

**EVAPOTRANSPIRACIÓ POTENCIAL DE MENORCA.  
COMPARACIÓ ENTRE ELS DIFERENTS MÈTODES DE CÀLCUL**



**Sònia Estradé Niubó**

# OBSERVATORI SOCIOAMBIENTAL DE MENORCA

---

## **DOCUMENTS DE TREBALL 05/2003**

### **EVAPOTRANSPIRACIÓ POTENCIAL DE MENORCA. COMPARACIÓ ENTRE ELS DIFERENTS MÈTODES DE CÀLCUL.**

Càlcul de l'evapotranspiració potencial de Menorca. Comparativa entre diversos mètodes de càlcul i aproximació al mètode de Penman-Monteith.

#### **Elaboració:**

Sònia Estradé Niubó, llicenciada en Ciències Ambientals. Seguiment dels recursos hídrics de Menorca a l'OBSAM.

Institut Menorquí d'Estudis (IME)  
Web: [www.obsam.org](http://www.obsam.org)

Carrer Nou, 35

07701 Maó (Menorca) Tel: 971 361582

Fax: 971351642

#### **Col·laboració:**

David Carreras  
Antoni Fullana

Anna Gallofré  
Sergi Marí

#### **Institucions i entitats col·laboradores:**

Institut Nacional de Meteorologia. Centre Territorial Illes Balears.  
Consell Insular de Menorca

#### **Agraïments:**

Agraeixo molt especialment la col·laboració de tot l'equip tècnic de l'OBSAM per les seves aportacions i el seu suport, a David Carreras, per la seva col·laboració en el disseny del document i pels nombrosos consells i intercanvi d'opinions; a Antoni Fullana, per les seves aportacions en GIS; i al director de l'OBSAM, Sergi Marí, per guiar les línies a seguir i per la seva confiança i col·laboració. També agraeixo especialment la important col·laboració i aportació de coneixements en temes d'estadística d'Anna Gallofré. I, en definitiva, a tot el personal de l'IME  
I, per últim, els consells i aportacions que han estat de gran ajuda del Sr. Javier Heredia de l'IGME.

## **ÍNDEX**

- 1. RESUM**
- 2. INTRODUCCIÓ**
- 3. ESTACIONS METEOROLÒGIQUES ANALITZADES**
- 4. ANÀLISI DELS DIFERENTS MÈTODES DE CÀLCUL DE L'EVAPOTRANSPIRACIÓ**
  - 4.1. Mètode de Thornthwaite**
  - 4.2. Mètode de Turc**
  - 4.3. Mètode de Hargreaves**
  - 4.4. Mètode de Penman-Monteith**
- 5. COMPARACIÓ DELS DIVERSOS MÈTODES**
- 6. APROXIMACIÓ DELS DIFERENTS MÈTODES AL DE PENMAN-MONTEITH**
- 7. VALORS D'ETP APROXIMADA AL MÈTODE DE PENMAN A PARTIR DE HARGREAVES I TURC**
- 8. CONCLUSIONS**
- 9. BIBLIOGRAFIA**

## 1. RESUM

Aquest article presenta els resultats que hem obtingut amb l'estudi de l'evapotranspiració potencial de Menorca comparant diverses metodologies i està inclòs dins un treball d'abast més ampli en què l'objectiu final és intentar caracteritzar i aproximar el valor de la recàrrega de l'aqüífer de Migjorn de Menorca i definir el seu balanç hídric. Per arribar a tal objectiu tractarem per separat els diversos components del balanç.

S'ha calculat l'evapotranspiració potencial o de referència (ETP o  $E_{Tr}-E_{T_0}$ ) a través de diversos mètodes i s'han comparat els diferents resultats per tal de valorar i quantificar l'evapotranspiració potencial de Menorca. A més, s'hi valora quin dels mètodes s'aproxima millor al de Penman-Monteith, mètode reconegut per la FAO i que millors resultats ofereix. A partir d'aquí s'ha intentat trobar una funció que ens permeti aproximar els valors d' $E_{Tr}$  Penman-Monteith a partir dels resultats obtinguts per un altre mètode i, així, aconseguir tenir els valors aproximats d'ETP amb el mètode de Penman-Monteith per a totes les estacions de Menorca sense la necessitat que siguin completes, és a dir, encara que manquin de registres d'humitat relativa i velocitat del vent.

## 2. INTRODUCCIÓ

L'evapotranspiració és el resultat del procés pel qual l'aigua canvia d'estat líquid a gasós ja sigui directament o a través de les plantes. És a dir, és un concepte que té en compte l'evaporació i la transpiració.

El concepte d'**Evapotranspiració potencial** va ser introduït per Thornthwaite suposant un desenvolupament vegetal òptim i una capacitat de camp permanentment completa. Es tracta d'un límit superior de la quantitat d'aigua que realment torna a l'atmosfera per evaporació i transpiració. Aquesta última correspondria al concepte d'**evapotranspiració real**. L'evapotranspiració té una gran importància relativa respecte al total d'aigua rebuda en una zona. A la península, les pèrdues totals per evapotranspiració solen ser del 70% i poden arribar al 90% en alguns llocs (Custodio i Llamas, 1976).

La correcta determinació de l'ETP contribuiria en gran manera a l'augment de l'efectivitat en l'agricultura, tant en terres de regadiu com de secà, perquè aquesta ETP assenyala la quantitat d'aigua que es necessita en el supòsit d'un desenvolupament vegetal òptim. S'ha de tenir en compte que l'agricultura s'enduu una part molt important del consum total d'aigua d'un territori i, per tant, és imprescindible determinar les necessitats hídriques dels cultius -el valor estricte de

les quals correspondria a la diferència entre evapotranspiració potencial i real- i intentar arribar a la màxima eficiència i el mínim consum necessari.

Tot i que les dades d'evapotranspiració són tan essencials com les de pluviometria, rarament es disposa de mesures d'evapotranspiració. En general aquesta s'ha de mesurar amb les dades meteorològiques disponibles. Els mètodes més aplicats per calcular l'ETP poden agrupar-se en: **mètodes basats en la física teòrica del microclima**, com serien balanços d'energia, perfils d'humitat i velocitat del vent, flux turbulent d'humitat i fórmules semiempíriques combinades; **mesures directes** (lisímetres, evaporímetres, etc.), i **mètodes empírics**, com Thornthwaite, Blaney-Criddle, Makking, Turc etc.

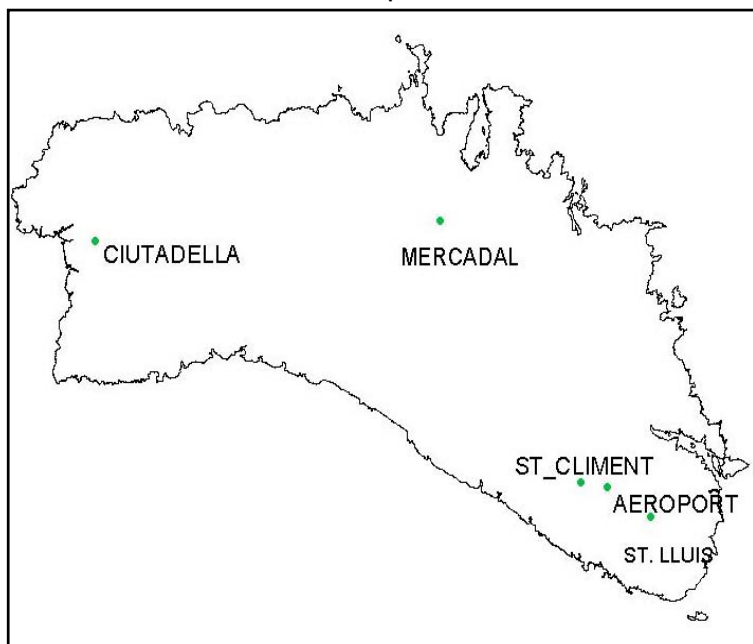
L'Organització de les Nacions Unides per a l'Agricultura i l'Alimentació (FAO) i la Comissió Internacional per al Regatge i Drenatge (ICID), a partir de l'avaluació de vint equacions d'evapotranspiració de referència ( $ET_0$ ) per a onze localitats amb condicions climàtiques i geogràfiques diferents (Jensen et al. 1990), van intentar estandarditzar un mètode de  $ET_0$  que representés i definís un prat hipotètic de referència amb el qual calibrar i validar altres mètodes de  $ET_0$ . El mètode recomanat era Penman-Monteith i, el concepte d'evapotranspiració de referència, "la taxa d'evapotranspiració d'un prat de pastura hipotètic de referència, ben abastat d'aigua, amb altura de 0.12 m, una resistència de superfície de cultiu fixa de 70 s/m i un albedo de 0.23 " (Allen et al.1998)

En definitiva, Penman-Monteith és el mètode reconegut per la FAO i el que millors resultats ofereix després d'haver-lo contrastat exhaustivament amb d'altres tant en climes humits com en climes àrids.

En aquest treball, hem determinat l'evapotranspiració potencial per a periodicitats mensuals i diàries de l'illa de Menorca emprant diferents mètodes i, tot seguit, hem fet un estudi comparatiu dels resultats.

### 3. ESTACIONS METEREOLÒGIQUES ANALITZADES

Les estacions meteorològiques seleccionades per l'anàlisi de dades diàries han estat Ciutadella-Son Quim; Es Mercadal-s'arada, i l'estació de l'aeroport de Menorca al terme municipal de Maó. Aquesta darrera és l'única estació meteorològica completa de l'illa de Menorca; és a dir, l'única en què es prenen mesures diàries de precipitació, temperatura màxima, mínima i mitjana, humitat relativa, velocitat i direcció del vent entre d'altres. Les estacions analitzades i les dades disponibles es poden observar a la taula 1:



Mapa 1. Estacions meteorològiques analitzades

<b>Estació meteorològica</b>	<b>UTM X</b>	<b>UTM Y</b>	<b>ALÇADA (m)</b>	<b>DADES DISPONIBLES*</b>
Aeroport de Menorca	604900	4413800	89	Tm, TM, Tx, Hr, Vv, P
Es Mercadal s'Arada	594400	4428600	80	Tm, TM, Tx
Ciutadella-Son Quim	572200	4427500	20	Tm, TM, Tx

Taula 1. Estacions meteorològiques de Menorca analitzades amb registres diaris

\*Tm: temperatura mínima; TM: temperatura màxima; Tx: temperatura mitjana; Hr: humitat relativa; Vv: Velocitat del vent; P: pluviometria.

Pel que fa a dades mensuals, les estacions triades per al càlcul de l'ETP son cinc de les que compten amb registres més antics de, com a mínim, temperatura:

<b>Estació meteorològica</b>	<b>UTM X</b>	<b>UTM Y</b>	<b>ALÇADA</b>	<b>DADES DISPONIBLES*</b>
Sant Lluís	607.6	4412.2	60	Tm, TM, Tx, P
Es Mercadal s'arada	594.4	4428.6	80	Tm, TM, Tx
Ciutadella-Son Quim	572.9	4427.5	20	Tm, TM, Tx
Sant Climent	603.2	4414.1	80	Tm, TM, Tx, P

Aeroport	604.9	4413.8	85	Tm, TM, Tx, P
----------	-------	--------	----	---------------

Taula 2. Estacions meteorològiques de Menorca amb registres mensuals incloses a l'estudi

#### 4. ANÀLISI DELS DIFERENTS MÈTODES DE CÀLCUL DE L'ETP

##### 4.1. Mètode de Thornthwaite

Es tracta d'un mètode totalment empíric que estima l'evapotranspiració tenint en compte només els valors de temperatura mitjana mensual. Altres dades s'obtenen de la latitud, amb la qual, mitjançant taules, obtenim el nombre teòric d'hores de sol per a cada mes, amb la qual cosa, per tant, obtenim valors d'ETP mensuals. S'han realitzat els càlculs per al període 1984-2002 de les cinc estacions climatològiques de Menorca de les quals tenim sèries de registres més llargues (*gràfic 1*) i per a la mitjana de les estacions de la zona de Migjorn (*gràfic 2*) obtenint, per a aquesta última, un valor màxim de 173,7 mm, l'agost del 1994, i un mínim de 12,7 mm, el gener del 1985.

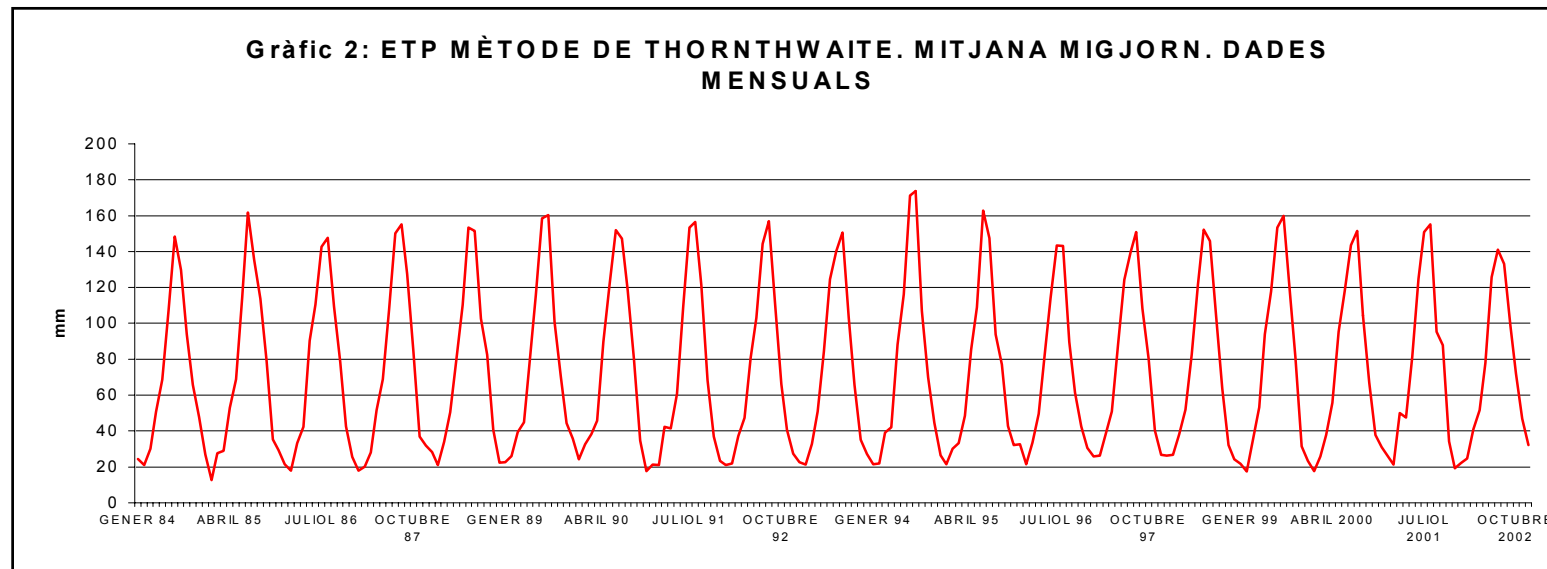
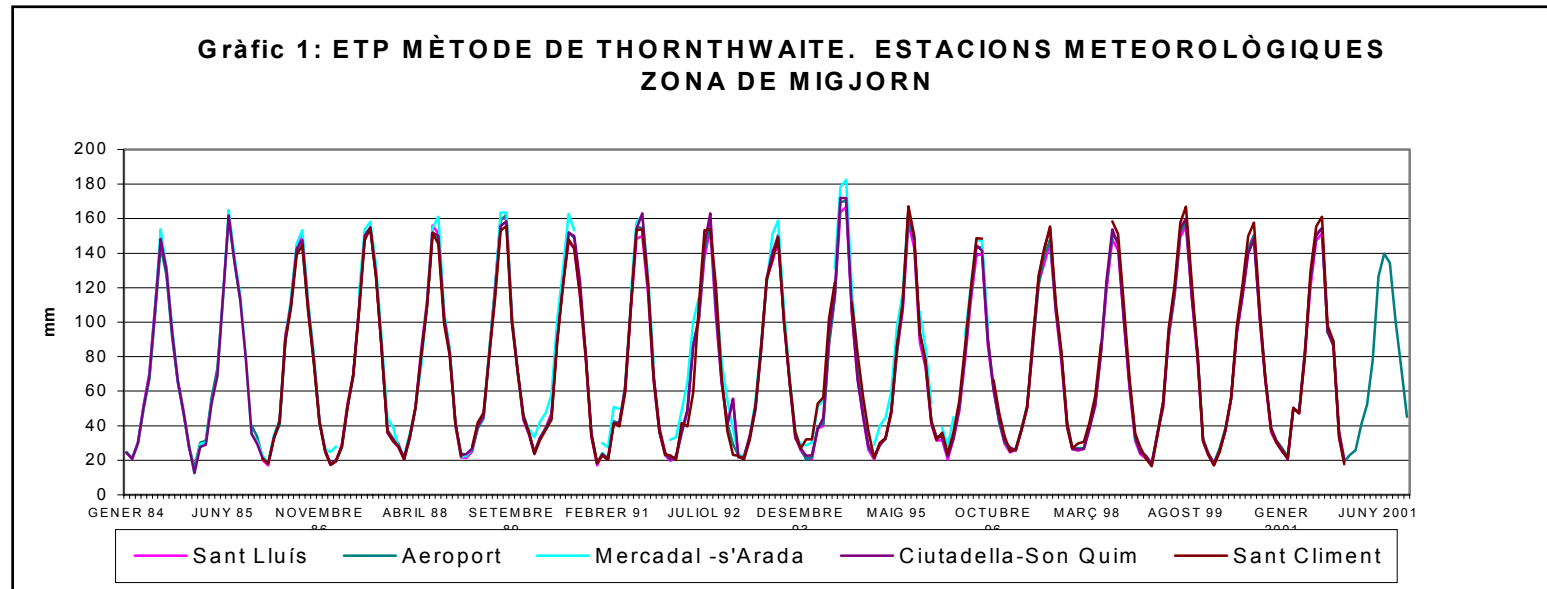
Si ens fixem en els valors mitjans mensuals per a tot el període, és a dir, si establím els valors d'ETP per a l'any mitjà en el període d'estudi, obtenim, com és previsible, un màxim a l'agost, amb un valor de 146,6 mm, i un mínim al gener, 28 mm, tal com podem observar a continuació.

Mes	gener	febrer	març	abril	maig	juny	juliol	agost	set.	oct.	nov.	des.	ANUAL
ETP	28.0	28.5	43.9	54.7	87.0	115.9	145.8	146.6	105.1	76.5	43.8	32.2	908.4

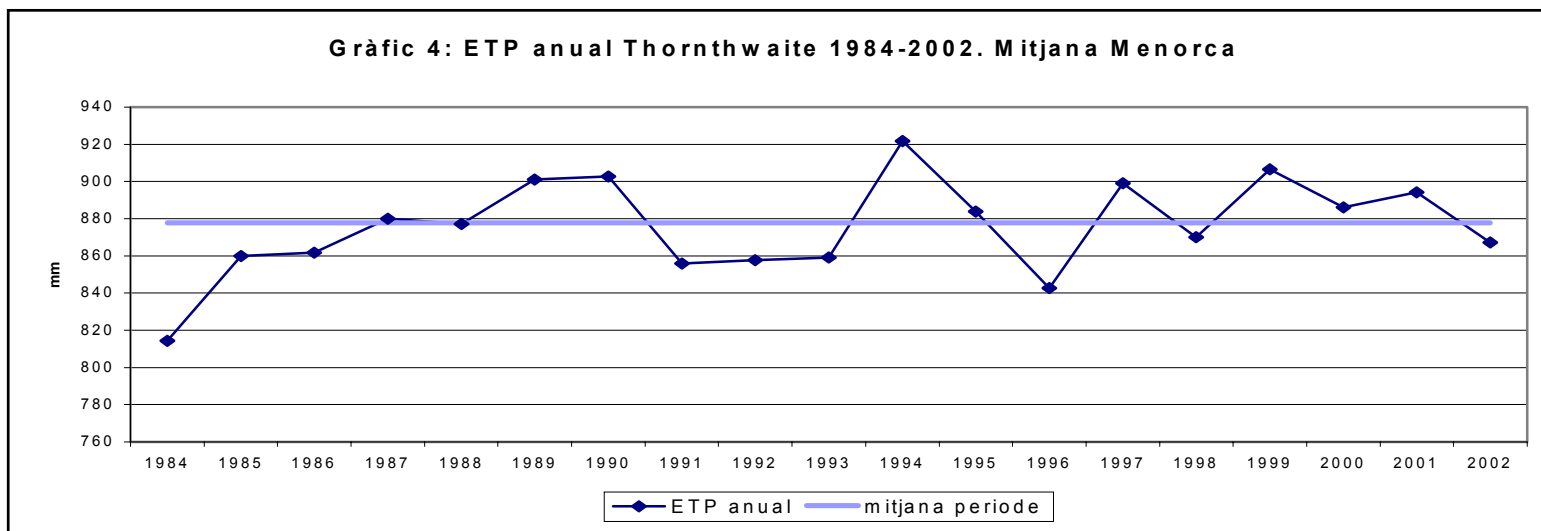
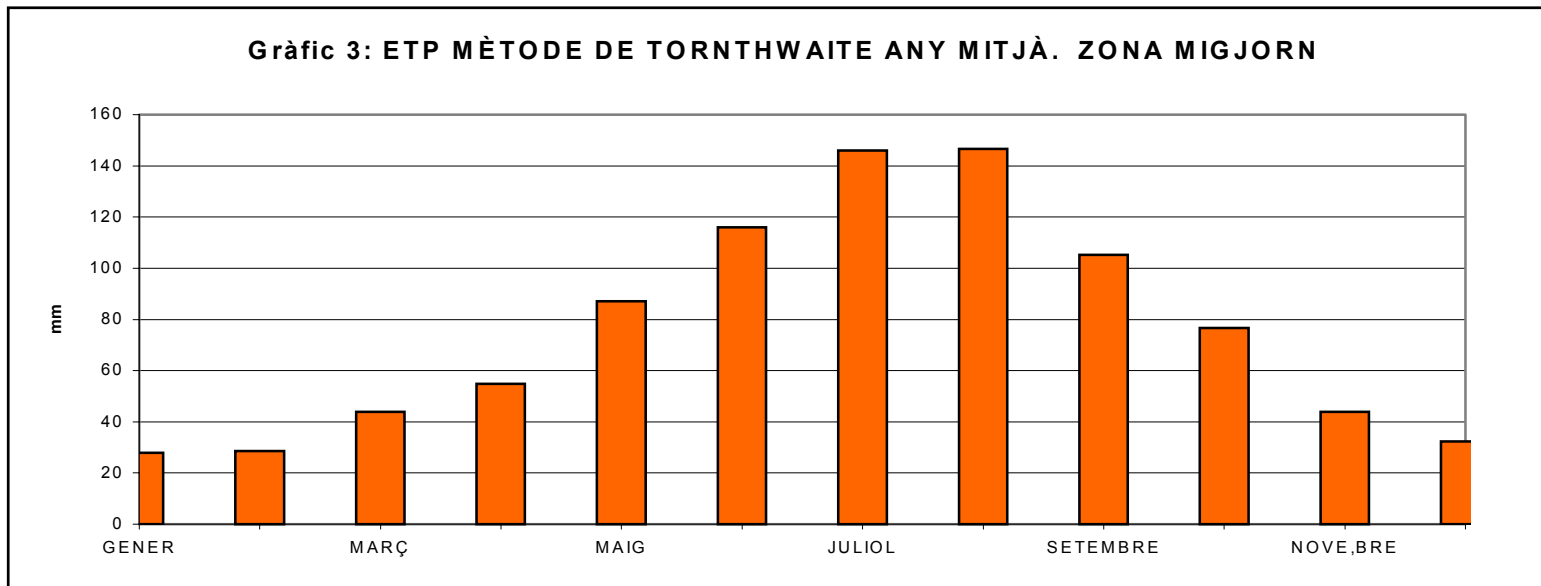
Taula 3: ETP mensual per a l'any mig. Mètode de Thornthwaite

Al gràfic 3 podem observar l'ETP per als valors mensuals mitjans del període 1984-2002

Pel que fa a l'evolució anual de l'ETP en aquest període, calculada amb aquest mateix mètode veiem que els valors mitjans es mouen entre els 810 i els 930 mm anuals, essent el màxim l'any 1994 (928mm) i, el mínim, l'any 1984 (814 mm). El valor d'ETP anual mitjà és de 877,7 mm. Al gràfic 4 podem observar l'ETP anual Thornthwaite 1984-2002 per a la mitjana d'estacions de Menorca i l'ETP mitjana per al període.



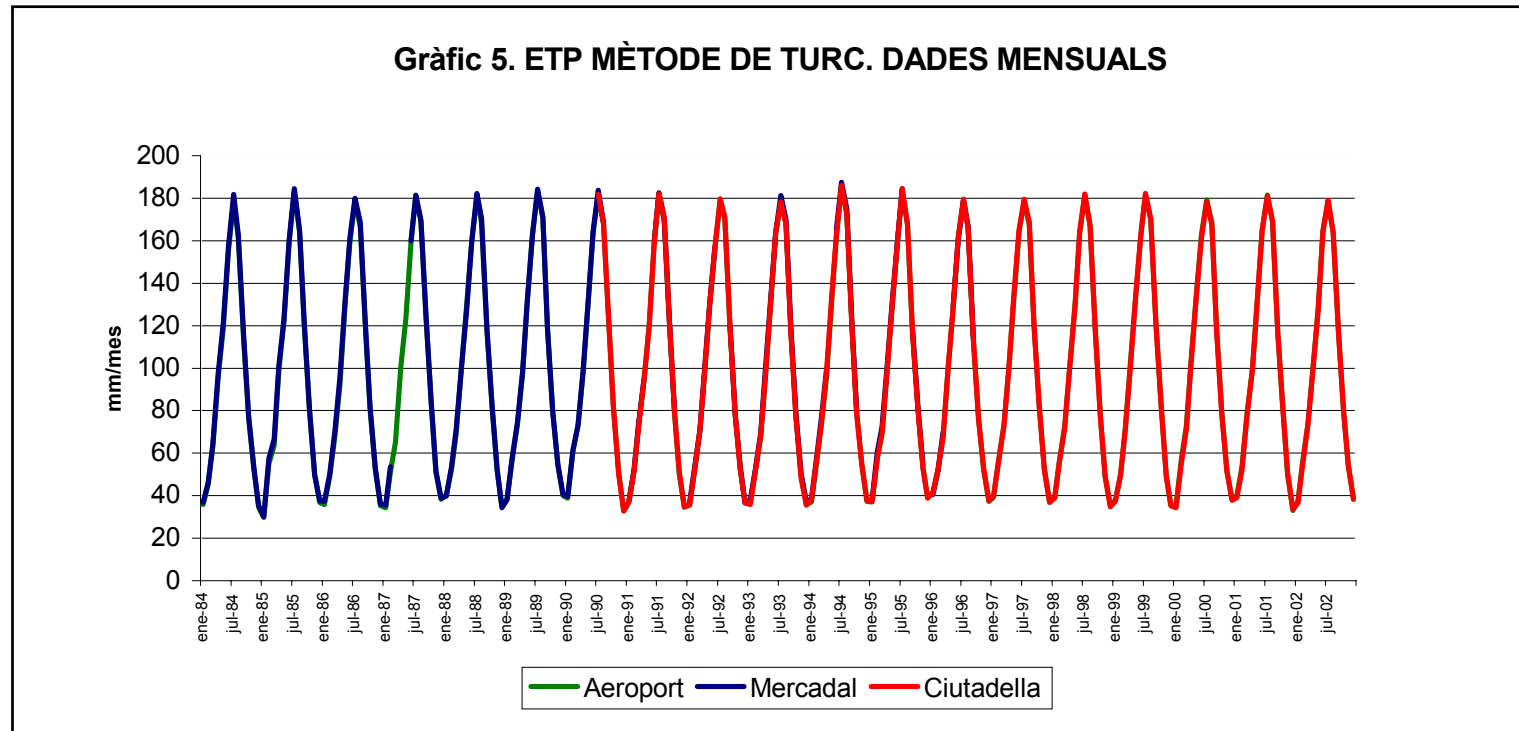




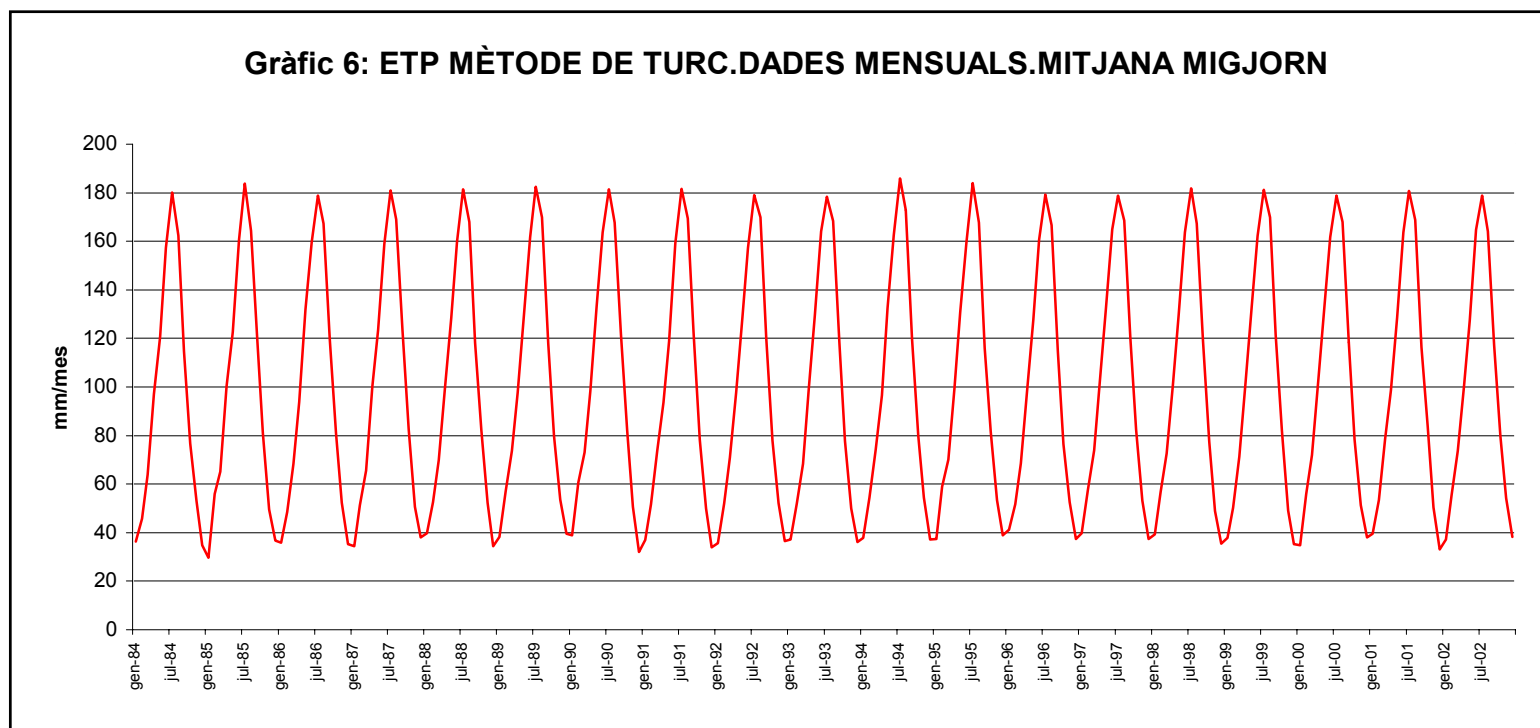
#### 4.2. Mètode de Turc

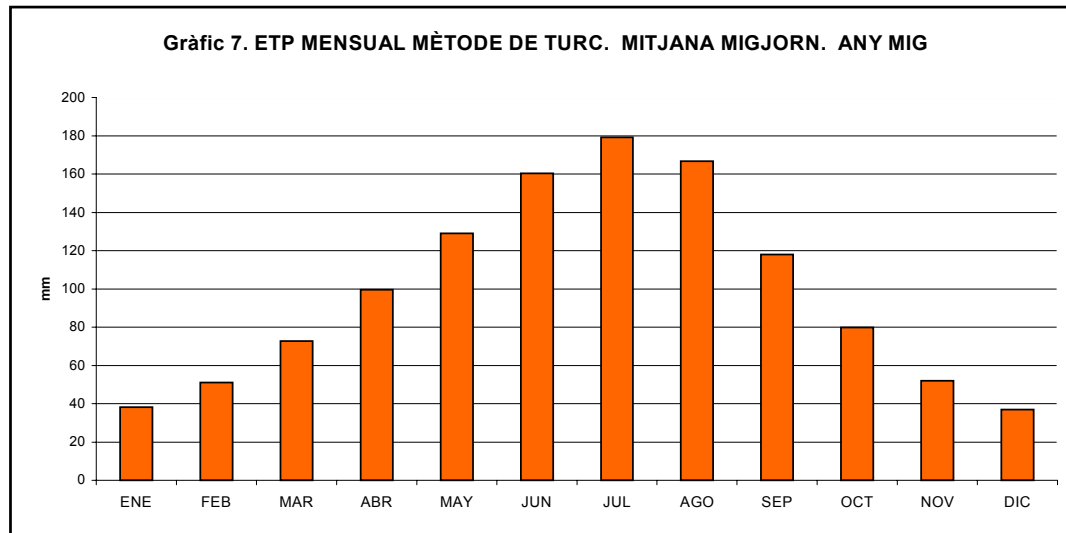
També es tracta d'un mètode empíric. En aquest cas, es té en compte la temperatura i la radiació global mitjana incident mensual i la humitat relativa, quan és menor del 50%, introdueix un factor de correcció.

Al gràfic 5 podem observar l'ETP mensual segons mètode de Turc per al període 1984-2002



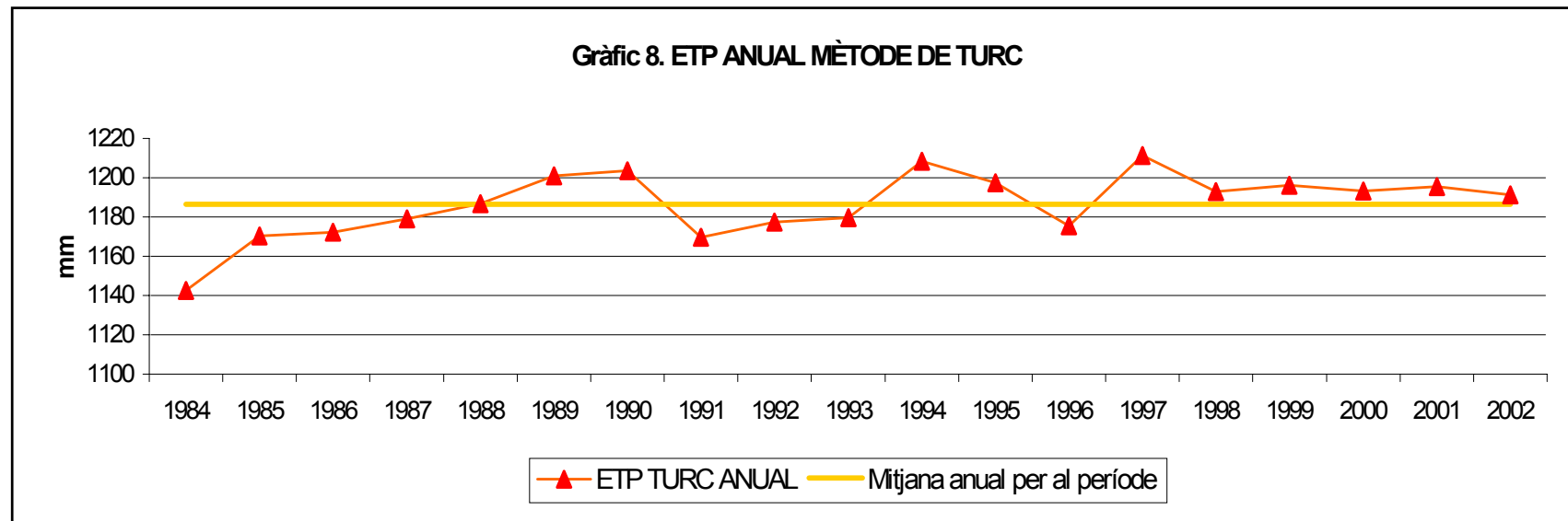
Si observem els valors d'ETP mensual segons el mètode de Turc per al període sencer, veiem que tenim els mateixos valors per a les tres estacions estudiades. Això es deu al fet que estan situades a la mateixa latitud i, per tant, la radiació global incident és la mateixa per a les tres, alhora que, també s'ha considerat la mateixa humitat relativa per a les tres perquè només es tenen mesures de l'estació de l'aeroport de Menorca, l'única estació completa de l'illa. Així doncs, analitzarem els valors de l'ETP mitjana a tota la zona de Migjorn. Trobem un màxim de 186 mm al juliol del 1994 i un mínim de 30 mm al gener del 1985 (gràfic 6).





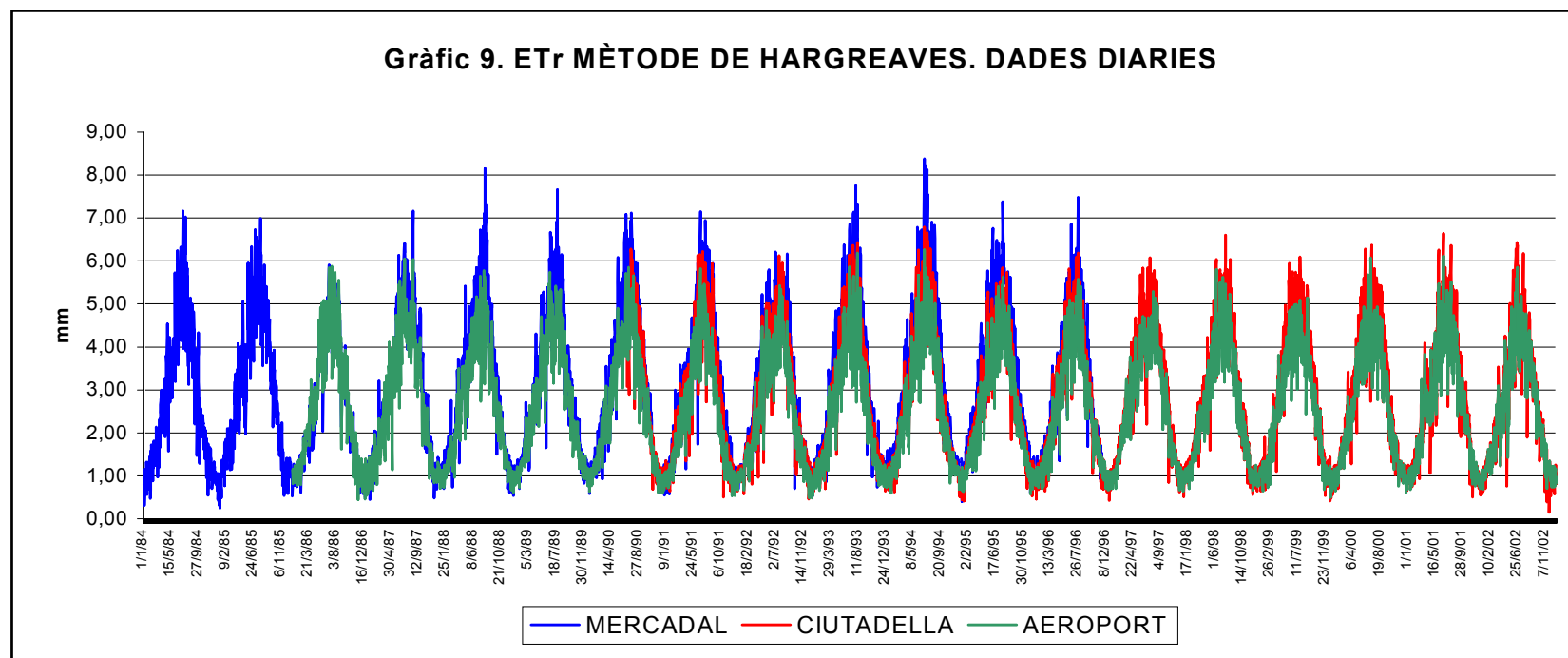
Quant a l'ETP mensual segons Turc per a l'any mitjà, veiem que els valors es troben entre els 37 mm del desembre i els 179 mm del juliol. (gràfic 7)

Pel que fa a l'ETP anual, podem observar un màxim de 1211 mm l'any 1997 i un mínim de 1143 mm l'any 1984. El valor d'ETP anual mitjà és de 1184 mm (Gràfic 8)

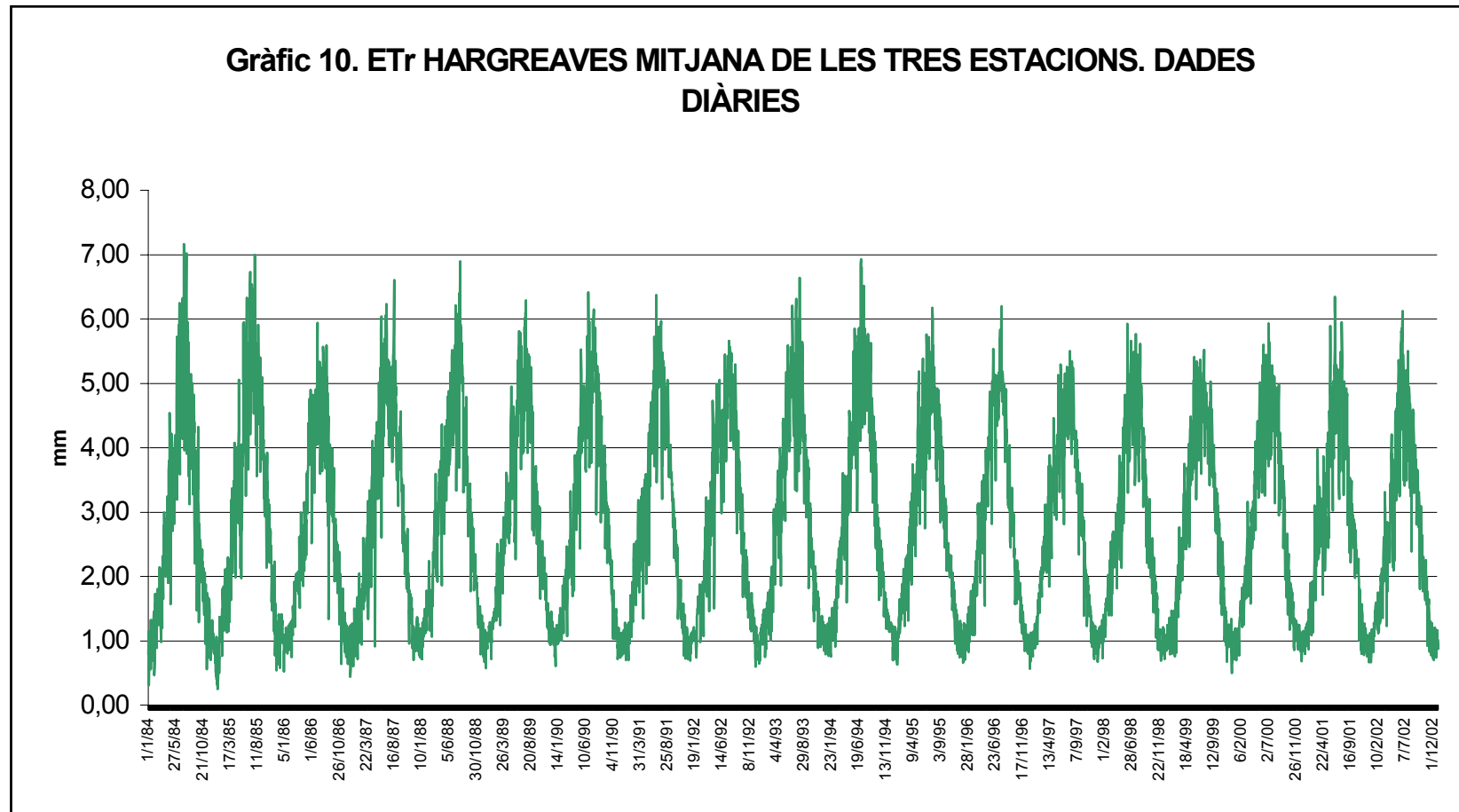


### 4.3. Mètode de Hargreaves

Es tracta d'un altre mètode empíric basat en la temperatura mitjana i, en el qual, a més, també es té en compte la humitat relativa de l'aire. Aquest mètode ha estat elaborat a través de càlculs amb dades diàries. Podem observar el gràfic per a les tres estacions i veiem que no hi ha grans diferències entre els valors d'ETP de cadascuna d'elles, la qual cosa és bastant previsible ateses les petites dimensions de Menorca, la localització de les diferents estacions a la mateixa latitud i la falta de dades d'humitat relativa a les diferents estacions de l'illa. Tot i així, es donen valors lleugerament més elevats a l'estació des Mercadal, a la qual segueixen la de Ciutadella i la de l'aeroport respectivament (gràfic 9)



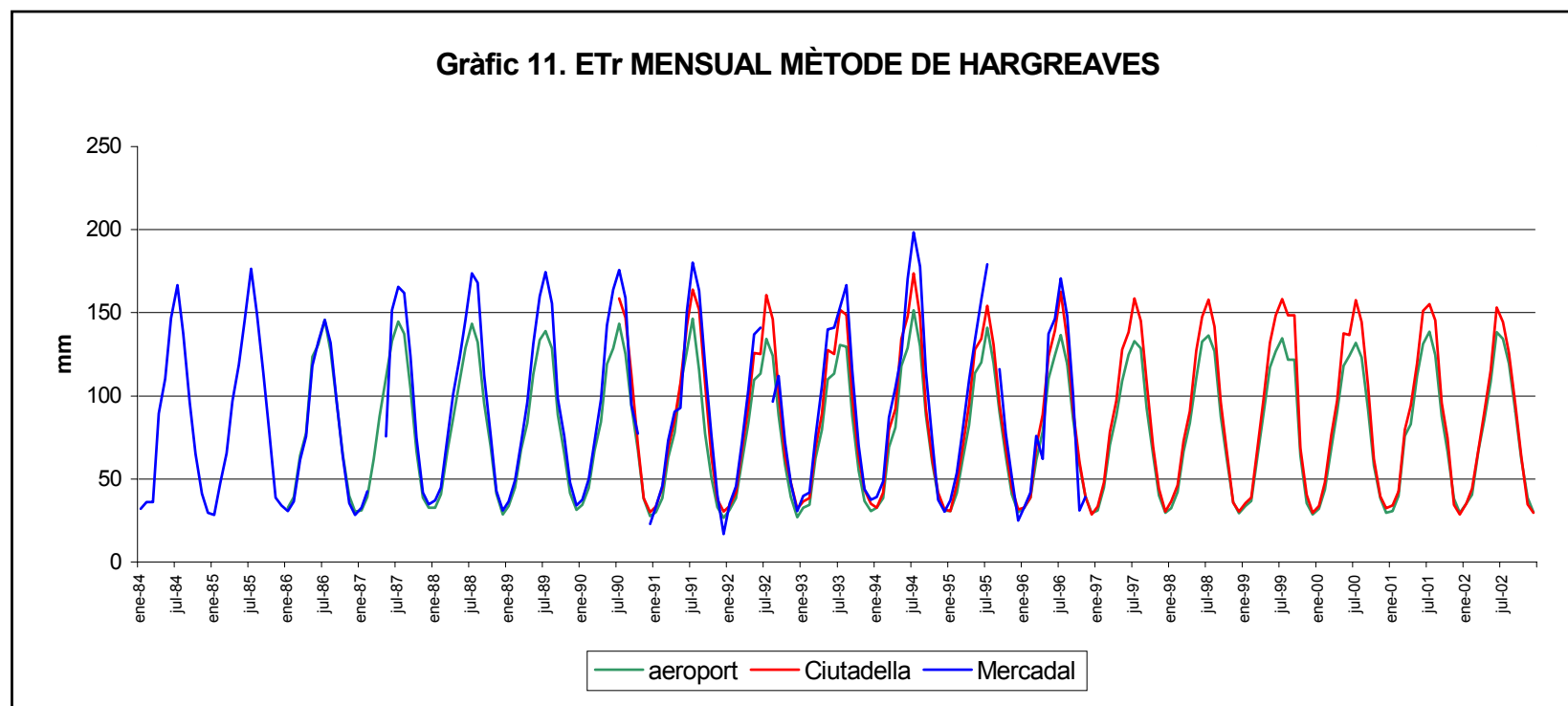
Si ens fixem en la mitjana de les tres estacions per al Migjorn, els valors d'ETr diaris estan compresos entre els 0,25 mm que podem trobar el gener de 1985 i els 7,17 mm diaris del juliol de 1984. Els valors mitjans diaris per a tot el període són de 2,83 mm. El gràfic 10 mostra l'ETr diària segons el mètode de Hargreaves per a la mitjana de les estacions de Migjorn

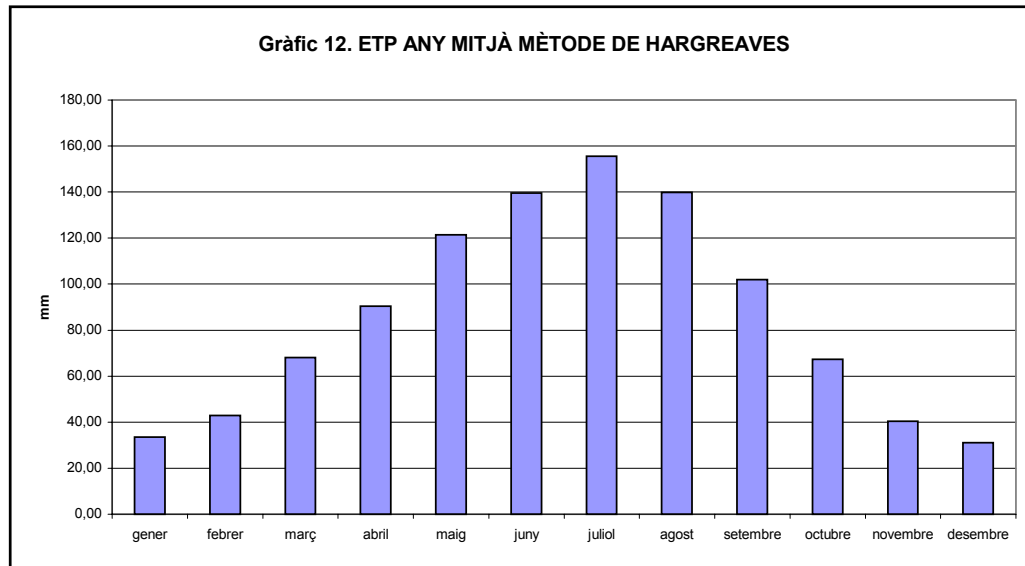


A partir dels valors diaris calculats amb aquest mètode, obtenim, per addició, valors mensuals per tal de comparar amb altres mètodes que han estat elaborats per a càlculs amb dades mensuals.

En el cas de l'ETP mitjana per a les tres estacions estudiades, veiem que els valors estan entre el mínim de 28,28 mm el mes de gener de 1985 i el màxim de 176,39 mm el mes de juliol del mateix any. Els valors mensuals mitjans són de 85,99 mm per al període sencer.

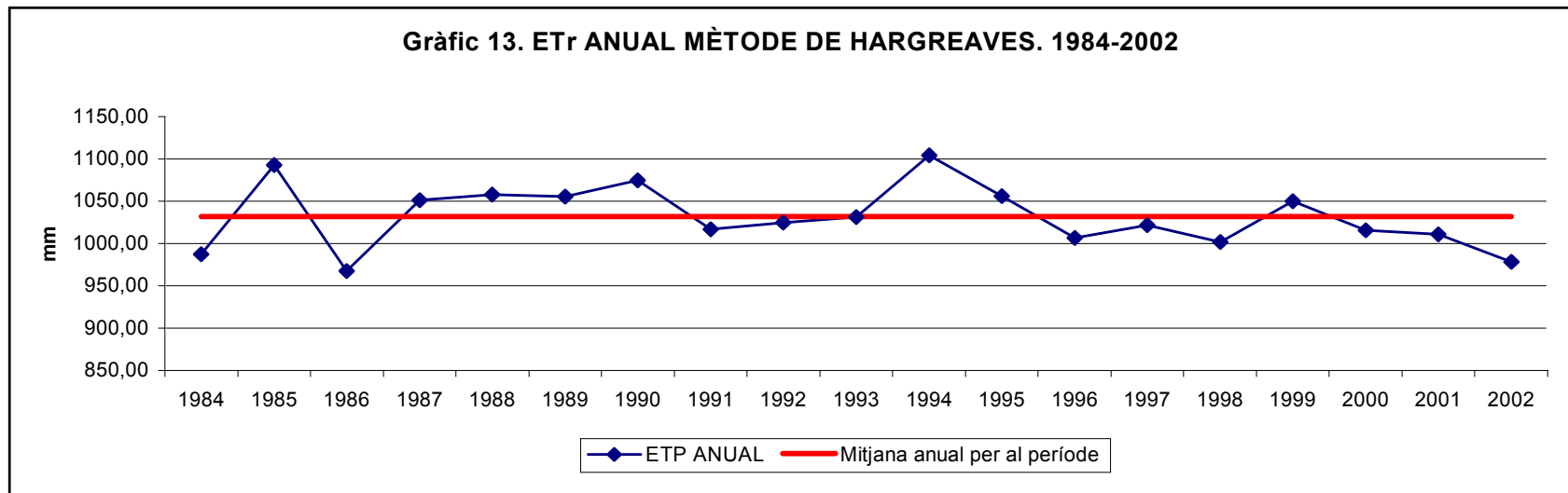
Si observem el gràfic 11, que fa referència a les tres estacions per separat, trobem valors d'ETr molt propers, però, tal com hem esmentat anteriorment, els valors des Mercadal són els més elevats, seguits dels de Ciutadella i l'aeroport.





El Gràfic 12 mostra l'evolució mensual de l'ETP al llarg de l'any mitjà del període estudiat. Observem un màxim el mes de juliol, de 155,58 mm, i un mínim, el desembre, de 30,99 mm.

Quant a l'evolució de l'ETP anual per a tot el període, trobem un màxim, l'any 1994, de 1.103,99 mm i un mínim, l'any 1986, de 967,38 mm. L'ETP mitjana anual en el període estudiat és de 1.031,82 mm (gràfic 13).





#### **4.4. Mètode de Penman –Monteith**

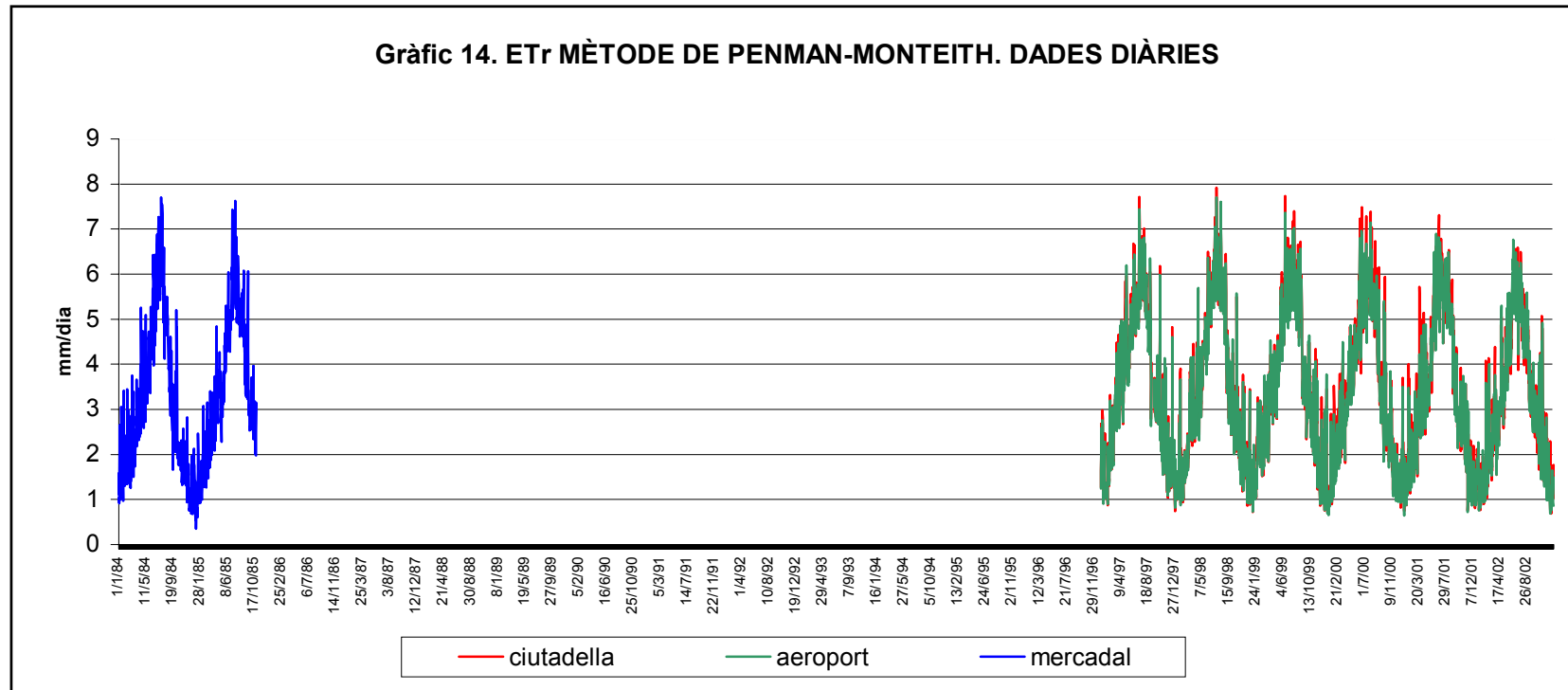
És un mètode semiempíric, o també anomenat combinat, perquè barreja diferents conceptes en els quals es basen els mètodes teòrics: balanç d'energia, perfils d'humitat i velocitat del vent. Es tractaria d'un balanç d'energia més un component aerodinàmic.

Per fer els càlculs amb el mètode de Penman-Monteith calen les dades de temperatura màxima, mínima i mitjana, humitat relativa i velocitat mitjana del vent. Aquestes dades es recullen a les estacions meteorològiques completes i, en el nostre cas, només n'hi ha una, l'estació meteorològica de l'aeroport de Menorca. De tota manera, també hem considerat les altres dues estacions emprades en tots els altres mètodes, ubicades, una a la zona centre de l'illa (estació des Mercadal-s'arada) i, l'altra a la zona de ponent (Ciutadella-Port). D'aquestes últimes hem emprat les dades de temperatura i de precipitació, mentre que, les de vent i humitat relativa corresponen a l'estació de l'aeroport. En qualsevol cas, pel que fa a la velocitat mitjana del vent, segons el mapa eòlic de Menorca (GESA, 1988), les tres estacions meteorològiques estudiades correspondrien a la mateixa franja de velocitat anual mitjana.

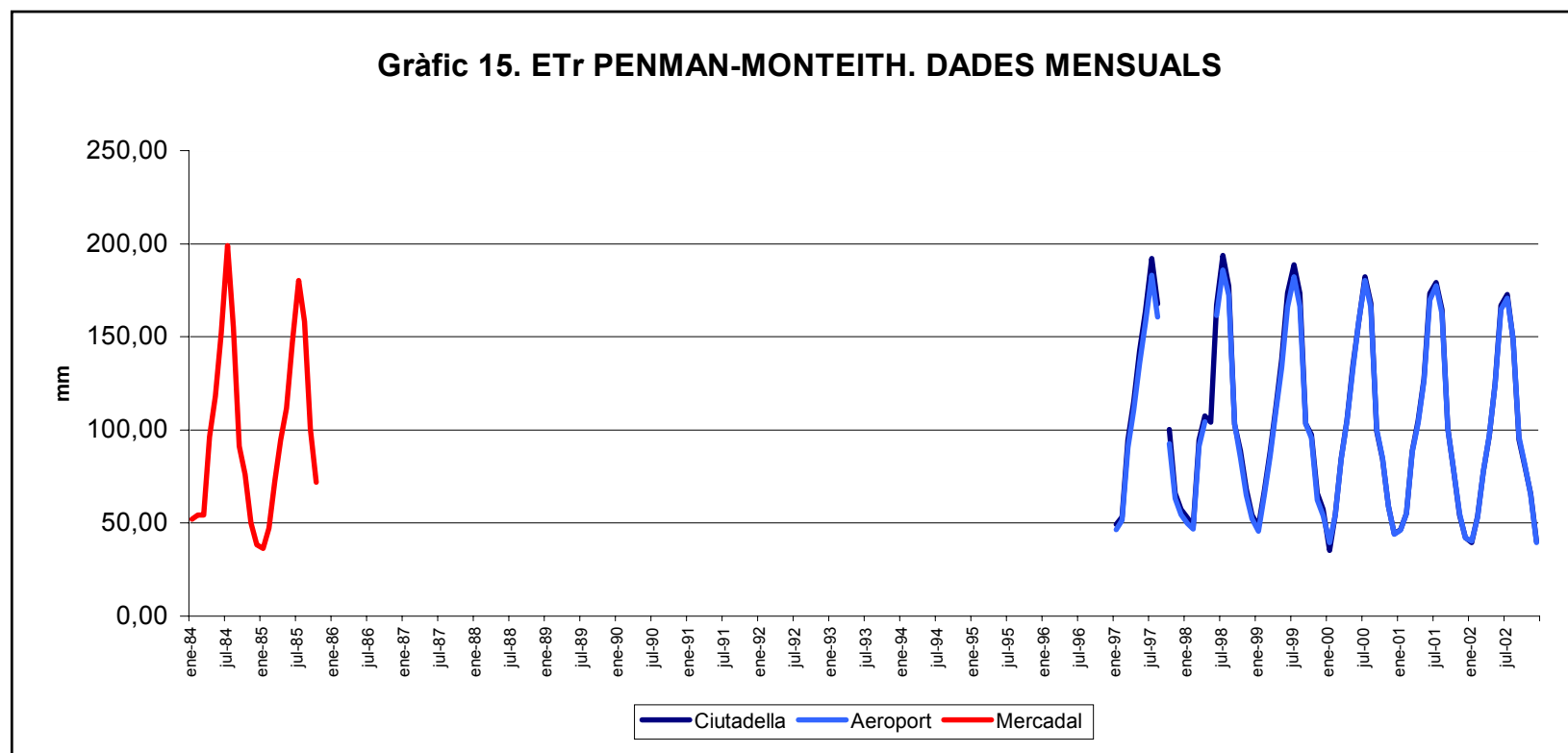
Pel que fa al període d'estudi, queda limitat a aquells períodes en què existeix informació relativa a la velocitat mitjana del vent, i, segons l'Institut Nacional de Meteorologia, només existeixen dades corresponents a l'any 1984 i 1985 i, posteriorment, des de desembre de 1999 fins a l'actualitat. Hem pogut complementar aquestes dades amb velocitats mitjanes de vent mesurades amb els anemòmetres de Milà (dades del 97 a l'actualitat), que estan situats a una altura de 20 m, mentre que els de l'aeroport estan a 10 m, fent les transformacions necessàries per estimar, en ambdós casos, la velocitat a una altura de 2 m, que és la que interessa per realitzar els càlculs segons Penman.

Un cop analitzats els gràfics, veiem com els casos de Ciutadella i l'aeroport són molt semblants pel fet que l'estació meteorològica de Ciutadella no recull dades ni d'humitat ni de velocitat del vent per tant, ens centrarem en l'estació de l'aeroport, d'on provenen les dades i mostrarem a títol informatiu el curt període 1984-1985 corresponent a l'estació des Mercadal.

Com en els casos anteriors, en primer lloc podem veure, el gràfic relatiu a l'evapotranspiració diària per al període del qual tenim dades disponibles. En aquest cas, com ja hem comentat, només podem mostrar l'estació de l'aeroport durant el període 1997-1999 amb dades de vent procedents de Milà i, 2000-2002 amb dades de vent procedents de l'aeroport. Pel que fa a l'estació des Mercadal podem mostrar els càlculs per als anys 1984 i 1985 amb dades de vent procedents de l'estació de l'aeroport (gràfic 14).

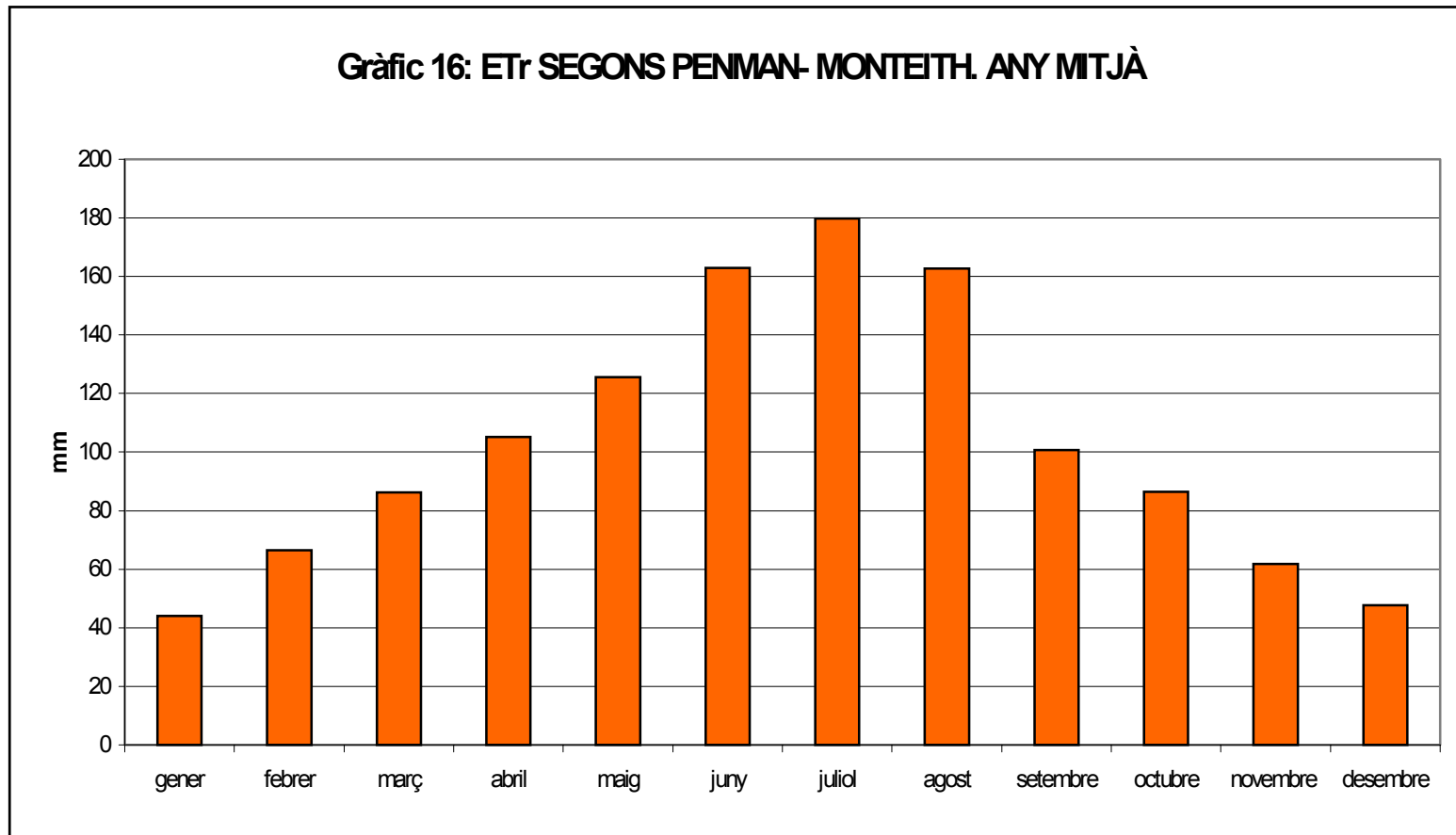


En el cas de l'aeroport, el valor màxim correspon al 15 de juliol de 1998, amb una ETr de 7,7 mm i, el mínim, al 14 de gener de 2000, amb una ETr de 0,47 mm. L'ETr mitjana diària per a tot el període és de 3,38 mm. Per a l'estació des Mercadal el màxim correspon a 7,7 mm el 24 de juliol de 1984 i, el mínim, a 0,34 mm, el 8 de gener de 1985, mentre que la mitjana és de 3,28 mm. Per últim, pel que fa a Ciutadella, el màxim és de 8,15 mm el 15 de juliol de 1998 i, el mínim, de 0,45 mm, el 14 de gener de 2000, i la mitjana, de 3,45 mm.

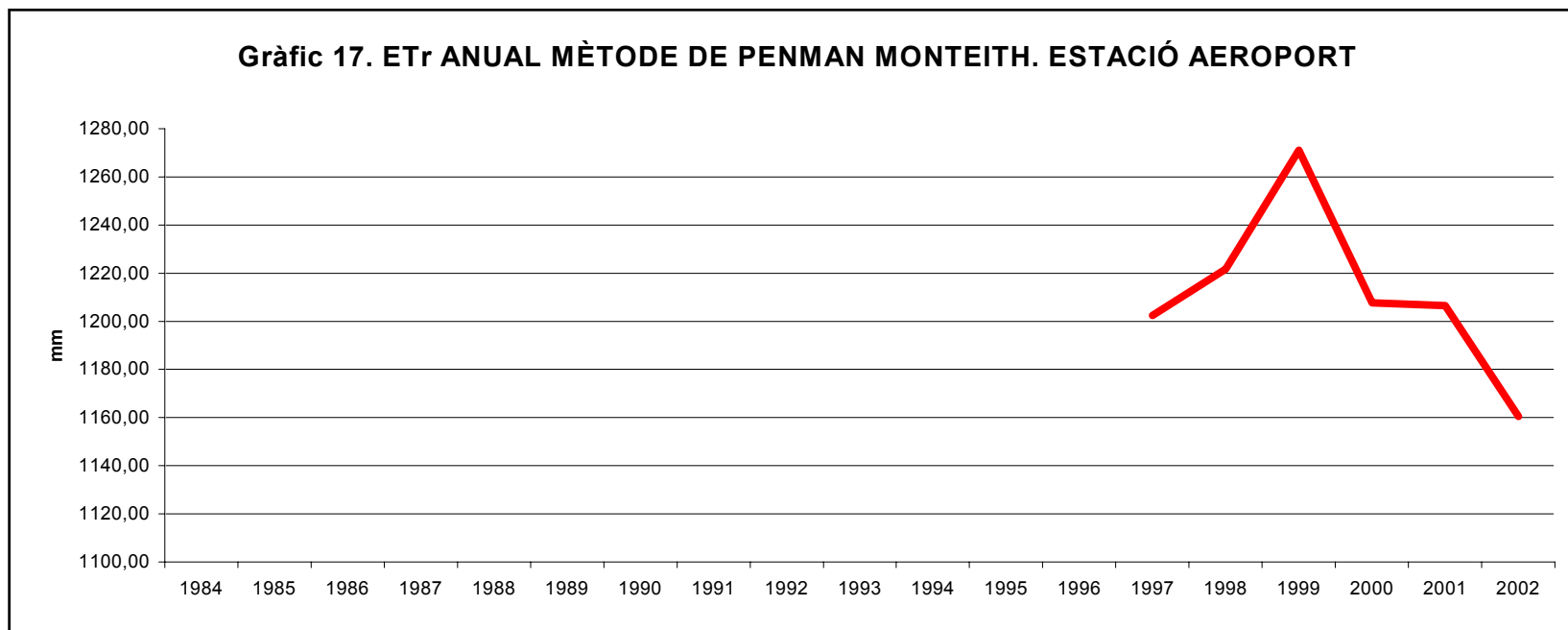


Si analitzem els valors mensuals, obtenim la gràfica 15, on veiem que el valor màxim és de 199,15 mm i correspon al juliol de 1984 i el valor mínim el gener del 2000 de 35,37 mm.

Si observem el gràfic 16, veiem l'evolució mensual de l'ETP l'any mitjà corresponent al període 1984-2002. El màxim es produeix el mes de juliol, amb una ETr de 179,90 mm, i el mínim, el gener, amb 44,02 mm.



Pel que fa als valors anuals al llarg de període, el màxim és de 1272 mm al 1999 i, el mínim, el 2002 de 1.197,8mm. El valor mitjà seria de 1.223,28 mm anuals (gràfic 17).



## 5. COMPARACIÓ DELS DIVERSOS MÈTODES

El quadre 4 mostra els valors màxims, mínims i mitjans de l'evapotranspiració segons els diversos mètodes aplicats. Podem comprovar que els valors més elevats d'evapotranspiració potencial són els calculats amb el mètode de Penman-Montheith, seguits dels resultats obtinguts amb els mètodes de Turc i Hargreaves i, per últim, els valors més baixos corresponen als resultats obtinguts amb el mètode de Thornthwaite. Així, segons els càlculs realitzats seguint les diferents metodologies, podríem acotar, pel que fa al període d'estudi analitzat, l'evapotranspiració potencial o de referència anual mitjana de Menorca entre els 878 i els 1212 mm anuals, en front de les mitjanes anuals de pluviometria entorn dels 500-600 mm anuals.

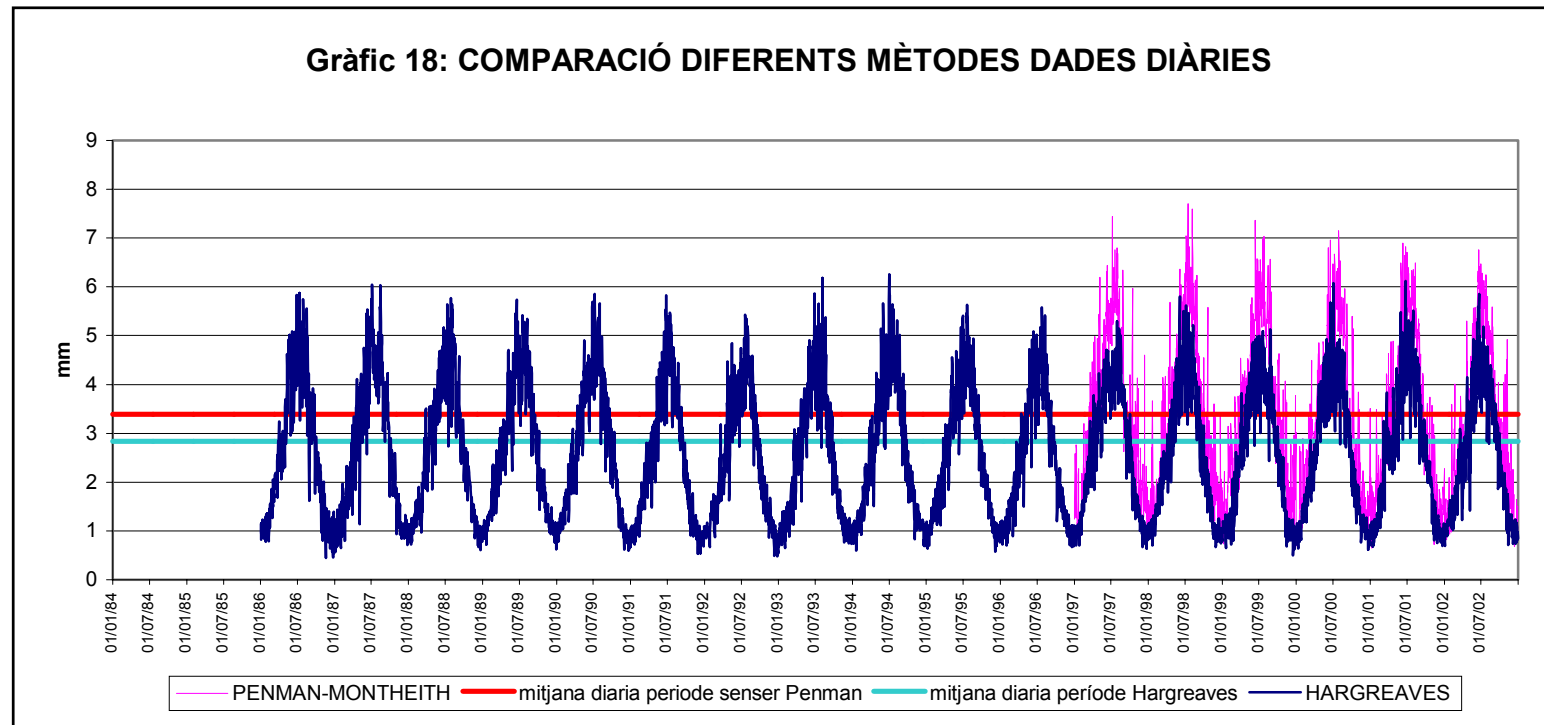
(mm)	ETr diària				ETr mensual				ETr anual			
	Thornt.*	Turc*	Hargre.	Penman	Thornt.	Turc	Hagr <sup>1</sup>	Penma <sup>1</sup>	Thornt.	Turc	Hargre.	Penman
<b>Màxim</b>	-	-	7.17	7.85	174.42	185.84	176.39	192.91	928.20	1211.37	1103.99	1271.08
<b>Mínim</b>	-	-	0.25	0.42	12.73	29.71	28.28	35.86	814.37	1142.60	967.38	1160.42
<b>Mitjana</b>	-	-	2.83	3.37	73.14	98.55	85.99	101.81	878.28	1186.53	1031.82	1211.64

Taula 4. Comparació valors màxims, mínim i mitjans segons les diverses metodologies.

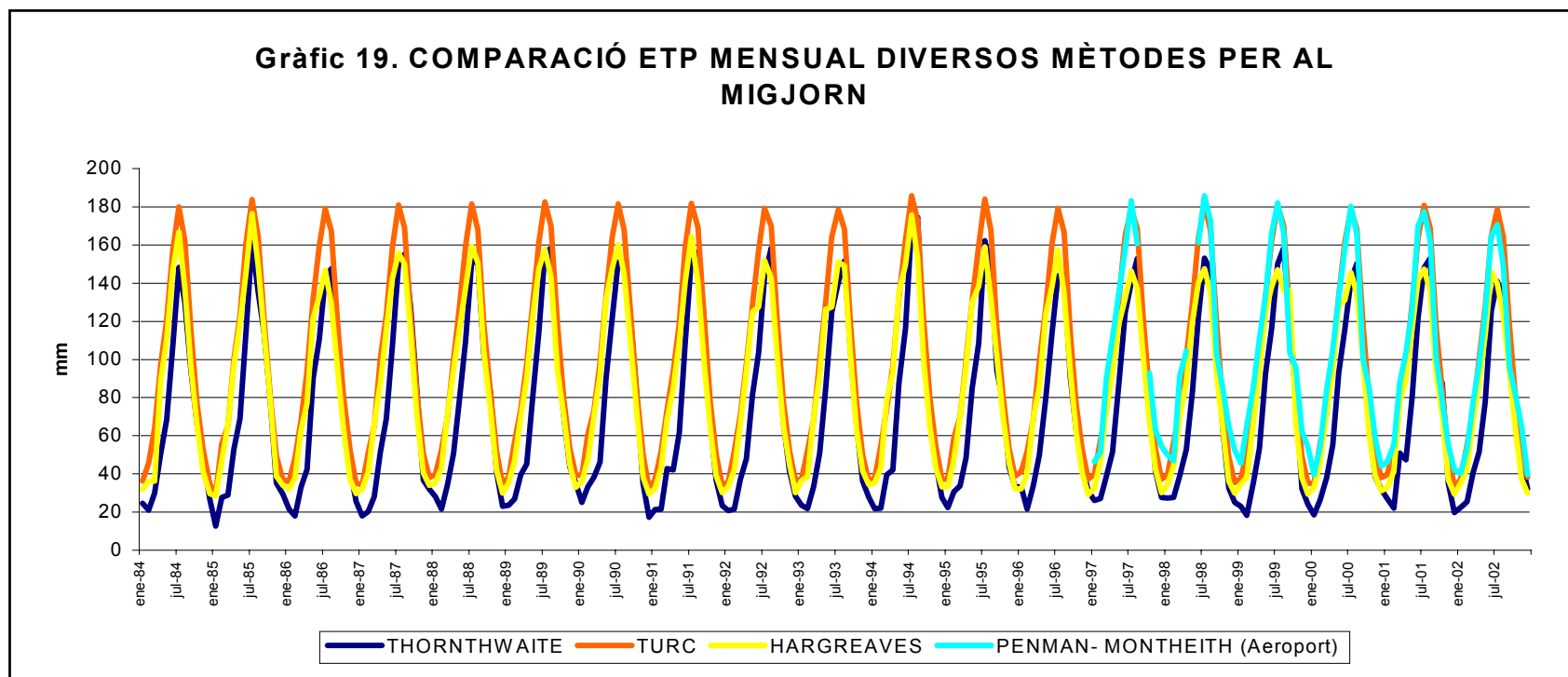
\* mètodes no dissenyats per al càlcul amb dades diàries

<sup>1</sup> valors obtinguts amb la suma dels 30 o 31 dies d'ETr diària

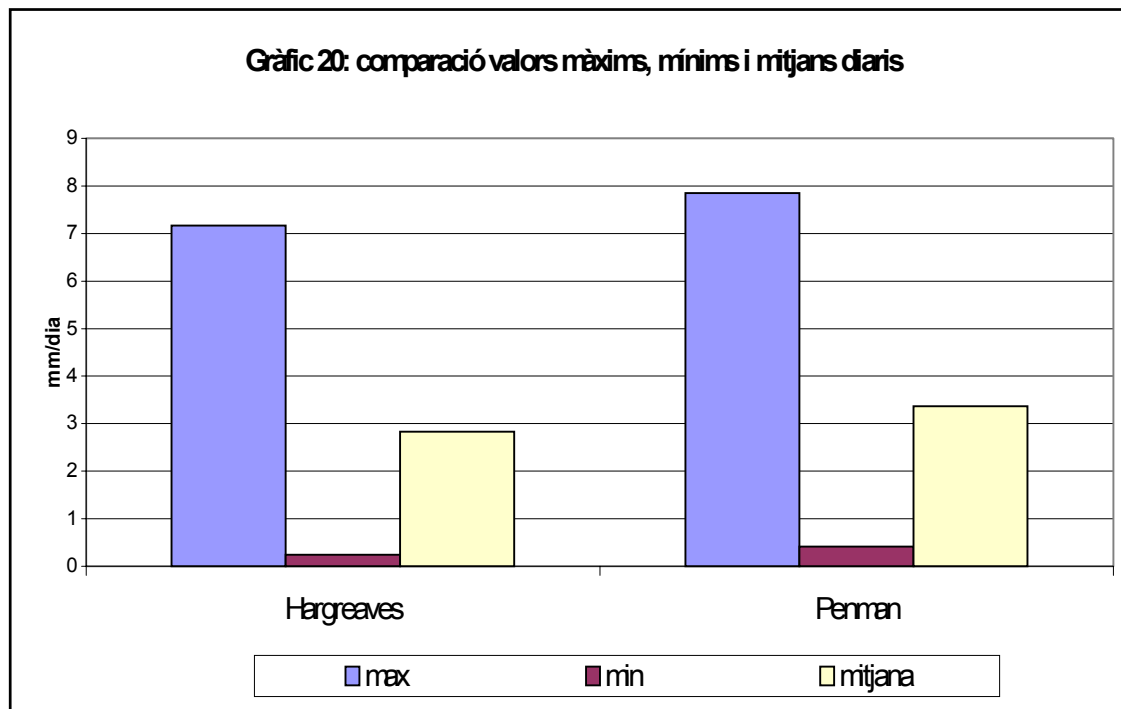
Per tal de comparar gràficament els resultats obtinguts segons el mètode emprat podem observar els gràfics 18 a 22.



El gràfic 18 mostra els valors d'evapotranspiració de referència diaris del període de 1984 a 2002 per a la mitjana d'estacions estudiades (es Mercadal, aeroport i Ciutadella) i per als diversos mètodes emprats. Podem observar com els valors obtinguts a través del mètode de Penman-Montheith són lleugerament superiors als obtinguts amb el mètode de Hargreaves i que la mitjana diària per a tot el període és 0,5 mm superior emprant el mètode de Penman. De tota manera, es pot observar que els valors corresponents a ambdós mètodes segueixen la mateixa tendència al llarg del període d'estudi. Pel que fa als mètodes de Thornthwaite i de Turc han estat elaborats per al càlcul de valors d'ETP mensuals, amb dades de temperatures mensuals, i no per a dades diàries, per la qual cosa, amb aquests mètodes podríem calcular valors d'ETP mitjana mensual, és a dir, tots els dies del mes tindrien el mateix valor d'ETP.



Pel que fa als valors mensuals, amb els quals afegim les metodologies de Turc i de Thornthwaite, podem observar, per una banda, com els superiors corresponen als obtinguts mitjançant Penman-Montheith i Turc, que són molt semblants, i, per altra banda, que les ETP de Thornthwaite i Hargreaves també són molt semblants entre elles i inferiors a les anteriors. Els valors més baixos corresponen al mètode de Hargreaves, però s'ha de tenir en compte que amb el de Thornthwaite obtenim uns valors mínims periòdics inferiors als hiverns i que, per tant, en el moment de sumar tots els mesos per obtenir l'ETP anual, és inferior en el cas de Thornthwaite. Amb tots els mètodes l'ETP segueix tendències semblants al llarg del període (gràfic 19).

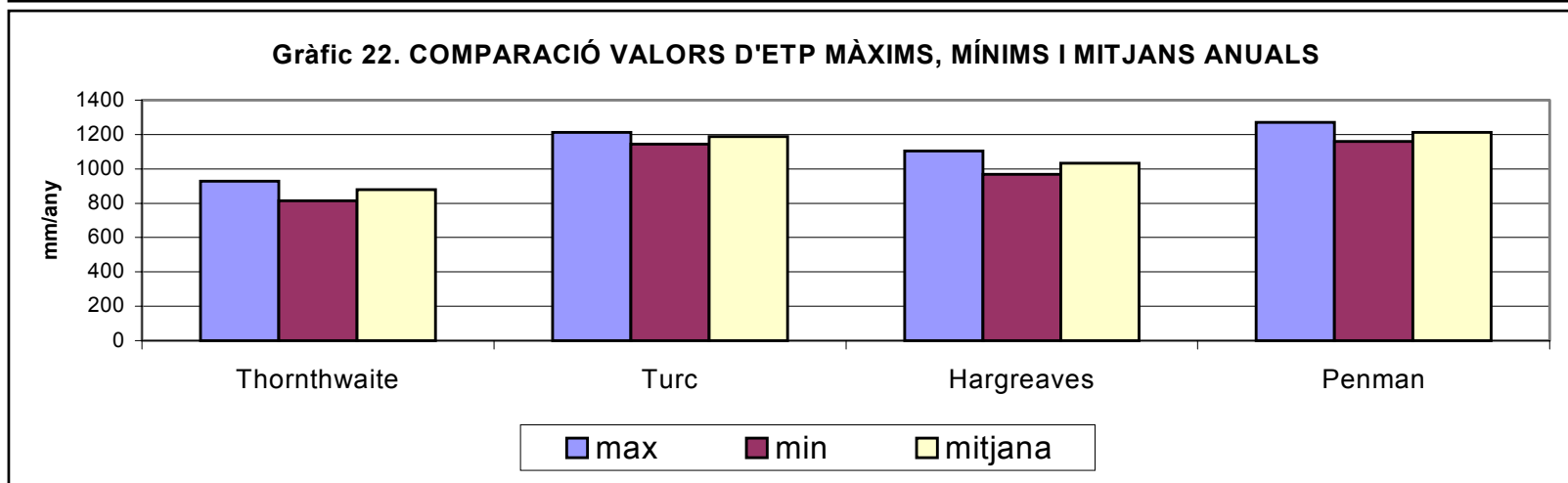
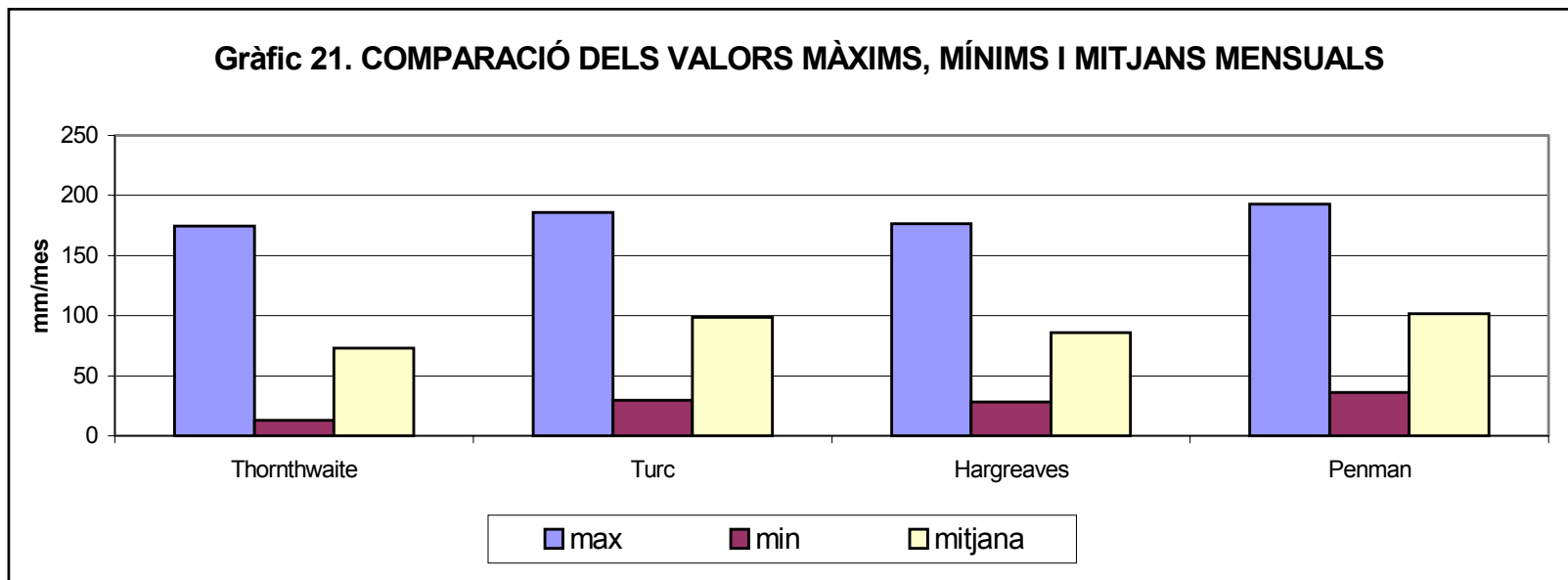


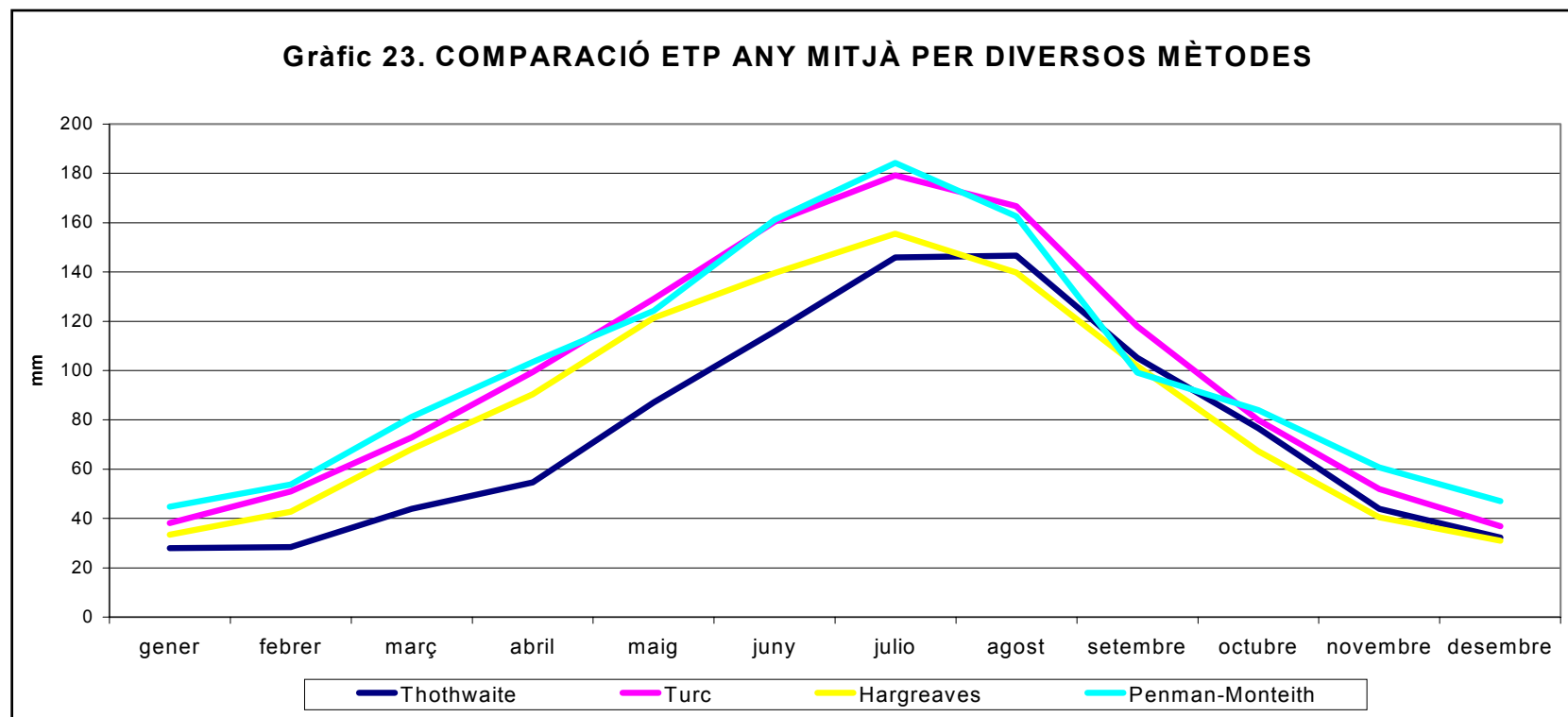
Els gràfics 20, 21 i 22 mostren la comparació dels valors màxims, mínims i mitjans per a tot el període segons les diverses metodologies i comparen les mitjanes diàries, mensuals i anuals respectivament (valors corresponents al quadre 4).

Si calculem els valors mitjans mensuals de tot el període, obtenim els gràfics corresponents a l'any mitjà per a les diferents metodologies (gràfic 23). Veiem que Turc i Penman-Monteith tenen valors molt semblants, com també és molt semblant la seva distribució al llarg de l'any. Quant a Hargreaves, els valors de l'època estival són lleugerament inferiors als dels mètodes de Turc i Penman, però la resta de l'any té una tendència molt semblant, tot i que continua estant lleugerament per sota dels altres dos mètodes. Finalment, el mètode de Thornthwaite és el que dona valors més baixos. Acceptant el mètode de Penman-Monteith com el que possiblement s'ajusti més a la realitat, el de Thornthwaite infravalora molt el valor de l'ETP i el que més s'aproxima a Penman és el mètode de Turc.

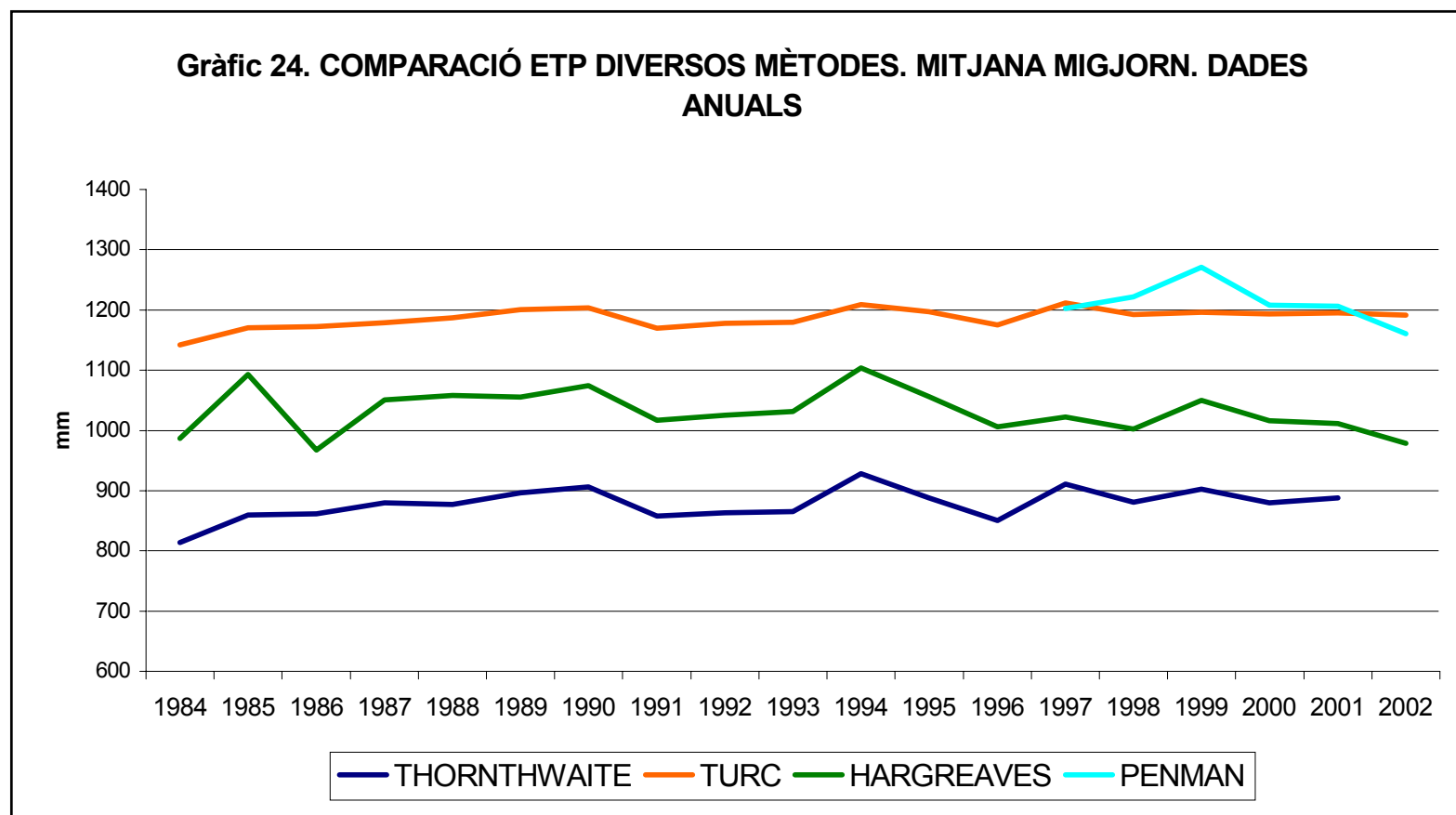
com també és molt semblant la seva distribució al llarg de l'any. Quant a Hargreaves, els valors de l'època estival són lleugerament inferiors als dels mètodes de Turc i Penman, però la resta de l'any té una tendència molt semblant, tot i que continua estant lleugerament per sota dels altres dos mètodes. Finalment, el mètode de Thornthwaite és el que dona valors més baixos. Acceptant el mètode de Penman-Monteith com el que possiblement s'ajusti més a la realitat, el de Thornthwaite infravalora molt el valor de l'ETP i el que més s'aproxima a Penman és el mètode de Turc.







El gràfic 24 mostra l'evolució anual de l'ETP amb els diversos mètodes.



## 6. APROXIMACIÓ DELS DIFERENTS MÈTODES A PENMAN-MONTEITH

Per tal de comprovar quin dels mètodes estudiats s'aproxima més al de Penman-Monteith, estudiarem l'estació de l'aeroport de Menorca, l'única amb dades d'humitat relativa i velocitat del vent.

Mitjançant el programa estadístic SPSS hem comparat els diferents mètodes amb el de Penman-Monteith per a l'estació de l'aeroport de Menorca.

Primer s'ha realitzat l'estudi per a dades diàries, per tant, estudiarem la correlació existent entre el mètode de Hargreaves i Penman-Monteith. Realitzem correlacions bivariades amb SPSS obtenint la següent taula de correlació (quadre 5):

		<b>Hargreaves</b>	<b>Penman</b>
<b>Hargreaves</b>	Correlació de Pearson	1.000	<b>0.893*</b>
	Sig. bilateral		<b>0.000</b>
<b>Penman</b>	Correlació de Pearson	0.893	1.000
	Sig. bilateral	0.000	

*\*significativa a nivell 0,01 (bilateral)*

*quadre 5: correlacions hargreaves-penman*

Veiem que la correlació és significativa a nivell 0,01 (bilateral) i que el coeficient de significació és de 0.893.

Si realitzem l'autorregressió obtenim les següents variables:

	<b>B</b>	<b>SEB</b>	<b>T-RATIO</b>	<b>APROX.PROB</b>
AR1	0.6226993	0.01705791	36.505023	0.0000000
Hargreaves	0.7750198	0.02295476	33.762920	0.0000000
constant	1.322249	0.07013202	18.924665	0.0000000

*Quadre 6: variables creades pel model regressiu Penman en funció de Hargreaves.*

Per tant, podem escriure Penman en funció de Hargreaves de la següent manera:

$$\text{PENMAN} = 1,322 + 0,775 \text{ HARGREAVES} + 0,623 \text{ AR1}^*$$

*\*funció autoregressiva d'ordre 1*

Observem gràficament la bona aproximació dels valors d'ETP de Penman i els valors aproximats d'ETP de Penman a partir de Hargreaves al gràfic 25.

Pel que fa a les dades mensuals obtenim els resultats següents:

		<i>Hargreaves</i>	<i>Penman</i>	<i>Turc</i>	<i>Thornthwaite</i>
Hargreaves	Correlació de Pearson	1.000	0.972**	0.985**	0.919**
	Sig. Bilateral		0.000	0.000	0.000
	N	72	72	72	72
<b>Penman</b>	<b>Correlació de Pearson</b>	<b>0.972**</b>	1.000	<b>0.985**</b>	<b>0.932**</b>
	<b>Sig. Bilateral</b>	<b>0.000</b>		<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
	<b>N</b>	<b>72</b>	72	<b>72</b>	<b>72</b>
Turc	Correlació de Pearson	0.985**	0.985**	1.000	0.956**
	Sig. Bilateral	0.000	0.000		0.000
	N	72	72	72	72
Thornthwaite	Correlació de Pearson	0.919**	0.932**	0.956**	1.000
	Sig. Bilateral	0.000	0.000	0.000	
	N	72	72	72	72

\*\*la correlació és significativa a nivell de 0,01 bilateral

Quadre 7: correlacions entre els diferents mètodes. Dades mensuals.

El quadre 7 ens mostra que totes les correlacions són significatives. Fixant-nos només en la fila que relaciona el mètode de Penman amb els altres mètodes (en negreta) sembla que la correlació més bona és dona en el mètode de Turc, tal com ja havíem comentat anteriorment, amb un coeficient de correlació de 0.985, seguidament Hargreaves, amb un coeficient de 0.972, i, finalment, Thornthwaite, amb un coeficient de 0.932.

L'autoregressió entre Penman i Turc dona les següents variables creades pel model:

	<i>B</i>	<i>SEB</i>	<i>T-RATIO</i>	<i>APROX.PROB</i>
AR1	0.074115	0.1199253	0.618007	0.53860503
Turc	0.909018	0.0203717	44.621590	0.00000000
Constant	11.523923	2.277183	5.060748	0.00000331

Quadre 8: variables creades pel model autoregressiu Penman en funció de Turc

Per tant, tenim una autoregressió molt significativa; sembla que podem acceptar la funció que relaciona Turc amb Penman de la següent manera:

$$\text{PENMAN} = 11.52 + 0.909 \text{ TURC}$$

Fent el mateix per a Hargreaves, obtenim:

	<i>B</i>	<i>SEB</i>	<i>T-RATIO</i>	<i>APROX.PROB</i>
AR1	0.0298495	0.1192264	0.250360	0.80305321
Hargreaves	1.1689166	0.0348426	33.548517	0.00000000
Constant	9.2039767	3.0794284	2.988859	0.00387714

Quadre 9: variables creades pel model autorregressiu Penman en funció de Hargreaves

També tenim una autoregressió molt significativa, de la qual ajustariem la funció:

$$\text{PENMAN} = 9.20 + 1.17 \text{ HARGREAVES}$$

Finalment, per al mètode de Thornthwaite, obtenim:

	<i>B</i>	<i>SEB</i>	<i>T-RATIO</i>	<i>APROX.PROB</i>
AR1	0.644983	0.1086552	5.936056	0.00000011
Thornthwaite	0.909433	0.0575807	15.794046	0.00000000
Constant	34.058953	5.9321358	5.741432	0.00000023

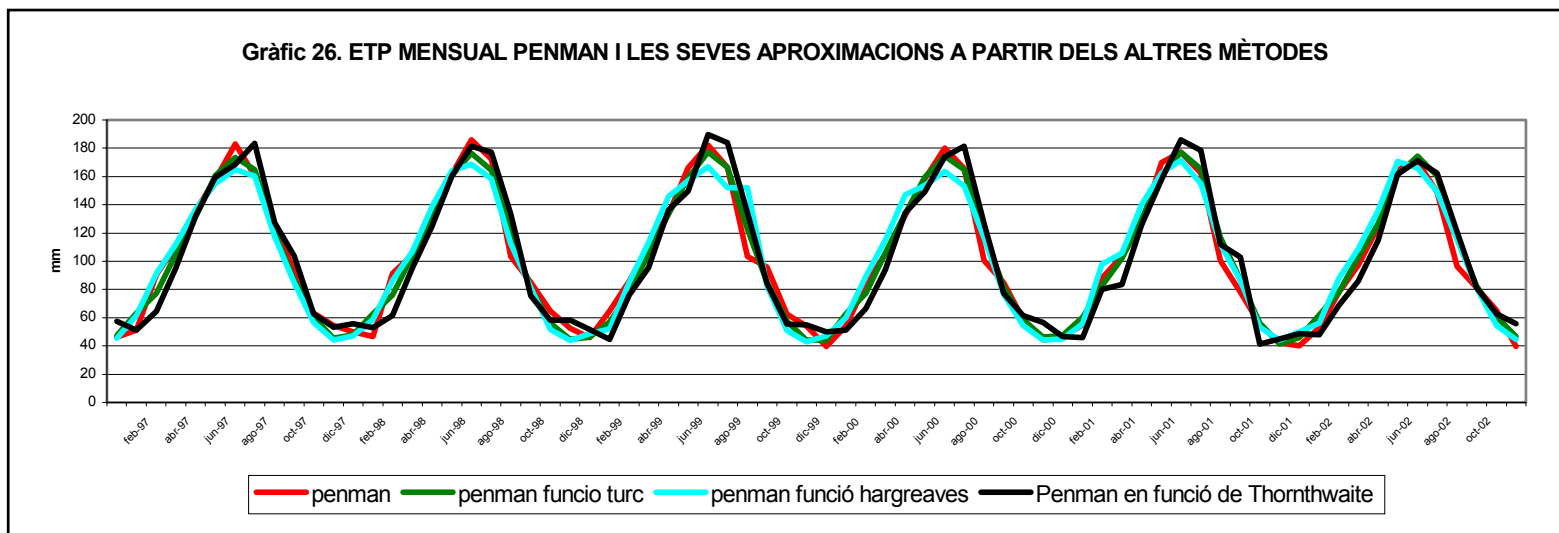
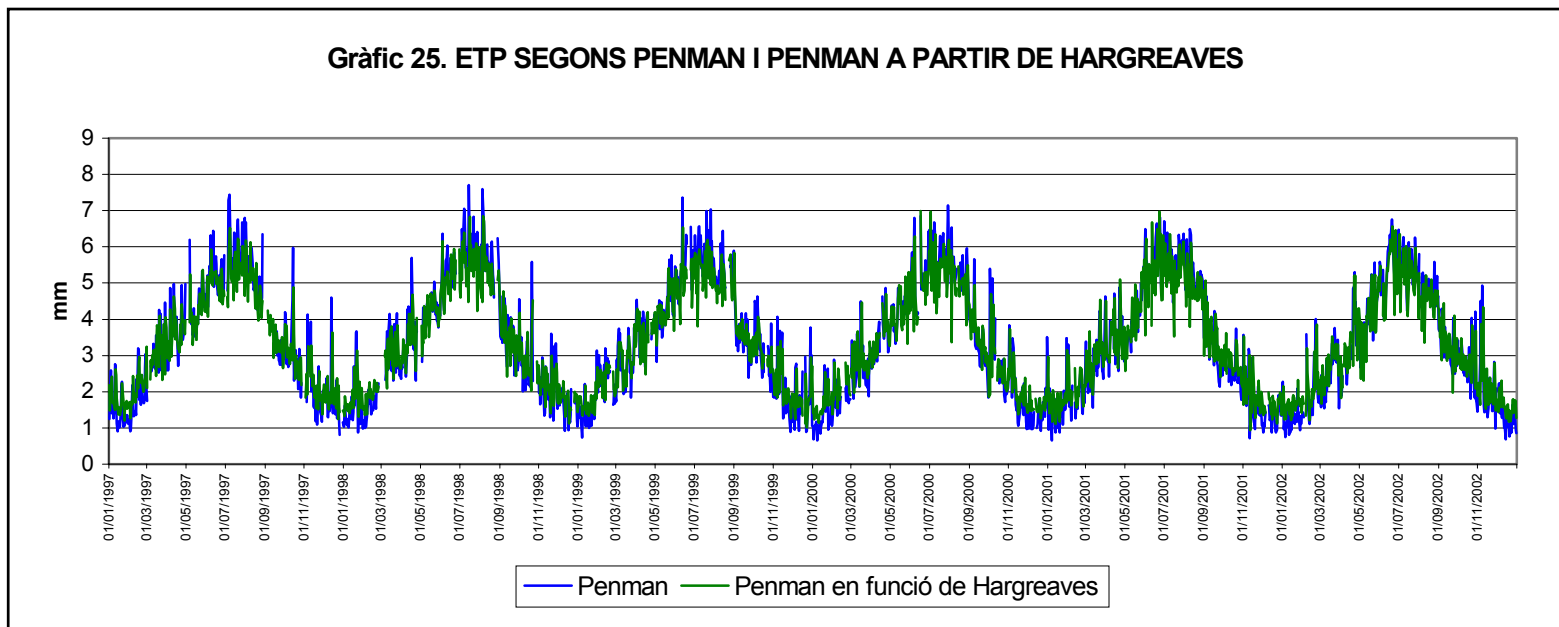
Quadre 10: variables creades pel model autoreggressiu Penman en funció de Thornthwaite.

La funció seria:

$$\text{PENMAN} = 34.06 + 0.91 \text{ THORTHWAITE} + \text{AR1}^*$$

\*funció autorregressiva d'ordre 1

El gràfic 26 mostra l'ETP de Penman-Monteith en comparació de les aproximacions de l'ETP de Penman a partir dels altres mètodes.



Així doncs, per aproximar els valors d'ETP de Menorca, agafarem la funció de Penman a partir de Hargreaves per a dades diàries i, per a les dades mensuals, ho farem a partir de Turc, aconseguint, així, les dades d'ETP per a totes les estacions subjectes a estudi tot i que no siguin completes.

## **7. VALORS D'ETP APROXIMADA AL MÈTODE DE PENMAN A PARTIR DE HARGREAVES I TURC**

Tal com hem anat comentant, el mètode de Penman-Monteith és el reconegut per la FAO i el que millors resultats ha donat en diversos estudis de diferents zones del planeta, per tant, el nostre objectiu és intentar calcular l'ETP de Menorca a través d'aquest mètode. S'ha de tenir en compte, però, que aquest mètode necessita l'existència de dades meteorològiques molt complertes com són la humitat relativa i la velocitat del vent per a periodicitats diàries, raó per la qual només s'ha pogut calcular per a l'estació de l'aeroport de Menorca i per al període de 1997 a 2002. Per tant, per poder aproximar els valors de l'ETP quan manquen aquests tipus de dades o només podem accedir a dades de periodicitat mensual, hem calculat una funció que aproxima aquests valors d'ETP a partir d'altres mètodes en què no són necessàries les dades diàries o les dades que només es poden obtenir en les estacions meteorològiques completes.

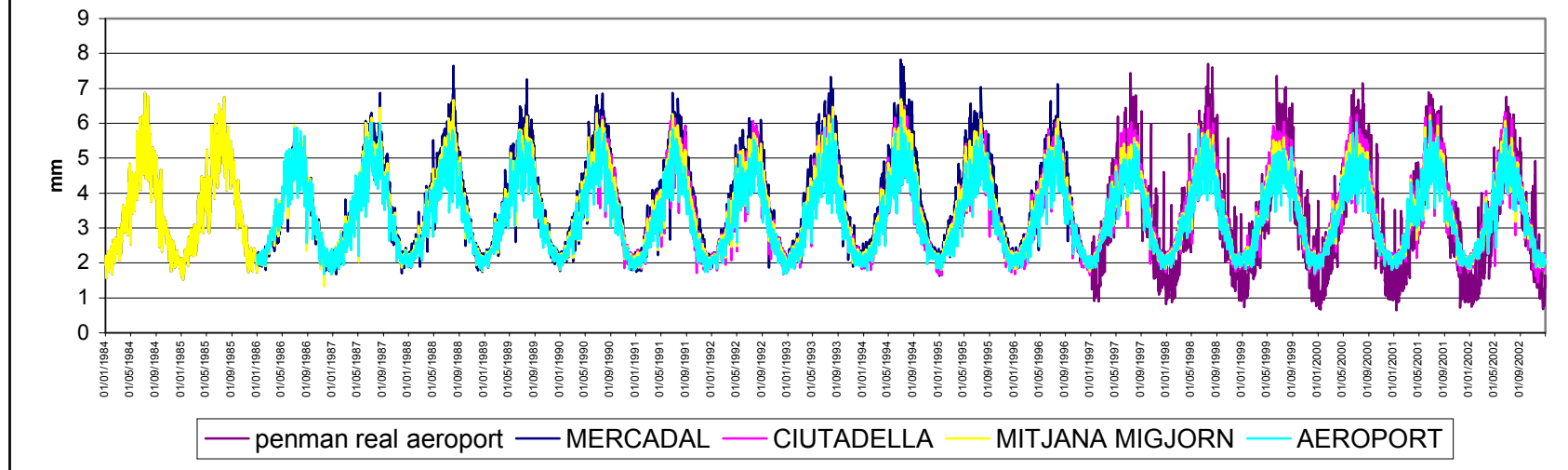
Els valors d'ETP obtinguts per al període 1984-2002 els resumim als quadres que es mostren en els apartats següents, que mostren els valors mitjans mensuals per a l'any mitjà del període d'estudi, en primer lloc, per l'aproximació a Penman a partir del mètode de Hargreaves per a dades diàries, i en segon lloc l'aproximació a partir Turc per a dades mensuals.

### Dades diàries:

Pel que fa a l'aproximació a partir de Hargreaves per a dades diàries, hem vist anteriorment que el mètode de Hargreaves té molt bona aproximació al de Penman, però que la fórmula dona una funció autoregressiva d'ordre 1 que depèn dels valors dels errors entre el valor aproximat i el valor real, per tant, per tal que l'aproximació sigui bona, ens calen els valors reals d'ETP de Penman. Per aquesta raó no tindrem una tan bona aproximació si tractem de fer predicció, la qual cosa és el nostre objectiu, i, per tant, obviem la funció autoregressiva. Els valors predits d'ETP de Penman a partir del mètode de Hargreaves per a les diferents estacions de l'illa i la mitjana d'elles els podem observar al gràfic 27. També podem veure els valors reals d'ETP de Penman de l'estació de l'aeroport. Veiem que els valors reals tenen els màxims i els mínims molt més acusats que no els valors aproximats.



**Gràfic 27. ETP PENMAN APROXIMAT A PARTIR DE HARGREAVES. DADES MENSUALS (1984-2002)**

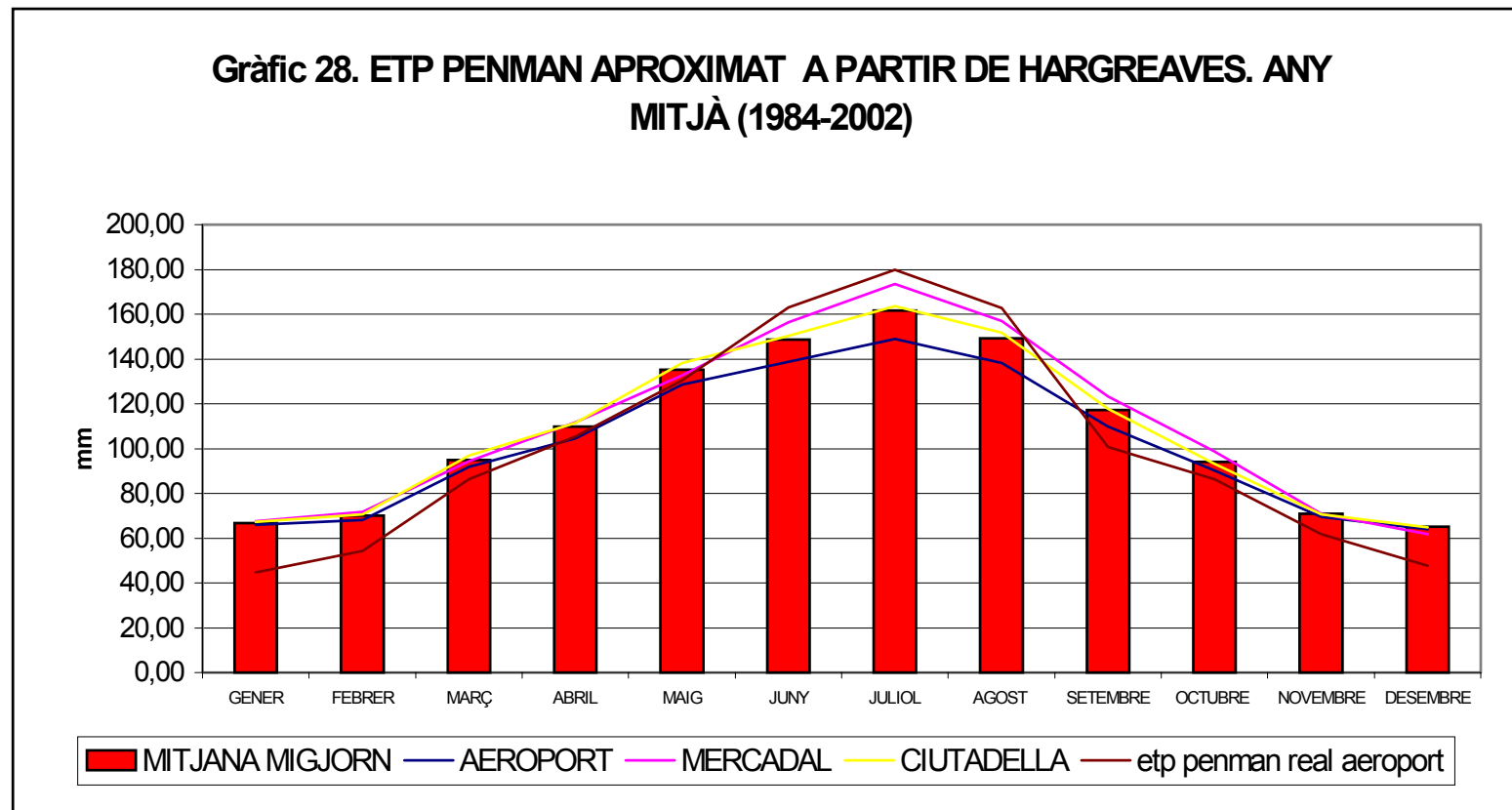


El quadre 11 mostra els valors calculats d'ETP: Les dades mensuals mitjanes i la mitjana anual per a totes les estacions. L'ETP mensual per a tot el període 1984-2002 s'obté sumant les dades diàries de cada mes i l'ETP de l'any mitjà per al mateix període fent la mitjana de cada mes per a tot el període.

<i>Unitats:mm</i>	<i>AEROPORT</i>	<i>MERCADAL</i>	<i>CIUTADELLA</i>	<i>MITJANA MIGJORN</i>
gener	66,03	67,66	67,32	66,87
febrer	68,21	71,71	70,63	70,12
març	91,95	94,38	96,95	94,81
abril	104,53	111,84	111,40	109,76
maig	128,48	132,56	138,33	135,07

juny	138,84	156,36	150,38	148,73
juliol	148,86	173,58	163,64	161,56
agost	138,14	156,90	151,72	149,28
setembre	109,85	123,33	117,67	117,22
octubre	90,08	98,62	93,24	94,08
novembre	69,53	71,03	70,74	71,02
desembre	63,91	61,79	64,86	65,01
anual	1218,42	1319,78	1296,88	1283,51

Quadre 11: ETP any mitja per Penman aproximat a partir de Hargreaves



El gràfic 28 mostra els valors relatius al quadre 11.

Dades mensuals:

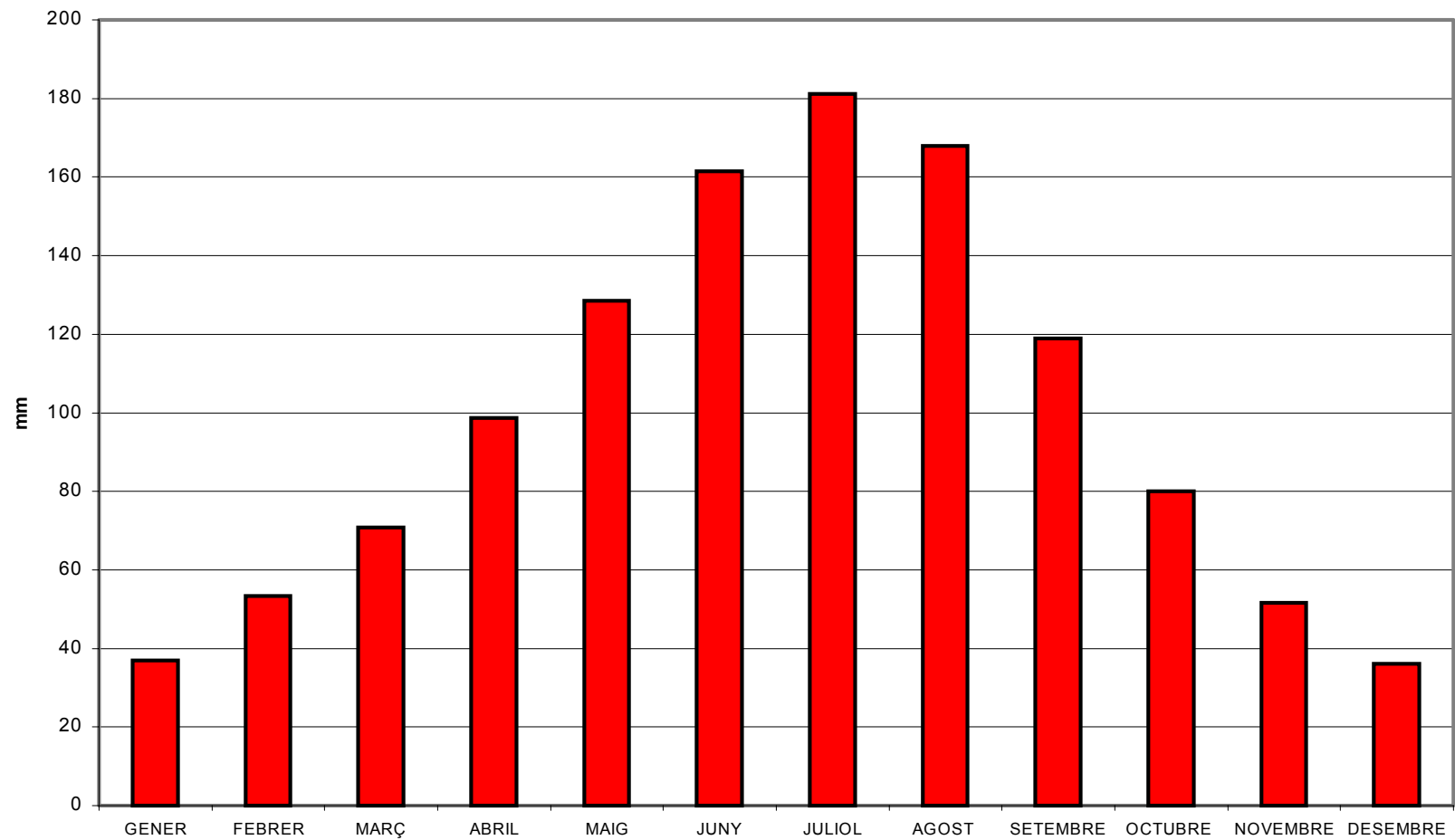
S'han calculat els valors d'ETP aproximats a Penman a partir del mètode de Turc per a les diverses estacions meteorològiques de Menorca i per al període 1984-2002. El quadre adjunt (quadre 12) ens mostra els valors d'ETP mitjans del període per a cada mes i la mitjana anual per a tot el període per a cada una de les estacions.

	ETP PENMAN APROX. DE TURC						
ZONA	LLEVANT				CENTRAL	PONENT	
ESTACIÓ	AEROPORT	ST LLUÍS	ST CLIMENT	MITJANA LLEVANT	MERCADAL-S'ARADA	CIUTADELLA	MITJANA ILLA
gener	37,25	36,35	37,27	36,82	37,42	37,59	37,00
febrer	53,69	52,63	53,26	53,09	54,40	53,71	53,43
març	70,62	70,27	71,24	70,47	71,11	71,76	70,71
abril	98,58	98,22	98,06	98,30	99,01	99,24	98,68
maig	128,69	128,34	128,60	128,30	129,10	130,04	128,59
juny	161,37	161,13	161,75	161,34	161,01	162,26	161,50
juliol	180,86	180,16	180,99	180,80	182,70	181,00	181,10
agost	167,78	167,59	168,38	167,73	168,91	168,43	167,97
setembre	119,03	118,34	119,61	118,84	119,71	118,62	119,00
octubre	80,23	79,58	80,24	79,97	80,55	79,54	80,03
novembre	51,75	51,09	51,28	51,41	52,40	51,42	51,53
desembre	36,40	35,61	35,84	35,93	37,05	36,13	36,09
anual	1186,27	1179,32	1186,53	1182,99	1193,38	1189,74	1185,63

Quadre 12: Valors d'ETP segons el mètode de Penman aproximat a partir del mètode de Turc

Al gràfic 29 observem l'ETP de Penman aproximat a partir de Turc per a l'any mitjà del període i la mitjana de l'illa.

**Gràfic 29. ETP AMB PENMAN APROXIMAT A PARTIR DE TURC PER A ANY MITJÀ**



## 8. CONCLUSIONS

- Segons els càlculs realitzats seguint les diferents metodologies podríem acotar l'evapotranspiració potencial o de referència anual mitjana de Menorca pel que fa al període d'estudi analitzat entre els 878 i els 1.212 mm anuals.
- Els valors més elevats d'evapotranspiració potencial són els calculats amb el mètode de Penman-Monteith, seguits dels resultats del mètode de Turc i Hargreaves, mentre que, els valors més baixos corresponen als resultats obtinguts amb el mètode de Thornthwaite.
- El mètode que millor s'aproxima al mètode de Penman-Monteith per a dades mensuals (reconegut per la FAO i que sembla que ofereix millors resultats) és el de Turc. Conclusió a la qual arribem després de realitzar una comparació entre tres mètodes de càlcul.
- Pel que fa a dades diàries, la comparació només s'ha realitzat a partir d'un altre mètode de càlcul, el de Hargreaves, el qual, per aproximar els valors d'ETP de Penman-Monteith no és tan exacte, però ens pot ser de gran ajuda per fer estudis diaris i quan manquen dades de velocitat del vent.
- S'han aproximat els valors mensuals d'ETP de Penman-Monteith a partir del mètode de Turc amb una funció que els correlaciona per a cinc estacions de Menorca (taula 12) i s'ha obtingut una mitjana anual per a tot el període de 1.185 mm anuals, amb un mínim, el mes de desembre, de 36 mm mensuals i, un màxim, el mes de juliol, de 181 mm mensuals.
- Per tal de completar aquest estudi i poder demostrar quin dels mètodes s'acosta més a la realitat, s'haurien de prendre mesures directes al camp amb els aparells destinats a tal ús (lisímetres, evaporímetres, etc.), determinar l'evapotranspiració potencial i la real a partir de sistemes d'informació geogràfica que permeten processar dades territorials molt àmplies, i ens permetrien tenir en compte tots els paràmetres implicats (cobertes, usos del sòl, tipus de terreny, etc.) i determinar les condicions climàtiques en cada punt del territori.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, S.L; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Roma. FAO.1998. Irrigation and Drainage Paper nº 56

ALMOROX, J. *La evapotranspiración de referencia según Hargreaves y Turc*. Web etsia

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE HIDROGEÓLOGOS. GRUPO ESPAÑOL. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Textos del seminario celebrado en las Palmas de Gran Canaria. 1997

CASTANY, G. *Tratado práctico de las aguas subterráneas*. Ediciones Omega, SA. 1971.

CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega,1983.

DIVERSOS AUTORS. *Congreso en memoria de Germán Galarza. Las caras del agua subterránea*. Instituto Geológico y Minero de España. 2001.

GESA. *Aproximación al Mapa eólico de la isla de Menorca*. 1998

LLAMAS, J. *Hidrología general. Principios y aplicaciones*. Servicio Editorial Universidad del País Vasco. 1993.

MARTELO, M.TERESA. *Selección de la fórmula de evapotranspiración mejor adaptada al área de Guanare-Masparro*. Venezuela, 1989.

MENÉNDEZ GINORIO, J I CAÑAZAS, J. *Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración de referencia*. Cuba: Instituto de Metereologia.

Altres documents de treball de l'OBSAM:

FULLANA COLL, ANTONI; MARÍ PONS, SERGI. *La població estacional a Menorca 1977-2002*. Maó: IME-OBSAM, 2002. Document 1/2002:

CARRERAS MARTÍ, DAVID. *Seguiment del medi natural terrestre de Menorca 2001-2002*. Maó: IME-OBSAM, 2002. Document 2/2002

RAMIS SASTRE, MARGALIDA M. *La situació energètica insular i el repte de la sostenibilitat - Menorca 2002*. Maó: IME-Agència de l'energia, 2003. Document de treball 3/2003.

ESTRADÉ NIUBÓ, SÒNIA. *Seguiment dels recursos hídrics de Menorca 2002*. Maó: IME-OBSAM, 2003. Document de treball 4/2003