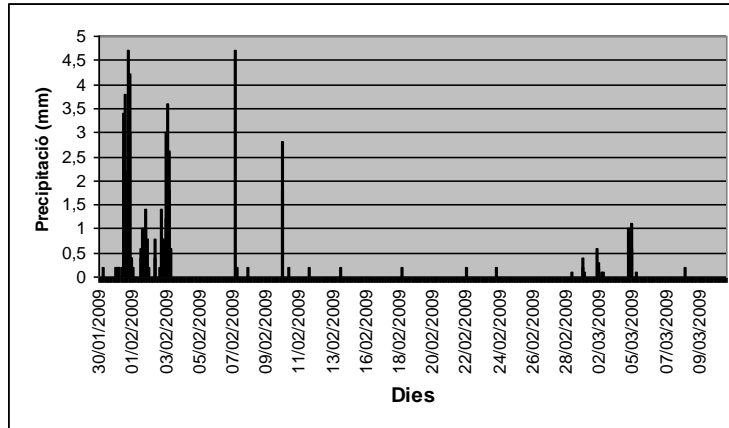


Figura 3.19: Evolució de les precipitacions a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar entre els mesos de gener i març de l'any 2009. Elaboració pròpia.

➤ Resultats en sistema obert

En aquest cas, pel que fa a l'efecte de la temperatura en l'eficiència en l'intercanvi de calor, les variacions que es mostren a la figura 3.20 reafirmen, un cop més, els resultats obtinguts en els casos d'estudi anteriors. En efecte, un increment de la temperatura de l'aigua es tradueix en una millora en l'eficiència del col·lector.

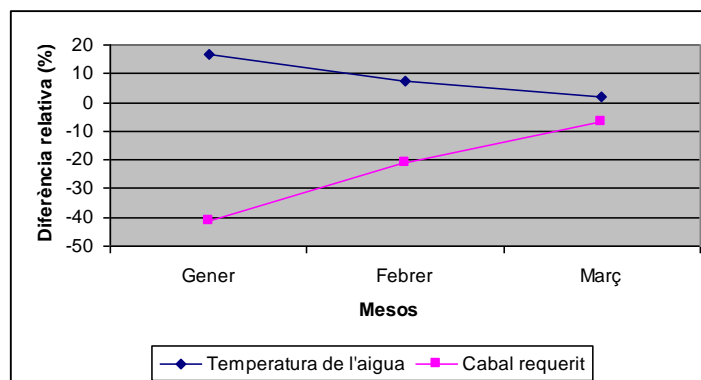


Figura 3.20: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila. Elaboració pròpia.

La figura 3.21, demostra altra vegada que el nivell hidràulic inicial domina per sobre el cabal extret a l'hora de determinar el descens produït per una determinada captació d'aigües subterrànies. En aquest sentit, el descens (línia groga de la Figura 3.21) se solapa amb la línia del gruix saturat, tret d'una petita desviació al mes de gener induïda per la forta disminució en el cabal que caracteritza aquest mes. Així, una davallada lleugerament superior al 40% en el cabal comporta un decrement inferior al 1% en el descens. En la justificació d'aquest fet cal recórrer altre cop a l'equació de Dupuit (expressió 2.20)

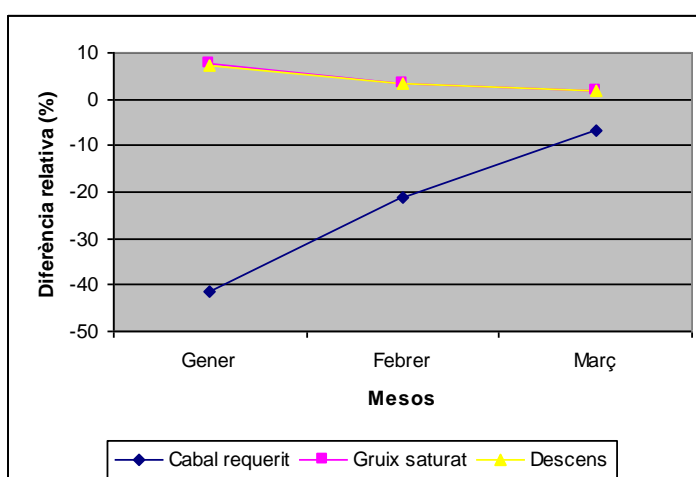


Figura 3.21: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila. Elaboració pròpia.

➤ Resultats en sistema Tancat

De la mateixa manera que en tots els casos anteriors, per a un sistema tancat, un increment de la temperatura comporta una disminució dels m.l. de col·lector necessaris per suplir una demanda tèrmica determinada (Figura 3.22). Paral·lelament, apareix un increment de l'eficiència en l'intercanvi de calor medi-col·lector. La raó d'aquest fet és, de la mateixa manera que en tots els casos precedents, la major facilitat en mantenir la temperatura d'un habitacle a 20°C si s'extreu la calor d'un medi que es troba a 15°C que no pas d'una font de calor que es troba a una temperatura menor. En altres paraules, tenint en compte que, en aquest últims casos d'estudi es treballa, únicament en mode calefactor, com menor sigui el gradient tèrmic entre la font de calor i el punt a escalfar, més assequible resulta la transferència de calor entre ambdós punts.

D'altra banda, corroborant els resultats anteriors dels casos precedents, aquí l'efecte de la temperatura en el sistema tancat (Figura 3.22) i en el sistema obert (Figura 3.20) és el mateix en termes relatius. La raó d'aquest fet, com bé s'ha explicat en el cas de *Cultius Myrtus*, recau en que, tan en els sistemes tancats com en els oberts, l'únic paràmetre que no roman constant és el gradient tèrmic. Per tant, qualsevol canvi en aquesta variable es manifesta, en termes d'eficiència de l'intercanvi calorífic, de la mateixa manera en ambdós tipus de complexos geotèrmics.

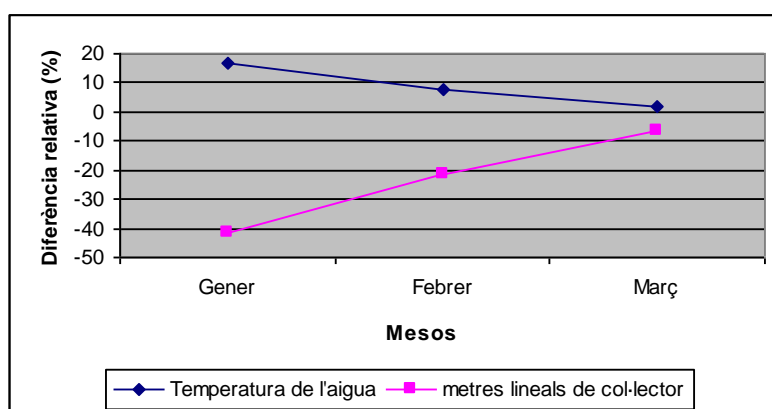


Figura 3.22: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció calculada entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila. Elaboració pròpia.

Pel que fa a l'efecte del gruix saturat, aquest, s'explica de la mateixa manera que en els casos d'estudi anteriors, però aquí cal fer un petit matís. En aquest context geològic la combinació de gresos i graves, dona com a resultat una porositat de només el 3%, fet que implica que les diferències de conductivitat tèrmica derivades d'un augment o disminució del nivell hidràulic siguin molt poc sensibles. D'aquesta manera, les alteracions del nivell hidràulic tenen unes repercussions en el transport de calor per conducció, gairebé negligibles (Figura 3.23).

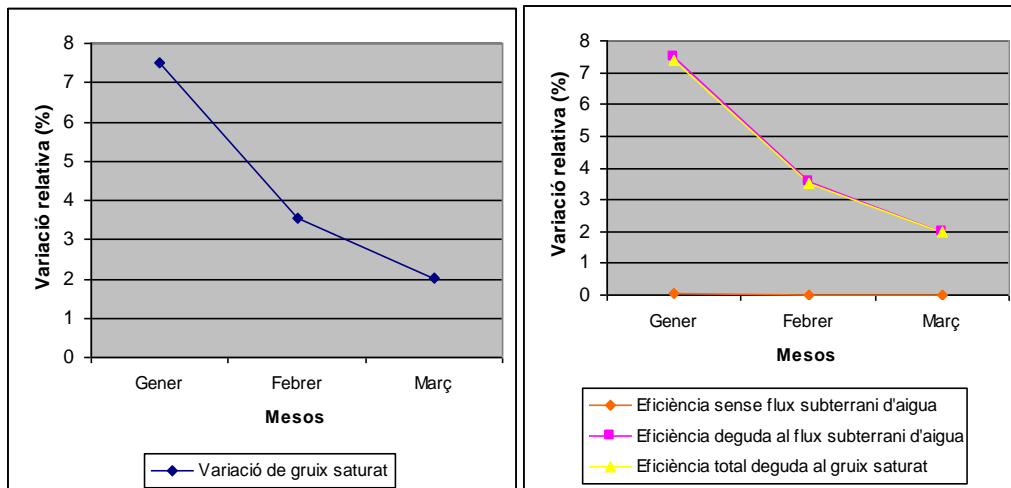


Figura 3.23: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes. Elaboració pròpia.

Finalment, la figura 3.24 mostra com, en aquest cas, la temperatura de l'aigua representa el factor més condicionant de l'eficiència global del col·lector de calor tancat. Els mateixos resultats que s'observen aquí, apareixen a *Cultius Myrtus* superficial (Figura 3.10), on també hi existeix una gran variabilitat de la temperatura de l'aigua. Per contra, a Mas Llunes (Figura 3.17), on apareix una major variabilitat del nivell hidràulic, cal recordar que l'efecte d'aquest paràmetre pren protagonisme en detriment de la temperatura. Pel que fa a la influència de cada variable a Mas Malavila, s'observa com la temperatura participa en l'eficiència global amb un 75-85%, mentre que la resta recau en la contribució del nivell hidràulic, tenint en compte els fenòmens de conducció i advecció (veure annex B digital)

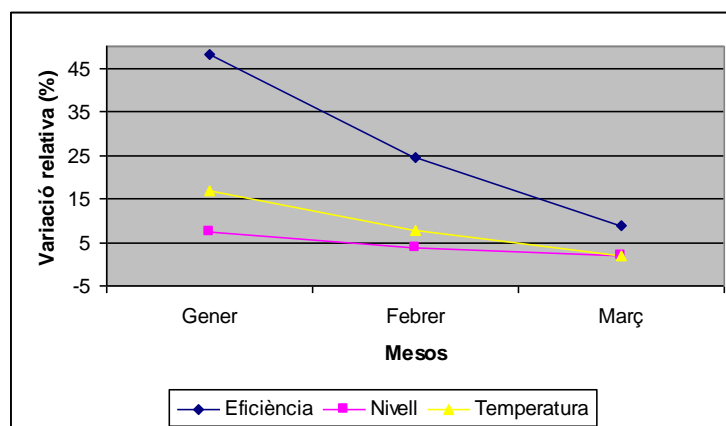


Figura 3.25: Evolució de la variació de l'eficiència com a conseqüència dels canvis de nivell hidràulic i de temperatura entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila. Elaboració pròpia.

3.2.3. Zona d'Olot

A continuació es presenta un altre cas d'estudi emplaçat a la plana d'Olot. Com a tret distintiu respecte els casos anteriors, aquí es podrà avaluar l'eficiència dels sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia durant un lapse temporal de variacions de nivell piezomètric i de temperatura que engloben tot l'any 2008. Per contra, en referència als col·lectors verticals tancats, degut a la manca de valors fiables dels paràmetres hidrogeològics, així com a causa de l'absència de la piezometria regional, no és possible obtenir resultats en l'efecte de les variacions de nivell.

Finalment, un altre punt que difereix dels casos de Santa Coloma de Farners és el fet que aquí es treballa en una situació confinant.

➤ Context geològic

En aquest cas, la zona d'estudi se situa a la plana d'Olot, a la comarca de La Garrotxa (Girona). El substrat dominant són les formacions sedimentàries eocenes (figura 3.X). Quant als materials que formen aquest substrat apareixen els conglomerats, les margues i els gresos. A continuació, a sobre de la base de l'Eocè, apareix un estrat al·luvial del quaternari, amb diferents nivells de graves, llims i sorres. Finalment, les successives colades volcàniques, que han tingut lloc al llarg de la història geològica més recent, han cobert els nivells al·luvials.

Aquest fet, ha donat lloc a múltiples capes de basalts i escòries volcàniques, que compreses en conjunt assoleixen unes potències de que ronden els 75 m

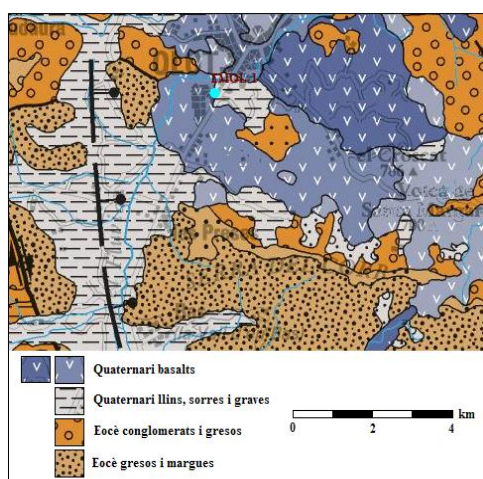


Figura 3.26: Mapa geològic de la zona d'Olot amb la situació dels punts d'estudi. Adaptat d'ICC, 2010.

A nivell hidrogeològic, els aqüífers de la zona d'Olot estan formats pels dipòsits volcànics del quaternari. Concretament, els nivells de basalts són els que acostumen a formar els aqüífers. En aquest sentit, aquests estrats volcànics, presenten una porositat secundària important derivada de l'elevat grau de fracturació que

presenten. D'altra banda, en la majoria dels casos, els aqüífers de la zona solen trobar-se confinats pels nivells de llims i escòries volcàniques que els cobreixen. Tenint en compte la presència d'aquests nivells tan poc permeables, existeix una baixa connectivitat dels diferents nivells d'aqüífer. Finalment, degut un altre cop a les capes de llims i escòries, la recàrrega dels aqüífers per infiltració directa de l'aigua de pluja és poc important (Martínez, M. & Murillo, J.M., 1998).

➤ **Resultats en el DIVER**

Observant la figura 3.27, s'aprecia una variació de la temperatura de 0,6°C al llarg de l'any 2008. Si això es compara amb les variacions d'aquest paràmetre en els altres casos d'estudi, s'obté que la present variació és la que té una amplitud més petita.

D'altra banda, pel que fa al nivell hidràulic es pot apreciar una tendència anual a la baixa, patint una disminució de quatre metres entre els mesos maig i juliol, i més tard estabilitzant-se durant la resta de l'any.

Si es comparen aquestes variacions amb els episodis de pluja d'Olot (figura 3.28), s'observa com resulta difícil establir-hi una relació clara. Tot i així, l'augment de temperatura que es dona a finals de la primers meitat de l'any si que mostra una certa correlació.

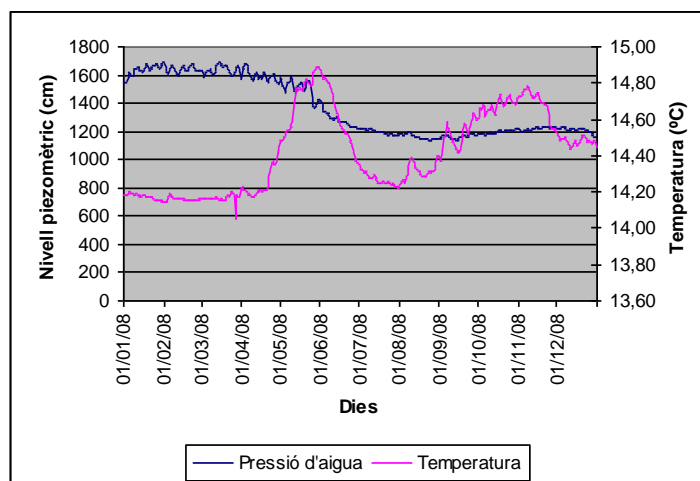


Figura 3.27: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER durant l'any 2008 al pou EMOL-1. Elaboració pròpia.

Aquestes diferències de temperatura tan petites poden ser degudes al fet que, en aquest cas, la recàrrega no es dona en l'aflorament dels materials volcànics, sinó més aviat a nivell dels materials al·luvials. D'aquesta manera, l'aigua que s'infiltra cap al subsòl disposa d'un període de temps més llarg per assolir la temperatura de l'aquífer abans no arriba al punt de mostreig (EMOL-1).

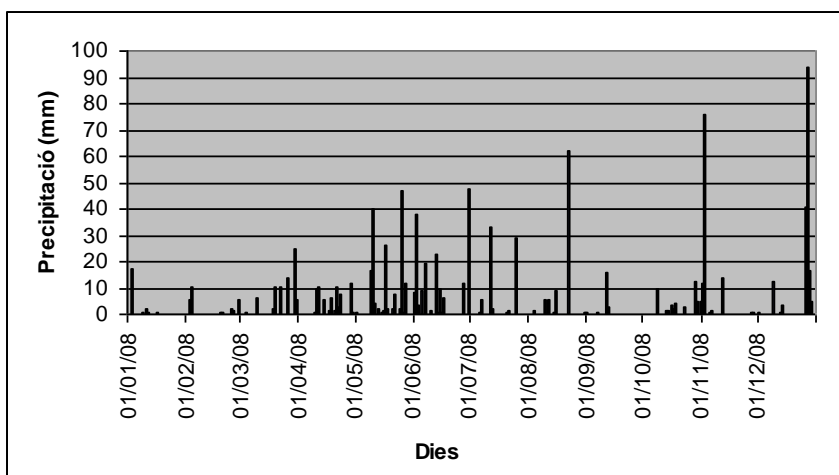


Figura 3.28: Evolució de la precipitació a l'estació meteorològica d'Olot durant l'any 2008. Elaboració pròpia.

➤ Resultats en sistema obert

Tenint en compte que en aquest cas es disposa de dades hidrogeològiques referides a tot un any, la figura 3.29 incorpora una nova variable que pren protagonisme durant els mesos d'estiu, és a dir la demanda tèrmica per refrigeració. Lògicament, donat que en els mesos d'estiu la demanda tèrmica per calefacció és gairebé nul·la, la variable del cabal requerit per calefacció durant els mesos d'estiu pren valors insignificants.

La raó per la qual es justifica l'acreixement de cabal requerit per refrigeració, davant d'un augment de la temperatura de l'aigua subterrània recau en que, com més elevada és la temperatura del fluid (aigua), menor és la seva capacitat per acceptar la calor procedent de l'interior de l'edifici i per tant més lentament es du a terme l'intercanvi calorífic. Així doncs tal i com s'avança a l'apartat 2.1.4, el funcionament del mode refrigerador i del calefactor és totalment el contrari. En aquest sentit, per tal d'extreure una determinada càrrega tèrmica de l'habitable (mode refrigerador), és necessari un

major cabal d'aigua si treballa amb un gradient tèrmic petit entre l'habitacle i el medi geològic.

Per contra, les variacions de cabal requerit per calefacció segueixen la mateixa tendència que en tots als casos anteriors, és a dir, com més petit sigui el gradient tèrmic de treball més eficient es torna el sistema.

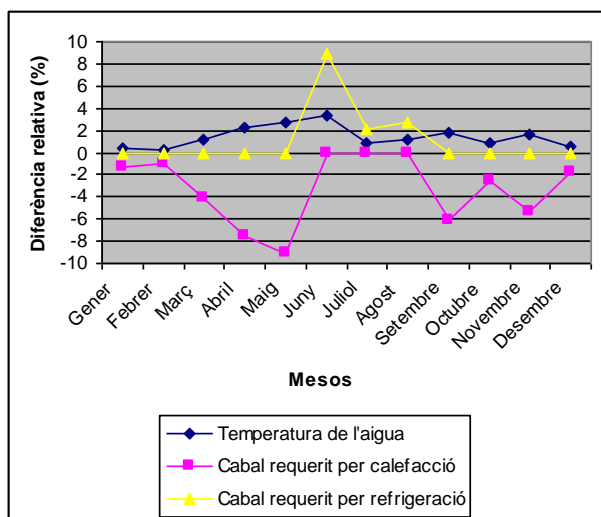


Figura 3.29: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció i de refrigeració de l'any 2008 a EMOL-1. Elaboració pròpia.

Probablement, la diferència més aparent entre un sistema de GSHP obert instal·lat en un aqüífer lliure, i un altre que treballa en una situació confinada és l'efecte en les variacions de cabal i de nivell piezomètric. Així doncs, la figura 3.30 mostra com el descens ocasionat per una captació en un aqüífer confinat es veu totalment condicionat pel cabal extret. En aquest sentit, tenint en compte l'equació de Thiem (expressió 2.21) i les variacions de cabal requerit i donat que aquesta variable és l'únic paràmetre que no es manté constant, una alteració d'una unitat en el cabal implica la mateixa alteració en el descens.

D'altra banda, mentre el nivell piezomètric en mantingui per sobre del sostre dels materials de l'aqüífer, el gruix saturat esdevindrà variable en el càlcul del descens. En aquest moment es perd la situació confinant i conseqüentment l'expressió de Thiem resulta invàlida per avaluar el descens ocasionat per la captació.

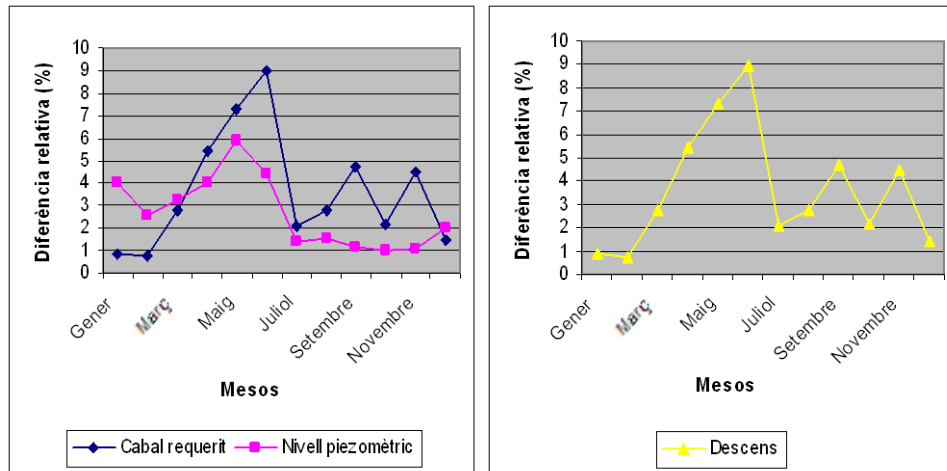


Figura 3.30: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila. Elaboració pròpia.

➤ Resultats en sistema tancat

Pel que fa als col·lectors verticals tancats, s'aprecia la mateixa tendència que s'ha observat al llarg de tots els casos d'estudi anteriors. En altres paraules, com més important és l'increment de la temperatura de l'aigua, major és el nombre de metres lineals necessaris per suplir la demanda tèrmica per calefacció. Per contra, com més petit sigui l'augment de temperatura, menor serà el nombre de metres lineals necessaris per a refrigeració, així ho demostra la figura 3.31 durant el mesos de juny juliol i agost.

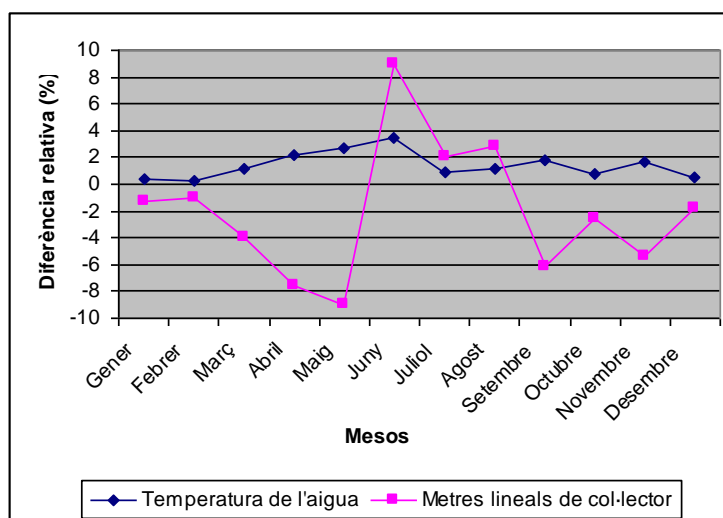


Figura 3.31: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció i refrigeració calculada per l'any 2008 a EMOL-1. Elaboració pròpia.

Finalment, a causa de la manca de dades que s'esmenta a l'inici d'aquest punt, no és possible realitzar els càlculs pertinents per estudiar l'efecte del nivell piezomètric en l'intercanvi calorífic medi - col·lector. De totes maneres, si que es pot realitzar una aproximació qualitativa d'aquesta relació.

En aquest sentit, en l'efecte del nivell piezomètric existeix una gran diferència en funció del tipus de formació hidrogeològica considerada. En un aquífer confinat l'efecte de les alteracions d'aquest paràmetre és mínim sempre i quan es mantingui confinat. El fet de tenir sempre el mateix gruix saturat comporta un valor constant de la conductivitat tèrmica equivalent. Així doncs en presència d'un gradient tèrmic invariant el transport de calor per conducció es manté inalterable amb el temps. Tot i així, potencials diferències en el nivell hidràulic poden, també en aquest tipus d'aquífer, donar lloc a canvis importants degut al transport de calor per advecció. Per al present cas d'estudi, aquests canvis potencials no han estat considerats degut a la manca de dades.

Ara bé en el moment que s'elimina l'excés de pressió, és a dir, es passa a una situació d'aquífer lliure, les variacions de nivell hidràulic afecten, tal i com han mostrat els casos precedents, de manera considerable a l'intercanvi calorífic medi – col·lector. Per aquest motiu resulta més interessant estudiar l'efecte del gruix saturat en aquífers lliures.

3.2.4. Estudi de l'efecte de la temperatura i el nivell hidràulic en l'eficiència dels col·lectors de calor

Després de presentar els resultats dels quatre casos d'estudi que integra aquest document s'ha pogut constatar l'efecte de la temperatura i del nivell hidràulic en els col·lectors de calor dels sistemes de GSHP. Tot i així, a fi de caracteritzar bé aquest efecte, és apropiat avaluar les variacions en l'eficiència dels col·lectors de calor davant de successives disminucions de les variables d'estudi. Així doncs, en aquest exercici es pretén obtenir els patrons de comportament de l'eficiència en relació a les alteracions de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic.

a) Eficiència de l'intercanvi de calor en funció de la temperatura de l'aigua i del context geològic

Tot seguit s'exposa un breu anàlisi de les variacions de l'eficiència associada als col·lectors de calor dels sistemes de GSHP, en funció de progressives alteracions de la temperatura de l'aigua subterrània.

Tenint en compte que els resultats dels casos d'estudi anteriors han demostrat sempre que les variacions de la temperatura afecten, en termes relatius, de la mateixa manera als sistemes oberts i tancats, aquí només es realitzen els càlculs per a un sistema obert. D'aquesta manera, es poden extrapolar els resultats per a un sistema tancat. Cal remarcar que, degut al fet que l'eficiència en el mode refrigerador només s'ha tractat en un dels casos, els càlculs de l'apartat només es realitzen en mode calefactor.

La informació de partida per als càlculs ha estat, de la mateixa manera que en els casos anteriors, una demanda tèrmica per a calefacció de 40,67 kWh (veure annex B) i una temperatura de confort a l'habitatge de 20 °C. La metodologia de càlcul es basa en l'avaluació del cabal requerit per a un sistema obert en descensos successius de 1°C en la temperatura de l'aigua. S'inicien les iteracions amb una aigua subterrània a 19°C i es finalitzen a 11°C. En valors percentuals, aquestes disminucions representen, cada cop, davallades en la temperatura d'aproximadament el 5%, fins a arribar a una temperatura un 40% inferior al valor inicial. Els càlculs es mostren de forma detallada a l'annex B digital que es troba en el suport digital adjunt.

La figura 3.32 corrobora els resultats obtinguts en els casos d'estudi precedents en referència a l'efecte de la temperatura quan el sistema treballa en mode calefactor. A primera vista, s'observa un augment del cabal requerit quan la temperatura pateix una davallada. Si bé aquest fenomen s'ha pogut observar anteriorment, la figura 3.32 expressa una relació de tipus exponencial entre el cabal i la disminució de la temperatura. Així doncs en referència a la temperatura, una disminució de poc menys del 25% comporta duplicar el cabal extret per mantenir la mateixa demanda tèrmica. Ara bé aquest augment del cabal es torna a duplicar si la disminució de la temperatura és del 31%.

Coneixent la linealitat (relació 1 a 1) que existeix entre el nivell hidràulic i l'eficiència del col·lector (punt b de l'apartat 3.24), la relació exponencial que mostra la figura 3.32 explica les diferències de la influència de la temperatura respecte l'eficiència global dels col·lectors que s'ha observat a les figures 3.10, 3.17 i 3.25. Així doncs, cal recordar que les figures 3.10 i 3.25 expressen una major importància de la temperatura, mentre que a la figura 3.17, en general, pren un major protagonisme el nivell hidràulic.

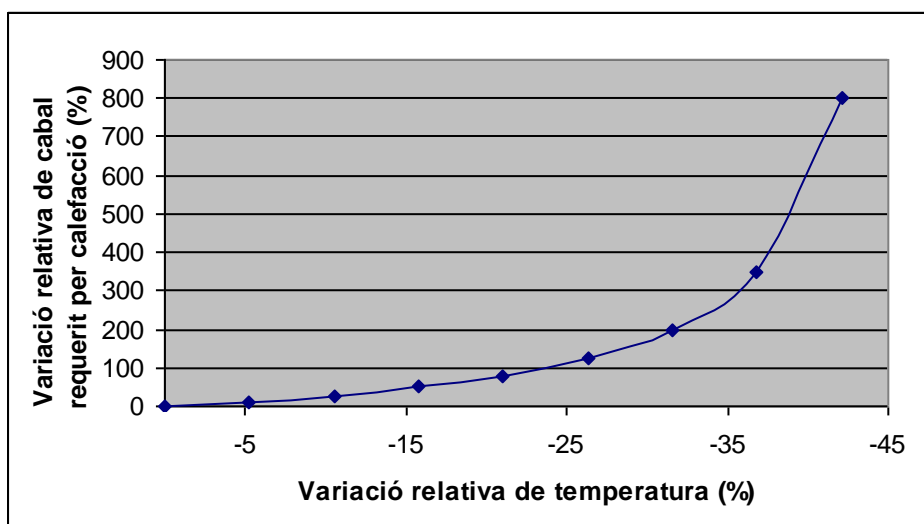


Figura 3.32: Variació relativa del cabal requerit en mode calefactor en funció de successives disminucions de la temperatura de l'aigua. Elaboració pròpia.

El punt on la influència de la temperatura esdevé superior a la referent al nivell hidràulic, és aquell on el creixement exponencial de la temperatura supera el creixement lineal del nivell hidràulic (Figura 3.33).

Quant a l'efecte del context geològic en la temperatura de treball, aquest es limita en que els materials permetin una infiltració més o menys ràpida de l'aigua a través del subsòl. Així, els sistemes de GSHP instal·lats en materials de baixa permeabilitat, a igualtat de condicions pel que fa a la fondària de la instal·lació, percebran una menor variabilitat de la temperatura de l'aigua, deguda a les precipitacions, que si el mateix complex geotèrmic es troba emmarcat amb materials d'alta permeabilitat.

b) Eficiència de l'intercanvi de calor en funció del nivell hidràulic i del context geològic.

Tot i que aquest punt s'ha anat tractant al llarg dels casos d'estudi anteriors, a continuació es proposa un breu anàlisi una mica més detallat de l'efecte del nivell hidràulic en els tres contextos hidrogeològics anteriors.

Per tal de centrar l'atenció, únicament, en els factors geològics i hidrogeològics, es desenvolupen tres cops els mateixos càlculs, cadascun, en un dels tres tipus de reblliments que s'han analitzat en les situacions precedents (al·luvial granític, sauló i arenisca). Val a dir que aquest apartat no es repetirà pel cas d'Olot, ja que en aquest últim context no es disposa de la piezometria regional ni de valors fiables referits als paràmetres fiables de l'aqüífer.

Així doncs, tot seguit es valora la disminució de l'eficiència d'un col·lector vertical tancat en relació a davallades successives d'un metre en el nivell hidràulic, en un aqüífer amb un gruix saturat inicial de 10 metres. El punt final dels càlculs es troba en el moment en que el nivell hidràulic, respecte la base de l'aqüífer és nul. Tots els valors que es deriven del desenvolupament d'aquest punt es troben referits a un sol col·lector cilíndric d'una llargada de 10 metres i diàmetre 0,2 metres.

Per a poder analitzar els càlculs s'ha de comparar els resultats obtinguts amb les dades de la taula 3.2. Pel que fa als resultats obtinguts, aquests es presenten a les taules 3.3, 3.4 i 3.5 que apareixen tot seguit.

En primer lloc, el punt més significatiu, i que ja s'ha avançat al llarg dels casos d'estudi anteriors, és la gran diferència que existeix, en presència de flux subterrani, entre el transport de calor per advecció (considerant el flux subterrani) i per conducció (només considerant una situació saturada). En efecte, en el millor dels casos la relació de transport calorífic advecció/conducció és igual a 100. De totes maneres, aquesta diferència tant gran només és vàlida en presència de flux subterrani i en situacions d'un gruix saturat pròxim al 100% (es considera el 100% quan es dona el pic màxim de gruix saturat en un període determinat). Aquesta diferència tan abismal es redueix fins a un valor comprès entre 7 i 15, quan existeix un flux subterrani en un nivell hidràulic del 10% en relació al gruix inicial. Per tant en un aqüífer, com més propera sigui la

seva situació al gruix saturat màxim, més protagonisme prendrà el transport de calor per advecció.

Tenint en compte que anteriorment (veure *Cultius Myrtus*) ja s'ha explicat el perquè de la diferència entre ambdós tipus de transport, aquí no s'hi entrarà amb més detall. Només cal recordar que, sense deixar de banda el paper que pren la conductivitat tèrmica dels materials, aquesta diferència es veu molt relacionada amb la porositat i la permeabilitat dels materials que formen l'aqüífer.

En segon lloc, en relació a la pèrdua d'eficiència en l'intercanvi calorífic medi - col·lector induïda per una davallada concreta del gruix saturat, es defineix com la disminució de la potència total (conducció i advecció) extreta del subsòl, en relació a la potència total captada a nivell hidràulic màxim. Per tant, en el moment que s'assoleix el gruix saturat nul, i conseqüentment la desaparició del flux subterrani, la capacitat de transferència calorífica del medi és el resultat de la mitjana ponderada entre la conductivitat tèrmica del medi geològic i la conductivitat de l'aire. Per aquest motiu, en absència d'aigua i de flux, no s'arriba mai a una eficiència del 0% en relació a l'estat inicial (considerant el flux en una situació de gruix saturat màxim).

Així doncs, tenint en compte les dades de la taula 3.2 i els resultats que es presenten a les taules 3.3, 3.4 i 3.5, és coherent el fet que les eficiències més elevades en situacions de gruix saturat pròxim a 0 siguin aquelles que compten amb uns valors porositat i conductivitat menors i majors respectivament. En altres paraules, en ordre decreixent, l'aqüífer format per sauló ($n = 15\%$ i $\lambda_{granit} = 3,4 W/m \cdot K$) i l'aqüífer detrític ($n = 3\%$ i $\lambda_{arcosa} = 2,9 W/m \cdot K$) són els que gaudeixen d'una eficiència major, en detriment de l'aqüífer al·luvial d'origen granític ($n = 20\%$ i $\lambda_{granit} = 3,4 W/m \cdot K$).

RESULTATS EN AQUÍFER AL-LUVIAL D'ORIGEN GRANÍTIC					
TEMPS	GRUIX SATURAT (%)	POTÈNCIA SENSE FLUX (kWh)	POTÈNCIA DEL FLUX (kWh)	POTÈNCIA TOTAL (kWh)	EFICIÈNCIA TOTAL (%)
0	100	0,001271	0,193365	0,194636	100,00
1	90	0,001266	0,174028	0,175294	90,06
2	80	0,001261	0,154692	0,155953	80,13
3	70	0,001256	0,135355	0,136611	70,19
4	60	0,001250	0,116019	0,117269	60,25
5	50	0,001245	0,096682	0,097928	50,31
6	40	0,001240	0,077346	0,078586	40,38
7	30	0,001235	0,058009	0,059244	30,44
8	20	0,001230	0,038673	0,039903	20,50
9	10	0,001225	0,019336	0,020561	10,56
10	0	0,001219	0,000000	0,001219	0,63

Taula 3.3: Taula resum dels resultats obtinguts en valorar la disminució de l'eficiència total d'un col·lector vertical tancat en descensos successius d'una metre del nivell freàtic en un medi al-luvial granític. Elaboració pròpia.

RESULTATS EN AQUÍFER DETRÍTIC FORMAT PER ARCOSES					
TEMPS	GRUIX SATURAT (%)	POTÈNCIA SENSE FLUX (kWh)	POTÈNCIA DEL FLUX (kWh)	POTÈNCIA TOTAL (kWh)	EFICIÈNCIA TOTAL (%)
0	100	0,001267	0,102580	0,103847	100,00
1	90	0,001266	0,092322	0,093589	90,12
2	80	0,001265	0,082064	0,083330	80,24
3	70	0,001265	0,071806	0,073071	70,36
4	60	0,001264	0,061548	0,062812	60,49
5	50	0,001263	0,051290	0,052553	50,61
6	40	0,001262	0,041032	0,042295	40,73
7	30	0,001262	0,030774	0,032036	30,85
8	20	0,001261	0,020516	0,021777	20,97
9	10	0,001260	0,010258	0,011518	11,09
10	0	0,001259	0,000000	0,001259	1,21

Taula 3.4: Taula resum dels resultats obtinguts en valorar la disminució de l'eficiència total d'un col·lector vertical tancat en descensos successius d'una metre del nivell freàtic en un medi neogen detrític. Elaboració pròpia.

RESULTATS EN AQUÍFER GRANÍTIC FORMAT PER SAULO					
TEMPS	GRUIX SATURAT (%)	POTÈNCIA SENSE FLUX (kWh)	POTÈNCIA DEL FLUX (kWh)	POTÈNCIA TOTAL (kWh)	EFICIÈNCIA TOTAL (%)
0	100	0,001334	0,093684	0,095018	100,00
1	90	0,001330	0,084316	0,085645	90,14
2	80	0,001326	0,074947	0,076273	80,27
3	70	0,001322	0,065579	0,066901	70,41
4	60	0,001318	0,056210	0,057529	60,55
5	50	0,001314	0,046842	0,048156	50,68
6	40	0,001310	0,037474	0,038784	40,82
7	30	0,001307	0,028105	0,029412	30,95
8	20	0,001303	0,018737	0,020040	21,09
9	10	0,001299	0,009368	0,010667	11,23
10	0	0,001295	0,000000	0,001295	1,36

Taula 3.5: Taula resum dels resultats obtinguts en valorar la disminució de l'eficiència total d'un col·lector vertical tancat en descensos successius d'una metre del nivell freàtic en un medi paleozic granític. Elaboració pròpia.

Finalment, la figura 3.33 mostra de forma gràfica els resultats anteriors. Val a dir que la línia de la potència proporcionada sense flux no pern valors nuls, sinó que com es pot observar a les taules anteriors, té uns valors tant petits que pot donar a lloc a tal confusió. Per tal d'evitar consumir un excés d'espai, aquí només s'exposen els resultats gràfics del cas de l'al·luvial granític. Com que no existeixen grans diferències gràfiques entre els tres casos, la resta es poden consultar a l'annex B digital.

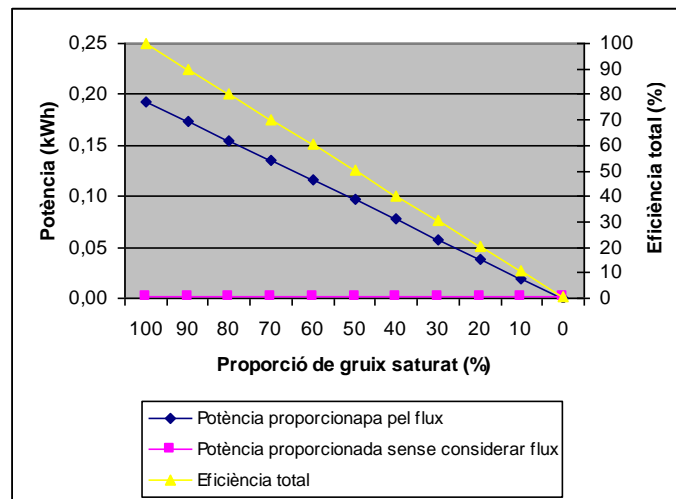


Figura 3.33: Evolució de l'eficiència i potència proporcionada en relació a successives disminucions del nivell freàtic en l'aqüífer al·luvial granític. Elaboració pròpia.

3.3. Conclusions

Els sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia són, energèticament, molt eficients, tot i que alhora, es veuen altament condicionats pel context geològic i hidrogeològic del seu emplaçament.

Gràcies a l'energia extreta del subsòl, la bomba de calor, l'element més característic de la instal·lació geotèrmica, permet generar una càrrega tèrmica superior a la consumida pel propi dispositiu. Ara bé, si des d'aquest punt de vista l'eficiència del complex és irrevocable, les alteracions en el context geològic i hidrogeològic limiten aquest rendiment tan privilegiat.

Per tant, deixant de banda el factor econòmic, a l'hora de dissenyar una instal·lació de GSHP, la quantitat i qualitat de la informació geològica i hidrogeològica es manifesta com el punt més crític. En aquest sentit, l'augment de l'eficiència, referent a l'intercanvi calorífic medi – col·lector en un sistema tancat i en mode calefactor, pot assolir valors del 55% davant d'un increment combinat del 16% en la temperatura de l'aigua i del 8% en el gruix saturat de l'aquífer.

Per contra, si ambdós paràmetres es consideren per separat es constata, en els sistemes tancats, que l'increment del nivell freàtic implica, una millora de l'intercanvi calorífic entre el medi i el circuit primari. Tanmateix, aquest augment de l'eficiència pren valors molt diferents en funció de si es considera o no el flux d'aigua subterrània.

En el cas de considerar únicament una situació saturada, negligint així el flux subterrani, s'observa com el transport de calor per conducció pren tot el protagonisme en detriment de l'advecció (ja que no es considera el flux subterrani). En aquesta situació una disminució del 100% en el gruix saturat, implica una davallada d'un 4-6% respecte l'estat inicial (gruix saturat màxim). Tanmateix la millora de la conductivitat tèrmica equivalent, derivada d'un increment del nivell hidràulic, sempre afavoreix als entorns geològics que compten amb uns valors de conductivitat tèrmica i de porositat més alts i més baixos respectivament.

D'altra banda, en una situació de flux subterrani significatiu, una disminució del 10% en el gruix saturat comporta una davallada d'igual valor, però de signe contrari, en

l'eficiència del col·lector. Això implica, aproximadament, una relació 1 a 1 entre ambdues variables. Així, els aqüífers que compten amb valors de permeabilitat i de gradient hidràulic més elevats, són els que permeten obtenir rendiments més notables. En les situacions de flux d'aigua subterrània i de gruix saturat màxim, el transport de calor per advecció sol ser de l'ordre de 100 cops més important que el transport per conducció. Per contra, quan el nivell hidràulic és el 10% del nivell inicial, la relació advecció/conducció assoleix valors compresos en el rang 7-15 .

En els sistemes oberts, l'efecte del nivell difereix en funció del tipus d'aqüífer considerat. En una situació de preexplotació i en aqüífers lliures el nivell hidràulic, condiona gairebé per complet el descens induït per la captació. Per tant, en el moment d'implementar un sistema de GSHP obert és imprescindible considerar les variacions de nivell a fi d'avaluar correctament el nombre de pous a perforar. En els aqüífers confinats, en canvi, la disminució del nivell piezomètric no té cap tipus d'efecte en l'eficiència dels col·lectors, sempre que la formació hidrogeològica es mantingui confinada.

Pel que fa a l'efecte de la temperatura en l'eficiència dels col·lectors de calor, no existeixen diferències entre els sistemes oberts i tancats. Per contra, si que apareixen variacions en funció del mode de funcionament. Si bé en mode refrigerador una disminució del gradient tèrmic (increment de temperatura de l'aigua) es tradueix en una pèrdua d'eficiència, la mateixa davallada del salt tèrmic es manifesta com un augment de l'eficiència. En aquest sentit, s'ha constatat que, en mode calefactor, increments del 16% en la temperatura de l'aigua signifiquen un creixement del 40% en el cabal extret i/o en els metres lineals de col·lector necessaris (en funció del tipus de configuració considerada).

En relació a les variacions de nivell hidràulic i de temperatura de l'aigua subterrània, s'observa una bona relació amb el règim de precipitacions de la zona d'estudi. Tot i que en alguns casos aquesta interdependència és difosa, en la majoria de situacions s'aprecia el fet que un episodi de pluja comporta, amb el temps, un augment del nivell hidràulic i una disminució de la temperatura de l'aigua subterrània. L'amplitud d'aquestes variacions depèn de la intensitat i la durada de la precipitació, així com de les característiques geològiques i hidrogeològiques del subsòl. En aquest sentit, valors alts de permeabilitat afavoreixen una ràpida infiltració de l'aigua i conseqüentment una alteració ràpida i important de la temperatura de l'aigua. S'ha constatat que aquest fet

afecta més significativament a aquest tipus de sistemes en comparació amb zones de baixa permeabilitat.

A banda de la informació hidrogeològica i tenint en compte la forta pressió que ocasionen les activitats humanes en els aqüífers, és fonamental una bona caracterització del context antròpic que emmarca el radi d'influència de la instal·lació. En la majoria dels casos, els éssers humans magnifiquen les alteracions naturals de la temperatura i del nivell hidràulic de l'aqüífer, i consegüentment les pèrdues d'eficiència que se'n deriven.

Tant els col·lectors oberts com el tancats, han estat concebuts per treballar, en cada cas, en unes condicions geològiques i hidrogeològiques determinades i "constants". Així doncs, els sistemes oberts depenen de l'existència d'un flux subterrani suficient a fi de cobrir la demanda tèrmica requerida per l'habitatge. En canvi, els sistemes tancats ofereixen una polivalència major. En qualsevol cas, l'estabilitat en les variables hidrogeològiques estudiades és cabdal per a l'optimització del rendiment energètic de la instal·lació geotèrmica. Això significa que les variacions que es produeixen al llarg de l'any en els diferents sistemes hidrogeològics s'han de considerar per al disseny i instal·lació d'aquest tipus de tecnologies.

L'actual disseny dels complexos de GSHP no es pot qualificar de sostenible, sinó que simplement assoleix la qualificació d'altament eficient des del punt de vista energètic. Si bé és cert que l'energia geotèrmica es considera un recurs renovable, en aquest cas, la seva extracció requereix una petita proporció d'energia d'alta qualitat, sovint de caràcter no renovable. Per aquest motiu, en el futur, caldrà fer un esforç per substituir el consum de combustibles fòssils, en favor de l'electricitat generada a partir de recursos naturals renovables, com per exemple l'energia solar.

Finalment, per tal d'assolir un bon grau d'implantació territorial de les energies renovables, així com, en aquest cas dels dispositius d'optimització energètica, és imprescindible coordinar els avenços en l'àmbit de l'enginyeria amb la conscienciació i informació social. A més a més, donat que aquest tipus de sistemes geotèrmics desenvolupen tot el seu potencial en el sector terciari i residencial, han d'esdevenir un recurs econòmicament assequible i amortitzable.

4. Propostes de millora

En aquest treball s'ha pogut constatar el fet que el context geològic i hidrogeològic afecten, molt notablement, als sistemes geotèrmics de molt baixa entalpia. Ara bé, aquí només s'ha pogut observar, a grans trets, els efectes de les variacions de temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic. En aquest sentit, seria necessari ampliar aquest estudi a altres contextos geològics.

D'altra banda, en el cas que es tractessin els resultats en termes absoluts i no, tal i com s'ha fet aquí, en termes relatius, s'hauria de calcular, de forma acurada, la demanda tèrmica per un edifici en concret. El fet de treballar amb paràmetres tan genèrics implica l'obtenció d'uns resultats poc fiables a nivell absolut. En altres paraules, cada habitatge compta amb unes variables tèrmiques molt concretes, que poden diferir de forma considerable d'un cas a un altre.

Paral·lelament, s'haurien d'incloure més variables en el càlcul. D'aquesta manera, pel cas concret de Catalunya, donat que, en general, les aigües del territori català compten amb un important grau de duresa, seria interessant avaluar, també en termes de disminució de l'eficiència, l'efecte de la calç en l'intercanvi de calor medi - col·lector, sempre tenint en compte les diferències entre ambdues configuracions.

Finalment, tenint en compte que els sistemes de GSHP tenen unes perspectives molt encoratjadores en referència a l'evolució de les instal·lacions geotèrmiques, s'hauria d'avaluar l'efecte que podrien tenir, sobretot els complexos oberts, a nivell dels efectes en els aqüífers. Cal recordar, que moltes d'aquestes formacions hidrogeològiques pateixen, avui, una considerable pressió humana, fet que limita els nous tipus d'aprofitaments. Tot i que en els sistemes oberts es torna a injectar l'aigua a la formació hidrogeològica, aquesta ho fa amb unes condicions, sobretot de temperatura, diferents que les referents al moment de la seva extracció. En aquest sentit caldria un control estricte de la qualitat de l'aigua retornada a l'aqüífer.

5. Bibliografia

Agència Catalana de l'Aigua, (2004). "Informe dels Treballs de Base per desenvolupar el programa de Gestió de l'aquífer de la riera de Santa Coloma".

Agència Catalana de l'Aigua (ACA), (2010). *Guia CLIMACA Climatització d'edificis a partir de l'energia del subsòl; Document de síntesi*. Barcelona, Espanya. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya.

Air-conditioning, Heating and Refrigeration Institute (AHRI), (2009). *Standard 870-2005 for Performance Rating of Direct GeoExchange Heat Pumps*.

ARANZAZU, M. & MAYORAL, G.R., (2009), "Climatización Geotérmica: Nuevo hospital de Mollet del Vallès, centro pionero en geotermia hospitalaria". *Obras Urbanas*. nº 18. p. 20-24.

BANKS, D., (2008). *An Introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*, Oxford. Ed. Blackwell.

^a CANADA. Natural Resources Canada, (2002). *Commercial Earth Energy Systems: A buyer's Guide*. Office of Energy Efficiency. ISBN 0-662-32808-6. (disponible a <http://dsp.pwgsc.gc.ca/Collection/M92-251-2002E.pdf>).

^b CANADA. Natural Resources Canada, (2002). *Residential Earth Energy Systems: A buyer's guide*. ISBN 0662-30980-4. (Disponible a <http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/ISBN0662-30980-4/EARTH-BuyersGuide-ResidentialEarthEnergySystems.pdf>).

CANADA. Natural Resources Canada. (2004). *Heating and cooling with a heat pump*. ISBN 0-662-37827. (Disponible a <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/home/heating-heat-pump/booklet.pdf>)

CANADA. Natural Resources Canada, (2005). *Ground Source Heat Pump Project analysis*.

CHOW, T., et al, (2004). "Building-mix optimization in district-cooling system implementation". *Applied Energy*. Vol 77. nº 1. p. 1-13.

CLAUSER, C, (2006). *Geothermal Energy*, In: K. Heinloth (Ed), Landolt-Börnstein – Numerical Data and Functional Relationships, New Series, Energy Technologies. Vol 8. Subvolume 3: Renewable Energies, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.

COLLINS, P.A., et al, (2002). *Geothermal Heat Pump Manual*. Nova York. NYC Department of Design & Construction. (Disponible a <http://www.nyc.gov/html/ddc/downloads/pdf/geotherm.pdf>).

Comissió Europea, (2000). Libro verde: Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético. Luxemburg. Oficina de publicacions oficials de la Comunitat Europea. ISBN 92-894-0316-0.

DAGDAS, A., (2004). "Heat exchanger optimization for geothermal district heating systems: A fuel saving approach". *Renewable Energy*. Vol.32. p.1020-1032.

DEMIR, H., et al, (2009). "Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification". *Applied Thermal Engineering*. Vol 29. nº 2-3. p. 224-233.

DOMENICO, P.A., & SCHWARTZ, F.W., (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. Texas. Ed. Wiley. ISBN: 978-0-471-59762-9.

ECONAR, (1993). *GeoSource Heat Pump Handbook*, Elk River, Estats Units. (Disponible a <http://artikel-software.com/file/geo.pdf>)

ENERGY STAR, (2010). “Geothermal Heat Pumps Key Product Criteria” (Disponible a http://www.energystar.gov/index.cfm?c=geo_heat.pr_crit_geo_heat_pumps).

ENGINY Biorem, (2009). *Recopilació de dades i treballs de camp per definir el model conceptual dels aqüífer principals del sector Nord-Est del Subsistema Tordera. Informe Final*. Agència Catalana de l'Aigua.

ESPAÑA, Ministerio de industria Turismo y Comercio, (2008). *La energía en España 2008*. Madrid.

^a ESPAÑA, Ministerio de Fomento, (2009). *Salubridad, Documento Básico HS, Código Técnico de la Edificación*.

^b ESPAÑA, Ministerio de Fomento, (2009). *Ahorro de energía, Documento Básico HE, Código Técnico de la Edificación*.

European Geothermal Energy Council (2008). *Geothermal Heat Pumps – Ground Source Heat Pumps*. Bruselles, Bèlgica. (Disponible a <http://www.egec.org/target/EGEC-Brochure%20GSHP%202009.pdf>).

FLORIDES, G., & KALOGIROU, S., (2006). “Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications”. *Renewable Energy*. Vol. 32. nº 15. p. 2461-2478.

GARRIDO, E.A. & SÁNCHEZ, J.A., (2009). “Aprovechamiento geotérmico de las aguas subterráneas de Zaragoza. Hacia un crecimiento sostenible”, *Obras Urbanas* nº 19 p. 64-69.

GEHLIND, S., (2002). “Thermal Response Test Method Development and Evaluation”. Lulea University of Technology. Tesi doctoral.

GIROD GEOTERMIA, (2010). “Test de Respuesta térmica”. (Disponible a www.girodgeotermia.com).

GEOEXCHANGE, (2010). “Geothermal Heat Pumps”. (Disponible a <http://www.geoexchange.org>).

GEOSERVEI S.L., (2006). “Hidrologia i balanç superficial de l'aqüífer de la riera de Santa Colma: anàlisi d'alternatives i de mesures d'actuació en relació al proveïment municipal de Sta. Coloma de Farners i Riudarenes (la Selva)”. Agència Catalana de l'Aigua.

Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, (2010). “Recursos hídricos”. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas. Universidad Jaume I da Castelló. (Disponible a <http://www.agua.uji.es/>).

Heat Pump Association. Heat Pump Applications. (Disponible a <http://www.heatpumps.org.uk/HeatPumpApplications.htm>).

IEA Heat Pump Centre, (2009). “About Heat Pumps”. (disponible a www.heatpumpcentre.org).

Ingenieros Industriales, (2008). "Cálculo de cargas térmicas". (Disponible a http://www.instale.com/ingenieros/wp-content/uploads/2009/04/calculo_carga_termica.pdf).

Institut cartogràfic de Catalunya, (2010). *Zones vulnerables per nitrats, Atlas Nacional de Catalunya*. (Disponible a <http://www.atlesnacional.cat/icc/atles-nacional/medi-ambient/zones-vulnerables-per-nitrats/>).

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2007). *Plan de Acción 2008-2010*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, España.

Instituto Nacional de Estadística, (2001). *España al comienzo del siglo XXI, Censos de Población y Viviendas 2001*. (Disponible a <http://www.ine.es/prodyser/pubweb/folletocenso01/folletocenso01.htm>).

RIBA, O., (2010). *Diccionari de geologia*. Institut d'Estudis Catalans. Versió digital. (Disponible a <http://cit.iec.cat/dgeol/>).

KABUS, F., SEIBT, P., (2000). "Aquifer thermal energy storage for the Berlin Reichstag Building – New seat of the german parliament". WGC 2000. 3611-3615.

LE FEUVRE, P., (2007). "An Investigation into Ground Source Heat Pump Technology, its UK Market and Best Practice in System Design". University of Strathclyde. Tesi de màster.

LINEAU, J.P., et al, (1995). "Ground source heat pump case studies and utility programs". Geo-Heat Center. Oregon Institute of Technology. U.S. (Disponible a <http://geoheat.oit.edu/pdf/hp1.pdf>).

LLOPIS, G., & RODRIGO, V., (2007). *Guía de la energía geotérmica*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid FENERCOM. (Disponible a <http://www.fenercom.com/Publicaciones/Geotermia.pdf>).

MARTÍNEZ, M. & MURILLO, J.M., (1998). "Las fuentes de la Garrota (Girona): Un ejemplo de patrimonio hidrogeológico sobre terrenos volcánicos" Instituto Geológico y Minero de España. (Disponible a aguas.igme.es/igme/publica/pdfs/artycn15.pdf).

MARTÍNEZ, P.E., et al, (2005). *Fundamentos de hidrogeología*. Madrid. Ed. Mundi-Prensa.

McQuay Air Conditioning, (2002). *Geothermal Heat Pump Design Manual, Application Guide AG 31-008*, Stauton, Estats Units. (Disponible a http://www.mcquay.com/mcquaybiz/literature/lit_systems/AppGuide/AG_31-008_Geothermal_021607b.pdf).

NIELSEN, K., (2003). Thermal energy storage: A state-of-the-art. Report within the research program Smart Energy-Efficient Buildings at NTNU and SINTEF 2002-2006. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

NIEMI, A., et al, (2003). "Heat Transport in Unsaturated Zone Thermal Energy Storage – Analysis with Two-Phase and Single-Phase Models, Heat Transport Processes in an UZTES Experiment Kluwer". Uppsala University, Sweden.

NIETO, A., (2009). "Amortización de una instalación geotérmica en 5 años", *Obras Urbanas*. nº16 p. 122-123.

OBRAS URBANAS, (2009). *Presente y perspectivas de futuro de la energía geotérmica*. Obras Urbanas. nº 14. p. 12-13.

PÉREZ, M. & ZUBIRIA, D., (2009). "Intercambiadores geotérmicos verticales". Obras Urbanas nº 14. p. 60-62.

Plataforma Tecnológica Española de Geotermia (2008). *Visión a 2030*. España. Ministerio de Ciencia e Innovación.

RAFFERTY, K., (2001). *An information survival kit for the prospective geothermal heat pump owner*. Klamath Falls. Geo-Heat Center Oregon Institute of Technology.

RAFFERTY, K., et al, (1999). "Scaling in geothermal heat pump systems". Idaho Operations Office. U.S. Department of Energy (Disponible a <http://geoheat.oit.edu/otl/scaleghp.pdf>).

THERMONEXUS, (2010). Product & services. (Disponible a <http://www.thermonexus.com/>).

SANAYE, S., et al, (2009). "Thermal-economic modelling and optimization of vertical ground-coupled heat pump". Energy Conversion and Management. Vol 50. nº 4. p. 1136-1147.

SÁNCHEZ, F.J. (2004). "Medidas puntales de permeabilidad", Universidad de Salamanca, (Disponible a <http://web.usal.es/~javisan/hidro/>).

SANDERS, L., (1998). *A manual of field hydrogeology*. Northeastern Illinois University. U.S.A. Ed. Prentice-Hall.

SANNER, B. (2007). *Ground Source Heat Pumps - the European perspective*. Bratislava. European Geothermal Energy Council. (Disponible a <http://www.egec.org/target/bratislava07/EGEC%20WS%20bratislava%2001%20121107.pdf>).

SANNER, B., (2001). "Shallow geothermal energy". Giessen. GHC BULLETIN Justus-Liebig University. (Disponible a <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull22-2/art4.pdf>).

SEIBT, P., & KABUS, F., (2000). "Aquifer thermal energy storage for the Berlin Reichstag building -new seat of the german parliament, Proceedings World Geothermal Congress 2000.

Servei Meteorològic de Catalunya, (2010). "Dades d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) dels anys 2009 i 2010: Vilobí d'Onyar (la Selva)". (Disponible a http://www.meteo.cat/mediamb_xemec/servmet/marcs/marc_dades.html).

SHIKLOMANOV, I.A. (1997). *Comprehensive assesment of the freshwater resources of the world*. Stochkolm Environment Institute. 88 p.

SORAVILLA, L., (2009). "Energía geotérmica y eficiencia energética, Institut Català d'Energia (ICAEN), Jornada sobre aprovechamiento geotérmico, Barcelona, España.

United States Geological Survey, (2010). Water Resources of the United States. (Disponible a <http://water.usgs.gov/>).

WINTER, T.C. et al., (1998). *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*. Colorado, USA. U.S. Geological Survey. ISBN 0-607-89339-7.

ZHANG, H.F., et al, (2006). "Heat conduction and heat storage characteristics of soils". Department of Thermal Science and Energy Engineering. University of Science and Technology of China.

ZHANG, H.F., et al, (2007). "Heat conduction and heat storage characteristics of soils". *Applied Thermal Engineering*. Vol 27. n° 2-3. p. 369-373.

ZHAO, Y., et al, (2003). "Cost-effective optimal design of groundwater source heat pumps". *Applied Thermal Engineering*. Vol 23. n° 13. p. 1595-1603.

6. Annexos

Annex A: Paràmetres tèrmics i hidrogeològics

Material	Conductivitat tèrmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Capacitat calorífica volumètrica ($MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)	
Roques i sediments	Carbó	0,3	1,8
	Calcària	1,5-3,0 (2,8)	1,9-2,4 (2,3)
	Esquist	1,5-3,5 (2,1)	2,3
	Argila humida	0,9-2,2 (1,6)	2,4
	Basalt	1,3-2,3 (1,7)	2,4-2,6
	Diorita	1,7-3,0 (2,6)	2,9-3,3
	Gres	2,0-6,5 (2,3)	2,0-2,1
	Gneis	2,5-4,5 (2,9)	2,1-2,6 (2,1)
	Arcosa	2,3-3,7 (2,9)	2
	Granit	3,0-4,0 (3,4)	1,6-3,1 (2,4)
Quarsita	5,5-7,5 (6,0)	1,9-2,7 (2,1)	
Minerals	Mica	2,0-2,3	2,2-2,3
	Feldspat	2,3-2,5	1,6-1,8
	Olivina	3,1-5,1	2,0-3,6
	Quars	7,7	1,9-2,0
	Calcita	3,6	2,24
	Pirita	19,2-23,2	2,58
	Galena	2,3-2,8	1,59
	Hematita	11,3-12,4	3,19
	Diamant	545	-
Halita	5,9-6,5	1,98	
Altres	Aire	0,024	$1,29 \cdot 10^{-3}$
	Vidre	0,8-1,3	1,6-1,9
	Formigó	0,8 (1,6)	1,8
	Gel	1,7-2,0 (2,2)	1,9
	Aigua	0,6	4,18
	Coure	390	3,5
	Freó-12	0,073	1,3
	Fusta (roure)	0,1-0,4	1,4
	Polipropà	0,17-0,20	1,7
	Poliestirè	0,035	-

Taula 5.1: Valors de conductivitat tèrmica i capacitat calorífica volumètrica. Adaptat de Banks, D., 2008.

Material	Porositat total (%)	Porositat efectiva (%)
Argiles	40-60	0-5
Llims	35-50	3-19
Sorres fines	20-50	10-28
Sorres grolleres	21-50	22-35
Graves	25-40	13-26
Esquists	1-10	0,5-5
Esquists fracturats	30-50	N.D.*
Gresos	5-35	0,5-10
Roques calcàries (No càrstiques)	0,1-25	0,1-5
Roques calcàries càrstiques	5-50	5-40
Roques ígnies i metamòrfiques sense fracturar	0,01-1	0,0005
Roques ígnies i metamòrfiques fracturades	1-10	0,00005-0,01

*absència de dades

Taula 5.2: Valors de porositat total i porositat efectiva en funció del material geològic. Adaptat de Sanders, L., 1998.

Material	Permeabilitat (m·dia ⁻¹)	
Sediments	Graves	25-2500
	Sorres grollera	0,1-500
	Sorres mitjana	0,1-50
	Sorres fina	0,02-20
	l·lims	1·10 ⁻⁴ -2
	Argiles	1·10 ⁻⁶ -4·10 ⁻⁴
	Argila marina	1·10 ⁻⁷ -2·10 ⁻⁴
Roques sedimentàries	Calcàries carstificades	0,1-2000
	Calcàries, dolomies	1·10 ⁻⁴ -0,5
	Gresos	3·10 ⁻⁵ -0,5
	Pissarres sense fracturar	1·10 ⁻⁸ -2·10 ⁻⁴
Roques cristalines	Basalts permeables	0,03-2000
	Roques ígnies i sense fracturar	1·10 ⁻⁹ -1·10 ⁻⁵
	Roques ígnies fracturades	0,001-25
	Granits alterats	0,3-5
	Gabres alterats	0,05-0,3

Taula 5.3: Valors de permeabilitat en funció del material geològic. Adaptat de Domenico, P.A. & Schwartz, F.W., 1998.

Annex B: Casos d'estudi

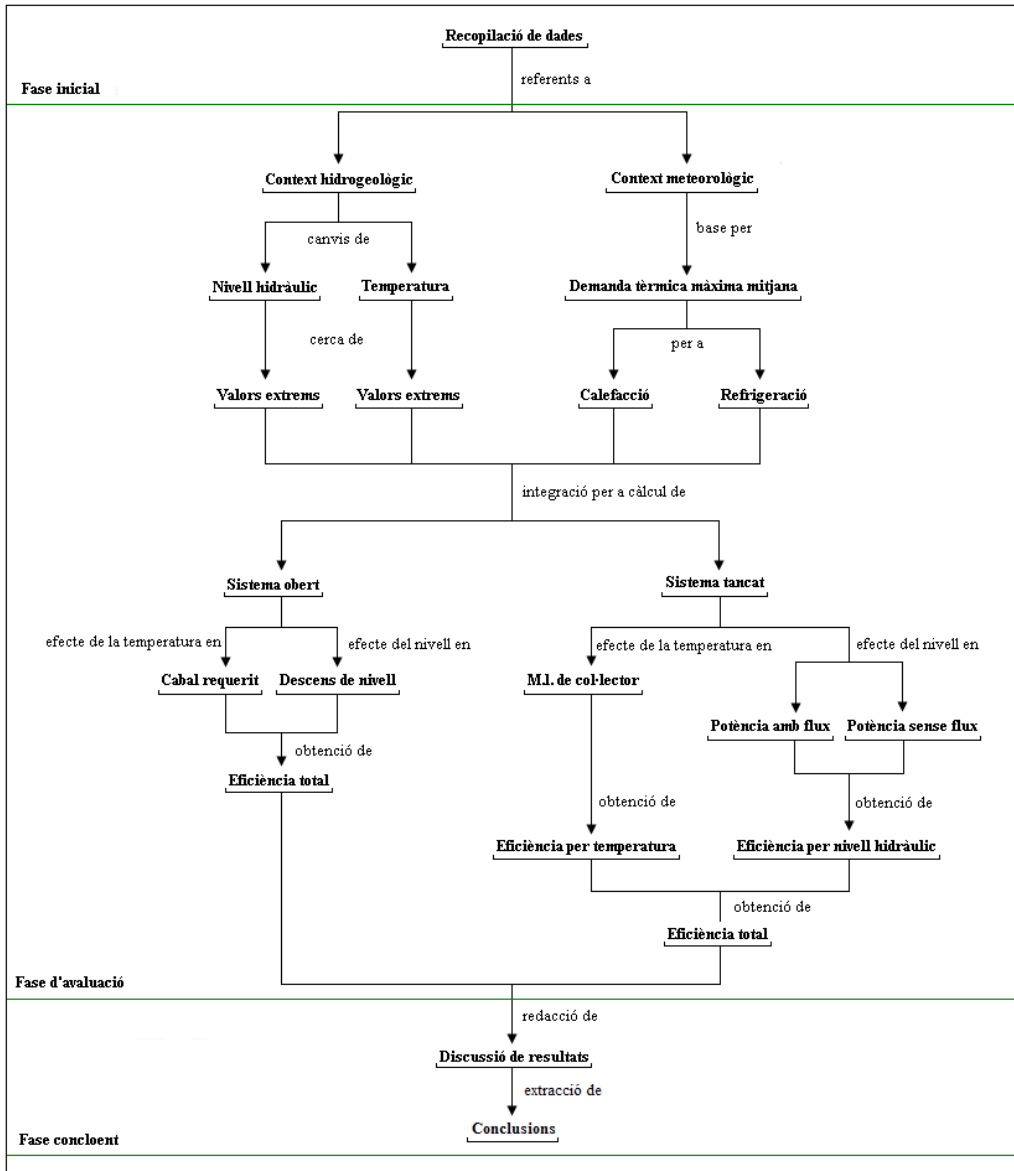


Figura 5.1: Digrama de flux de la metodologia de treball en cada cas d'estudi. Elaboració pròpia.

ZONA CLIMÀTICA C2

Transmitància límit de murs de fachada y cerramientos en contacto con el terreno $U_{Mlim}: 0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$
 Transmitància límit de suelos $U_{Slim}: 0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$
 Transmitància límit de cubiertas $U_{Clim}: 0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$
 Factor solar modificado límit de lucernarios $F_{Lim}: 0,32$

% de superficie de huecos	Transmitància límit de huecos ⁽¹⁾ $U_{Hlim} \text{ W/m}^2\text{K}$				Factor solar modificado límit de huecos F_{Hlim}					
	N	E/O	S	SE/SO	Carga interna baja			Carga interna alta		
					E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	4,4	4,4	4,4	4,4	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,4 (4,2)	3,9 (4,4)	4,4	4,4	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,9 (3,3)	3,3 (3,8)	4,3 (4,4)	4,3 (4,4)	-	-	-	0,60	-	-
de 31 a 40	2,6 (2,9)	3,0 (3,3)	3,9 (4,1)	3,9 (4,1)	-	-	-	0,47	-	0,51
de 41 a 50	2,4 (2,6)	2,8 (3,0)	3,6 (3,8)	3,6 (3,8)	0,59	-	-	0,40	0,58	0,43
de 51 a 60	2,2 (2,4)	2,7 (2,8)	3,5 (3,6)	3,5 (3,6)	0,51	-	0,55	0,35	0,52	0,38

⁽¹⁾ En los casos en que la transmitància media de los murs de fachada U_{Mm} , definida en el apartado 3.2.2.1, sea inferior a 0,52 $\text{W/m}^2\text{K}$ se podrá tomar el valor de U_{Hlim} indicado entre paréntesis para las zonas climáticas C1, C2, C3 y C4.

Taula 5.4: Requisites mínims de transmitància tèrmica exigits pel "Código Técnico de la Edificación" per a un habitatge situat a la zona climàtica C2.

DEMANDA TÈRMICA MÀXIMA (kWh)		
Mesos	Calefacció	Refrigeració
Setembre	32,78	-
Octubre	53,93	-
Novembre	58,95	-
Desembre	79,57	-
Gener	64,50	-
Febrer	61,60	-
Març	62,12	-
Abril	47,58	-
Maig	35,69	-
Juny	-	38,57
Juliol	-	48,58
Agost	-	44,63
DEMANDA TÈRMICA MITJANA MÀXIMA (kWh)	55,19	43,93

Taula 5.5: Resultats de la demanda tèrmica mitjana màxima mensual. Elaboració pròpia.

POTÈNCIA REUERIDA DEL SUBSOL (kWh)		
Règim	Sistema obert	Sistema tancat
Calefacció	40,66775572	39,42282442
Refrigeració	52,16874585	53,27345863

Taula 5.6: Potència requerida del subsòl per suplir les demandes tèrmiques de la taula 5.5, en funció del sistema considerat i del seu COP. Elaboració pròpia.

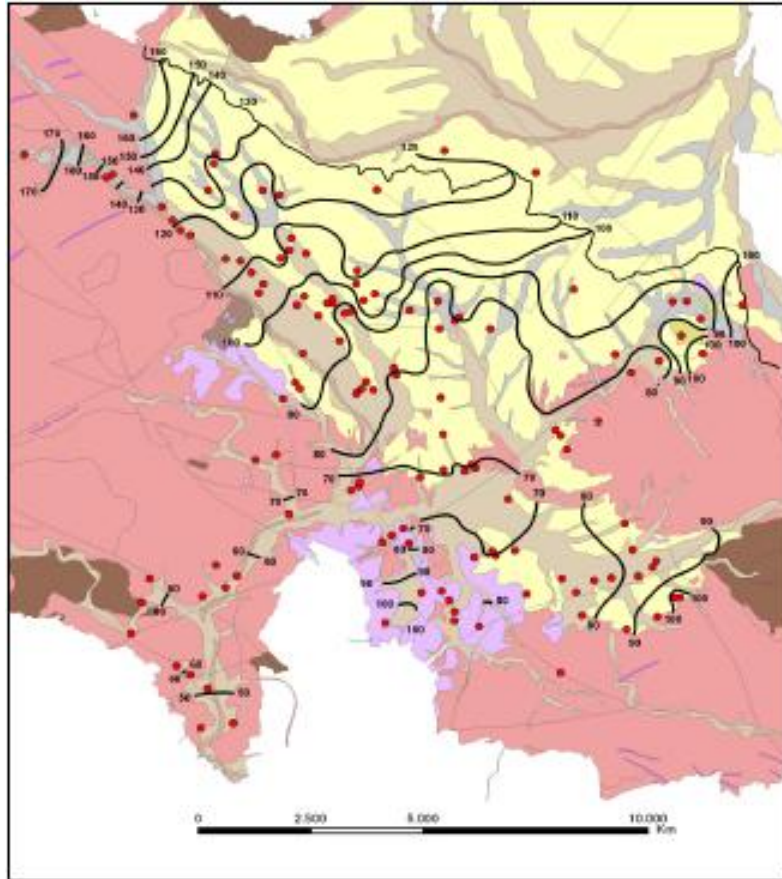


Figura 5.2: Piezometria regional de la zona de Santa Coloma de Farners. Adaptat d' ACA, 2009.

Annex C: Cronograma

Temps	Reunions amb tutor	Recerca bibliogràfica	Redacció capítol 1	Redacció capítol 2	Tractament de dades	Discussió de resultats + conclusions	preparació i revisió del document final	Entrega i defensa del projecte
Març	1a set							
	2a set							
	3a set							
	4a set							
Abril	1a set							
	2a set							
	3a set							
	4a set							
Maig	1a set							
	2a set							
	3a set							
	4a set							
Juny	1a set							
	2a set							
	3a set							
	4a set							
Juliol	1a set							
	2a set							
	3a set							
	4a set							
Agost	1a set							
	2a set							
	3a set							
	4a set							
Setembre	1a set							
	2a set							
	3a set							
	4a set							

Annex D: Pressupost

DESPESES DIRECTES				
	Raó	Temps (h)	€/h	Cost econòmic total (€)
Recursos humans	Recerca bibliogràfica	25	7	175
	Tractament de dades	50	15	750
	Redacció	75	15	1125
	Reunions	15	10	150
	Subtotal			2200
Recursos humans	Raó	Quantitat	€/menú	Cost econòmic total (€)
	Dietes	27	5,5	148,5
	Desplaçaments	36	€/viatge	63
	Subtotal			211,5
Recursos materials	Raó	Temps (h)	€/any	Cost econòmic total (€)
	Ordinador	6	175	87,5
	Impressions	còpies	€/còpia	Cost econòmic total (€)
		377	0,1	37,7
	Material d'oficina	Quantitat	€/unitat	Cost econòmic total (€)
	-	-	35	
	Subtotal			160,2
DESPESES INDIRECTES				
Taxes i impostos	Raó	Quantitat (%)	€/100€	Cost econòmic total (€)
	IVA	18	18	462,9
	Subtotal			462,9
Despesa total (€)				3034,6

Annex E: Sumari de figures i taules

Figura 1.1: Evolució de la demanda d'energia primària entre les dècades 1970-2000 a Espanya	8
Figura 1.2: Diagrama de flux de les principals normatives en l'àmbit energètic	15
Figura 2.1: Distribució de l'energia solar incident a la terra	19
Figura 2.2: Perfil típic de temperatura vs fondària del sòl	20
Figura 2.3: Relació entre la bomba de calor i l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia	22
Figura 2.4: Esquema d'una bomba de calor de compressió	24
Figura 2.5: Etiqueta AHRI, (esquerra) i etiqueta Energy Star (dreta)	28
Figura 2.6: Esquema bàsic d'un GSHP per compressió	30
Figura 2.7: Situació típica del procés de perforació	32
Figura 2.8: Esquema d'un col·lector geotèrmic obert	34
Figura 2.9: Col·lector vertical instal·lat en un pou de perforació	36
Figura 2.10: Esquema d'un col·lector geotèrmic tancat vertical	37
Figura 2.11: Col·lector horitzontal en paral·lel (esquerra) i col·lector horitzontal en espiral (dreta)	37
Figura 2.12: Esquema d'un col·lector geotèrmic tancat, horitzontal i en espiral	38
Figura 2.13: Emissions en Kg de CO ₂ per cada kWh tèrmic produït en funció de la tecnologia	40
Figura 2.14: Evolució qualitativa del grau de sostenibilitat en el cas d'utilitzar combustibles fòssils o electricitat procedent d'aquests per fer funcionar els dispositius complementaris del complex geotèrmic	41
Figura 2.15: Mapa de les zones vulnerables per nitrats a Catalunya	42
Figura 2.16: Vista de 3 equips de perforació treballant simultàniament en la construcció de l'hospital de Mollet del Vallès	43
Figura 2.17: Mapa de Saragossa amb els punts de captació d'aigua per a usos geotèrmics (esquerra) i imatge del procés de perforació d'un dels pous de captació (dreta)	44

Figura 2.18: Preu en € del kWh tèrmic produït en funció de la tecnologia. Dades actualitzades l'agost del 2008	45
Figura 2.19: Aqüífers de Catalunya susceptibles de ser explotats per a geotèrmia de molt baixa temperatura	46
Figura 2.20: Evolució temporal (1996-2006) de les instal·lacions de GSHP a Alemanya	47
Figura 2.21: Principals fonts i processos dissipadors d'energia del balanç calorífic planetari	50
Figura 2.22: Representació del transport de calor per conducció	54
Figura 2.23: Fenòmens de transport de calor en funció de la saturació hídrica del medi i del sistema de GSHP	56
Figura 2.24: Equipament i resultats d'un TRT	57
Figura 2.25: Esquema d'un aqüífer lliure	59
Figura 2.26: Esquema d'un aqüífer semiconfinat	60
Figura 2.27: Esquema d'un aqüífer confinat	61
Figura 2.28: Esquema d'un aqüífer lliure entre dos nivells confinants	61
Figura 2.29: Les aigües subterrànies en el cicle hidrològic	62
Figura 2.30: Relació de les aigües subterrànies amb altres fenòmens del cicle hidrològic	63
Figura 2.31: Relació riu-aqüífer	64
Figura 2.32: Representació gràfica de l'experiment de Darcy a través d'una zona saturada amb una permeabilitat K i un cabal Z de pas constant	69
Figura 3.1: Característiques de l'habitatge estàndard utilitzat en els casos d'estudi	74
Figura 3.2: Evolució de la temperatura al llarg de l'any 2009 a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar (gràfic superior). Evolució mensual de la demanda tèrmica per calefacció i refrigeració calculada en base a les temperatures de l'any 2009 a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar (gràfic inferior esquerra i inferior dreta respectivament)	77
Figura 3.3: Mapa geològic de la zona de la riera de Santa Coloma de Farners amb la situació dels punts d'estudi	78
Figura 3.4: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER entre els mesos de gener i maig de l'any 2009, al pou Cultius Myrtus superficial	80

Figura 3.5: Evolució de les precipitacions a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar entre els mesos de gener i maig de l'any 2009	80
Figura 3.6: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial	82
Figura 3.7: Evolució de les variacions del cabal requerit per calefacció, del gruix saturat i del descens entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial	82
Figura 3.8: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció calculada entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a cultius Myrtus superficial	83
Figura 3.9: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial	84
Figura 3.10: Evolució de la variació de l'eficiència com a conseqüència dels canvis de nivell hidràulic i de temperatura entre els mesos de gener i maig de l'any 2009 a Cultius Myrtus superficial	86
Figura 3.11: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 al pou Mas Llunes	88
Figura 3.12: Evolució de les precipitacions a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009	88
Figura 3.13: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes	89
Figura 3.14: Evolució de les variacions del cabal requerit per calefacció, del gruix saturat i del descens entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes	90
Figura 3.15: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció calculada entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes	90
Figura 3.16: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes	91
Figura 3.17: Evolució de la variació de l'eficiència com a conseqüència dels canvis de nivell hidràulic i de temperatura entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes	92
Figura 3.18: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER entre els mesos de gener i març de l'any 2009, al pou Mas Masmalavila	94
Figura 3.19: Evolució de les precipitacions a l'estació meteorològica de Vilobí d'Onyar entre els mesos de gener i març de l'any 2009	95
Figura 3.20: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila	95

Figura 3.21: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila	96
Figura 3.22: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció calculada entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila	97
Figura 3.23: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de febrer i abril de l'any 2009 a Mas Llunes	98
Figura 3.25: Evolució de la variació de l'eficiència com a conseqüència dels canvis de nivell hidràulic i de temperatura entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila	98
Figura 3.26: Mapa geològic de la zona d'Olot amb la situació dels punt d'estudi	99
Figura 3.27: Evolució de la temperatura de l'aigua i del nivell hidràulic registrat pel DIVER durant l'any 2008 al pou EMOL-1	100
Figura 3.28: Evolució de la precipitació a l'estació meteorològica d'Olot durant l'any 2008	101
Figura 3.29: Evolució de la temperatura de l'aigua i del cabal requerit per suplir la demanda tèrmica de calefacció i de refrigeració de l'any 2008 a EMOL-1	102
Figura 3.30: Evolució de la variació del nivell hidràulic i de l'eficiència de l'intercanvi de calor medi – col·lector entre els mesos de gener i març de l'any 2009 a Mas Malavila	103
Figura 3.31: Evolució de la temperatura de l'aigua i dels m.l. de col·lector que calen instal·lar per suplir la demanda tèrmica de calefacció i refrigeració calculada per l'any 2008 a EMOL-1	103
Figura 3.32: Variació relativa del cabal requerit en mode calefactor en funció de successives disminucions de la temperatura de l'aigua	106
Figura 3.33: Evolució de l'eficiència i potencia proporcionada en relació a successives disminucions del nivell freàtic en l'aqüífer al·luvial granític	110
Taula 2.1: Tipus d'energia geotèrmica en funció de la seva temperatura	21
Taula 2.2: Valors mitjans del paràmetre COP _H en funció de la tecnologia	25
Taula 2.3: Expressions matemàtiques a implementar en un assaig de bombeig en funció de l'aqüífer i del seu règim	71
Taula 3.1: Valors de COP requerits segons Energy Star, a partir del 1 de gener del 2011	75
Taula 3.2: Característiques geològiques i hidrogeològiques de les unitats d'estudi	76

Taula 3.3: Taula resum dels resultats obtinguts en valorar la disminució de l'eficiència total d'un col·lector vertical tancat en descensos successius d'una metre del nivell freàtic en un medi al·luvial granític	109
Taula 3.4: Taula resum dels resultats obtinguts en valorar la disminució de l'eficiència total d'un col·lector vertical tancat en descensos successius d'una metre del nivell freàtic en un medi neogen detrític	109
Taula 3.5: Taula resum dels resultats obtinguts en valorar la disminució de l'eficiència total d'un col·lector vertical tancat en descensos successius d'una metre del nivell freàtic en un medi paleozoioc granític	109