



Universitat
de les Illes Balears

TREBALL DE FI DE GRAU

AVALUACIÓ DE TRES PARAMETRITZACIONS DE L'EVAPOTRANSPIRACIÓ

MIQUEL SIQUIER PADILLA

Grau de: Física

Facultat de: Ciències

Any acadèmic 2021-2022

AVALUACIÓ DE TRES PARAMETRITZACIONS DE L'EVAPOTRANSPIRACIÓ

Miquel Siquier Padilla

Treball de Fi de Grau

Facultat de: Ciències

Universitat de les Illes Balears

Any acadèmic 2021-22

Paraules clau del treball:

Evapotranspiració, balanç d'energia en superfície, fluxos turbulents, clima semi-àrid

Nom del tutor / la tutora del treball: Joan Cuxart Rodamilans

Nom del tutor / la tutora: Belén Martí López

Autoritz la Universitat a incloure aquest treball en el repositori institucional per consultar-lo en accés obert i difondre'l en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació

Autor/a		Tutor/a	
Sí	No	Sí	No
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

RESUM

En el present treball s'avaluen tres parametritzacions habituals pel càlcul de l'evapotranspiració (ET). Es tracta de la teoria de semblança de Monin-Obukhov (MOST), que fa ús del gradient vertical de la humitat específica, de la fórmula de Priestley-Taylor (P-T) que empra els fluxos de calor radiatiu (R_n) i del sòl (G), i de la fórmula de Penman-Monteith (P-M), que combina les dues anteriors i imposa el requeriment de sòl humit. Aquí s'explora com les diferents estimacions comparen amb valors d' ET obtinguts a l'estació experimental del Grup de Meteorologia al Campus de la UIB (ECUIB) a escales semihorària i diària.

La comparació mostra que MOST i P-M a les dues escales temporals solen sobreestimar el valor d' ET , tot i que MOST manté una certa correlació amb les observacions que P-M no té. L'aproximació de P-T empra un coeficient de proporcionalitat α entre ET i $(R_n - G)$ que si es manté constant fa que els valors presentin una gran dispersió. En canvi, ajustant α , s'obtenen bones estimacions d' ET tant a escala semihorària com diària. El valor de α presenta dependència de R_n (major que 1 amb valors grans de R_n), del contingut d'aigua del sòl quan no està ni sec ni saturat, i amb de la humitat de l'aire (amb valors baixos si està per davall del 60%).

De l'estudi es conclou que P-M no és una bona aproximació per l'ECUIB, ja que el requeriment de sòl saturat rarament es compleix. En canvi, MOST presenta un comportament similar a les dades i se suggereix explorar quin factor de proporcionalitat podria funcionar. Finalment, P-T té un bon comportament si s'ajusta el factor de proporcionalitat, pel qual caldria trobar una expressió en funció de R_n , la humitat del sòl i l'humitat relativa de l'aire.

ÍNDIX

1. Introducció.....	5
2. Materials i mètodes.....	12
2.1. Estació de mesura i tractament de dades.....	12
3. Avaluació de les parametritzacions a escala semihorària.....	14
3.1. Validació de les parametritzacions.....	15
3.1.1. Sòl humit.....	16
3.1.2. Sòl molt humit.....	18
3.1.3. Sòl sec.....	19
3.2. Valors per dotze dies específics.....	21
3.3. Anàlisi dels valors mitjans semihoraris.....	22
4. Valors diaris.....	24
4.1. Casos particulars.....	24
4.2. Anàlisi dels valors mitjans diaris.....	25
4.3. Comportament de la α	27
5. Conclusions.....	30
6. Agraïments.....	30

1. INTRODUCCIÓ

L'evapotranspiració, ET , és un procés fonamental al nostre planeta ja que és un dels principals termes d'intercanvi d'energia a l'atmosfera. En aquest procés, l'aigua canvia d'estat líquid a gasós i a través del sòl i les plantes torna a l'atmosfera en forma de vapor. Aquest fenomen és la branca del cicle de l'aigua perquè la duu cap als núvols, els alimenta i origina les precipitacions.

Actualment, l'estudi de l'evapotranspiració és un tema de molt interès dins la física de l'atmosfera ja que aquest encara no està resolt degut a les variacions que es tenen segons l'aproximació utilitzada. Segons *J.Cuxart i A.A.Boone (2020)*: 'La determinació precisa de la taxa d'evapotranspiració és un repte perquè és una quantitat difícil de mesurar i parametritzar'. [1]

L'evapotranspiració ve descrita per la següent fórmula:

$$E = E_g + E_{tr} \quad (1)$$

D'on E_g és l'evaporació del terra i E_{tr} la transpiració de les plantes. Les unitats s'expressen en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ o una unitat alternativa que és mm dia^{-1} . Aquestes estan relacionades de la següent forma: $1 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 86400 \text{ mm dia}^{-1}$, essent el factor de conversió principal la densitat de l'aigua (1000 kg m^{-3}).

L'evaporació de l'aigua requereix energia, per aquesta raó es sol expressar amb $L_v E$ que és el producte de calor latent de vaporització L_v i E . L_v és una funció de la temperatura i té la següent expressió:

$$L_v = 2501000[1 - 0.00095(T_a - 273.15)] \quad (2)$$

Les unitats de $L_v E$, en aquest cas, venen donades en W m^{-2} , que són les unitats que s'han emprat per fer aquest treball.

L'evapotranspiració és fonamental quan es fa l'estudi de l'intercanvi d'energia i aigua. Aquests intercanvis venen descrits per la coneguda equació de balanç d'energia en superfície donada per:

$$R_n = H + LE + G \quad (3)$$

On R_n és el flux per radiació neta i és la principal entrada d'energia que es té durant el dia i de sortida durant la nit, H és el flux turbulent de calor sensible, $L_v E$ és el flux de calor latent o d'evaporació i G el flux per conducció al terra. Tots els fluxos es mesuren en W m^{-2} .

Habitualment, aquesta equació no es compleix ja que apareix un terme residual que indiquem per “Res” que és de l'ordre d'un 20% de la suma dels altres termes. Encara així, l'equació (3) és la més emprada generalment. Per la determinació de l'evapotranspiració, existeixen diferents mètodes que es llisten a continuació.

Determinació experimental de l'evapotranspiració

Pel càlcul experimental de l'evapotranspiració, existeixen dos mètodes diferents que són el sistema Eddy-Covariance (EC) i els lisímetres. Per una banda, EC és una tècnica micrometeorològica per la qual es mesuren les variacions d'alta freqüència de variables meteorològiques per agafar així la major part de l'espectre d'energia. S'obtenen valors de la concentració de vapor d'aigua, de la velocitat del vent (on aquestes s'obtenen a partir d'un anemòmetre sònic) i de la temperatura virtual (aquella temperatura que tindria l'aire sec si la seva pressió i densitat fossin iguals a les de l'aire humit) per fer així la covariància [7]. Dins aquest sistema EC, l'anemòmetre sònic mesura el vent i la temperatura virtual i l'analitzador de gasos proporciona el contingut de CO₂ i H₂O a l'aire.

Els fluxos que es fan servir són fluxos cinemàtics, que es relacionen amb els fluxos reals a partir d'un factor de conversió. Per exemple, el flux de massa representat per \tilde{M} , té unitats de kg m⁻² s⁻¹ on l'equivalent al flux cinemàtic ve per dividir-ho per la densitat, és a dir, $M = \tilde{M}\rho^{-1}$ obtenint així les unitats de m s⁻¹.

La correlació entre dues variables qualssevol $\overline{w'x'}$ s'obté a partir d'agafar la mitjana de la variable i restar-la amb el valor de la variable sencera i fer la multiplicació de les dues per a, posteriorment, fer la suma de la sèrie normalitzada [4]. És a dir:

$$\overline{w'x'} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(w_k - \bar{w}_k) (x_k - \bar{x}_k)] \quad (4)$$

On w representa el vent vertical i x que pot ser qualsevol variable.

Les variables que venen donades per una barra al damunt, significa que s'està fent feina amb la seva mitjana temporal i les que venen denotades per una prima (') representen que són desviacions respecte a la mitjana.

El flux de calor latent LE , obtingut amb el sistema EC i que s'utilitza en aquest treball com a referència, ve donat per:

$$LE = \rho_a L_v \overline{w'q'} \quad (5)$$

On ρ_a és la densitat de l'aire i $\overline{w'q'}$ és el flux turbulent d'humitat específica.

Per altra banda, els lisímetres són uns dispositius introduïts al terra formats per un recipient tancat per sota i lateralment que fan funció de bàscula i proporcionen els canvis de massa

d'un volum controlat. Aquests canvis de massa venen donats per l'entrada i la sortida de l'aigua en forma de líquid o de vapor.

Ambdós sistemes, avui en dia, es poden emprar com a mètodes de referència a l'hora de calcular l'evapotranspiració però, en aquest treball, s'utilitzaran dades EC ja que no es disposa de dades donades per lisímetres a l'estació amb la que farem feina.

Teoria de semblança de Monin-Obukhov (MOST)

La teoria de semblança parteix de condicions de superfície homogènies i estacionàries i relaciona, a través d'un coeficient de difusivitat, els fluxos turbulents amb gradients verticals de la següent forma:

$$\overline{w'q'} = -\frac{zku_*}{\varphi_q} \frac{\partial q}{\partial z} \quad (6)$$

On z és l'altura del flux, k és la constant de von Kármán, u_* és la velocitat de fricció, φ_q la funció universal d'humitat i q que és la humitat específica (la quantitat de grams d'aigua que hi ha en una determinada massa d'aire. Té unitats de kg d'aigua/kg d'aire).

Donat que dins aquest treball només s'analitza LE , es mostrarà únicament per la humitat. Per més detall del mètode emprat consultar Moene i Van Dam [2]. La funció universal per la temperatura es va determinar experimentalment en campanyes de mesures de capa límit atmosfèrica en el darrer terç del segle XX i, avui en dia, encara es proposen nous coeficients. Habitualment, la funció universal per la humitat es pren idèntica a la de la temperatura i així s'ha fet en aquest treball. Pel seu càlcul, s'utilitzen les relacions de Businger adaptades per Högstrom (1988) [1]. La φ_q depèn d'un paràmetre d'estabilitat que, en aquest treball, s'ha utilitzat la longitud d'Obukhov L .

$$L = -\frac{\overline{\theta}_v u_*^3}{kg \overline{w' \theta_v'}} \quad (7)$$

Aquesta produeix un paràmetre d'estabilitat adimensional, z/L , que expressa els rols relatius de la cisalla i la flotabilitat en la producció/consum d'energia cinètica turbulenta [15]. De l'equació (7), $\overline{\theta}_v$ és la temperatura potencial virtual i $\overline{w' \theta_v'}$ és el flux de temperatura potencial virtual de la superfície.

Generalment, la relació entre el flux LE i el gradient vertical d'una quantitat depèn d'un gran nombre de factors. Per a trobar el flux LE utilitzem:

$$-\frac{LE}{\rho_a u_*} = \frac{k[q(z_{q2}) - q(z_{q1})]}{\ln\left(\frac{z_{q2}}{z_{q1}}\right) - \Phi_q\left(\frac{z_{q2}}{L}\right) + \Phi_q\left(\frac{z_{q1}}{L}\right)} \quad (8)$$

On les variables z_{q2} i z_{q1} fan referència a les altures de la mesura d'humitat i venen donades per 201 cm i 26 cm respectivament i Φ és la versió integrada de les funcions universals. Aquestes adopten la següent forma:

$$\Phi_q\left(\frac{z}{L}\right) = 2 \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) \quad \text{quan } \frac{z}{L} \leq 0 \quad (9)$$

$$\Phi_q\left(\frac{z}{L}\right) = -7.8 \frac{z}{L} \quad \text{quan } \frac{z}{L} \geq 0 \quad (10)$$

Amb $x = (1-16z/L)^{1/4}$.

Mètodes de Penman-Monteith i Priestley-Taylor

Existeixen altres estimacions de base física que s'utilitzen quan el terra té suficient humitat i, per tant, permet que l'aigua arribi a la superfície. Entre elles destaquem l'equació de Penman:

$$L_v E = \frac{s(R_n - G)}{s + \gamma} + \rho \frac{C_p}{r_{ae}} \frac{e_{sat}(T_a) - e_a}{s + \gamma} \quad (11)$$

En la qual el primer terme es coneix com el terme radiatiu i el segon com el terme aerodinàmic.

Derivació fórmula de Penman

L'any 1948, Penman va derivar una expressió per l'evaporació a superfícies que estiguessin carregades d'aigua. L'equació (3) i les expressions del flux de calor sensible i latent van ser el seu punt de partida per a derivar la seva equació.

$$H = -\rho C_p \frac{T_a - T_s}{r_{ah}} \quad (12)$$

$$L_v E = -\rho \frac{C_p}{\gamma} \frac{e_a - e_s}{r_{ae}} \quad (13)$$

Es pot veure que apareix la resistència aerodinàmica pel transport d'humitat r_{ae} que és essencialment turbulència i ve donada per la següent expressió:

$$r_{ae} = \frac{1}{u_* \kappa} \left(\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Phi_q\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Phi_q\left(\frac{z_1}{L}\right) \right) \quad (14)$$

A més, dins les equacions (12) i (13) tenim la pressió de vapor per l'aire (e_a) i la pressió de vapor de la superfície (e_s). També apareix la r_{ah} que és la resistència aerodinàmica pel transport de calor, C_p que té un valor de $1012 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ i representa la capacitat calorífica específica, la T_a que és la temperatura de l'aire, la T_s que representa la temperatura del sòl i la γ que és la constant psicomètrica definida com:

$$\gamma = \frac{C_p R_v p}{R_d L_v} \quad (15)$$

On $R_v=462 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ és la constant dels gasos pel vapor d'aigua, $R_d=287 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ representa la constant dels gasos per l'aire sec, és a dir, sense vapor d'aigua i p és la pressió en Pa.

A més, la pressió de vapor (e) de l'equació (13) és aquella que exerceix el vapor d'aigua en equilibri termodinàmic en un sistema aïllat a una certa temperatura [12]. Té unitats de Pa i presenta la següent expressió:

$$e = RH \cdot e_{sat} \quad (16)$$

Dins l'equació (16) apareix la humitat relativa (RH) que proporciona una relació entre la quantitat d'humitat continguda en l'aire respecte a la quantitat d'humitat màxima que l'aire pot contenir. Al igual que la humitat específica, la humitat relativa té unitats de kg d'aigua/kg d'aire sec.

Ara bé, com que no es té la temperatura superficial, aquesta s'estima amb un gradient partint de la temperatura de l'aire a la superfície i assumint que aquest gradient és constant pel rang de temperatures que ens movem. A partir d'aquí, en assumir una superfície carregada d'aigua, la pressió de vapor que trobem a la superfície es considera igual al valor saturat de temperatura a la superfície, és a dir:

$$e_s = e_{sat}(T_s) \quad (17)$$

Pel fet que la corba de la pressió de vapor saturant (quantitat màxima de vapor d'aigua que admet un volum d'aire a una certa temperatura) no és una funció lineal, Penman va eliminar la temperatura de la superfície fent la següent aproximació lineal:

$$e_{sat}(T_s) = e_{sat}(T_a) + s(T_a)[T_s - T_a] \quad (18)$$

On apareix el pendent de la corba de pressió de vapor saturant de l'aigua, que es pren constant en l'interval de temperatures considerat:

$$s(T) = \frac{de_{sat}}{dT} = e_{sat}(T_s) \frac{a(b+273.15)}{(b+T)^2} \quad (19)$$

Ajuntant l'equació (18) i l'equació (13), assumint que $r_{ah}=r_{ae}$ i combinant-ho amb l'equació (3) s'arriba a la coneguda equació de Penman.

Penman-Monteith: ampliació a la vegetació

L'any 1965 Monteith i Rijema proposaren com estendre l'equació de Penman per superfícies vegetades. El seu pensament anava a com lligar una superfície carregada d'aigua amb una superfície vegetada. Aquest raonament els conduí a introduir el concepte de “*the big leaf approach*” on la vegetació es simplifica a una simple fulla amb una cavitat estomàtica idealitzada. Dins l'estoma, el canvi de fase de l'aigua té lloc en condicions saturades i s'afegeix la resistència de la vegetació r_c per representar el vapor que flueix cap a la superfície de la fulla, estant aquesta en paral·lel amb la resistència aerodinàmica r_{ae} [1]. Veure **figura 1**.

A partir de la incorporació de la r_c , el resultat que es va obtenir va ser el mateix que l'equació (11) amb la diferència que el valor de γ va ser substituït per $\gamma^* = \gamma(1 + \frac{r_c}{r_{ae}})$. Amb aquest canvi del valor de γ , s'obté la coneguda equació de Penman-Monteith (P-M).

$$L_v E = \frac{s(R_n - G)}{s + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_{ae}})} + \frac{\rho \frac{c_p}{r_{ae}}(e_{sat}(T_a) - e_a)}{s + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_{ae}})} \quad (20)$$

Versió Food and agriculture Organization (FAO) de l'equació de P-M

Més endavant, es va derivar una expressió alternativa per terrenys amb herba i amb molta aigua disponible. Aquesta va rebre el nom de FAO Penman-Monteith i va fer ús del concepte de superfície de referència. Aquest va ser introduït per evitar així haver de definir paràmetres únics per a diferents cultius. A partir d'aquí, la consulta d'experts de la FAO va acceptar la següent definició per a la superfície de referència: “ Un cultiu de referència hipotètic amb una altura de cultiu de 0.12 metres, una resistència de la vegetació de 70 s m^{-1} i un albedo de 0.23”. [6] L'albedo és el percentatge de radiació que qualsevol superfície reflexa respecte a la radiació que incideix damunt d'ella [8]. Per a un cultiu específic, s'aplica la mateixa fórmula multiplicada per un coeficient de cultiu k_c obtingut experimentalment.

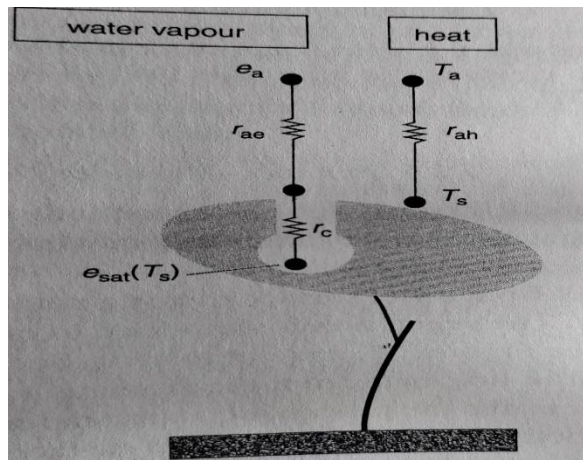


Figura 1. Esquema fulla única on es veu ubicada la resistència de la vegetació r_c . S'observa la e_a que és la pressió de vapor, la resistència aerodinàmica pel transport d'humitat r_{ae} , la temperatura de l'aire T_a i la resistència aerodinàmica pel transport de calor r_{ah} . Font original: Arnold F. Moene, Jos C. Van Dam.

La resistència de la vegetació r_c depèn del que passa a la planta i al sòl i agafa un valor diferent depenent de la vegetació que es tingui. Un estudi precedent va determinar que per l'estació EC de la UIB (ECUIB) convenia prendre un valor de $r_c=100 \text{ s m}^{-1}$ que és el que s'ha emprat per la realització d'aquest treball [3].

Com que la r_{ae} és un paràmetre difícil de mesurar, la FAO va ajustar una versió més simple en funció del vent que proporciona un valor d'evapotranspiració de referència (ET_0) pensat per a totes les regions i climes i ve donada per:

$$ET_0 = \frac{0.408 s(R_n - G) + \gamma \frac{900 V_{vent}(e_{sat}(T_a) - e_a)}{T_a + 273}}{s + \gamma(1 + 0.34 V_{vent})} \quad (21)$$

Aproximació de Priestley-Taylor

Priestley-Taylor (P-T) varen proposar una equació que es pot considerar una simplificació de P-M, ja que implícitament considera el terme aerodinàmic proporcional al terme radiatiu. Aquesta ve donada per:

$$L_v E = \alpha \frac{s(R_n - G)}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_{ae}}\right)} \quad (22)$$

I proposaren que aquest terme aerodinàmic fos substituït per una constant α , donant-li un valor de $\alpha=1.26$ de manera que el terme de radiació fos quatre vegades el terme

aerodinàmic. Amb estudis posteriors s'ha vist com el valor de α depèn del lloc i agafa un rang de valors entre 0.6 i 2, depenent de la superfície on s'estigui fent feina. [1]

Zona d'estudi

Finalment, les dades obtingudes per a la realització d'aquest treball estan agafades de l'estació meteorològica de la Universitat de les Illes Balears (UIB), a Palma, de manera que els resultats que s'han obtingut depenen fonamentalment del clima de Mallorca i el seu temps meteorològic. El clima de Mallorca és mediterrani. Es caracteritza per tenir estius secs i càlids, pluges estacionals i hiverns frescos i plujosos. Durant la primavera i la tardor tant la temperatura com les pluges solen variar d'un any a l'altre. La major part de les precipitacions que es tenen durant tot l'any es localitzen a la tardor i la primavera i solen ser molt irregulars arribant a ser molt diferents d'un any a l'altre, inclús podent arribar a tenir sequeres.[3] [5] [9]

Totes les dades amb les que s'ha fet feina han estat seleccionades per diferents dies dins dels anys 2018 i 2021. Les dades que es tenen de l'any 2018 corresponen a un any humit mentre que les de l'any 2021 corresponen a un any sec. Aquesta selecció s'ha fet per tenir diferents estimacions de l'evapotranspiració estant a diferents condicions meteorològiques i que no es corresponguin en una època de l'any en particular.

L'objectiu d'aquest treball és veure si les fórmules proposades comparen bé amb la mesura experimental de l'evapotranspiració per un clima semiàrid com el de Mallorca, usant dades semihoràries de dotze dies concrets i els estadístics de deu mesos de l'any 2021. La mateixa estratègia s'ha emprat amb valors d'ET diaris.

2. MATERIALS I MÈTODES

2.1 ESTACIÓ DE MESURA I TRACTAMENT DE DADES

El material emprat per a la realització d'aquest treball han estat una sèrie de dades obtingudes directament de l'estació meteorològica de la UIB (ECUIB). Aquesta està situada al centre del campus i pertany al Grup de Meteorologia de la UIB (Fig. 2). El terreny on tenim localitzada l'estació està format per un prat uniforme que es sega cada cert temps i està dotat de vegetació dispersa. A més, està situada apartada dels arbres i les carreteres per minimitzar l'efecte de la seva presència sobre els valors dels fluxos turbulents. [3]

Les dades obtingudes per aquesta estació són mesures de diferents variables de l'aire i del terra com la velocitat del vent i el contingut volumètric d'aigua, entre altres. Les dades ràpides, que són les de l'anàlitzador de gasos i de l'estació EC, es guarden a 20 Hz (20

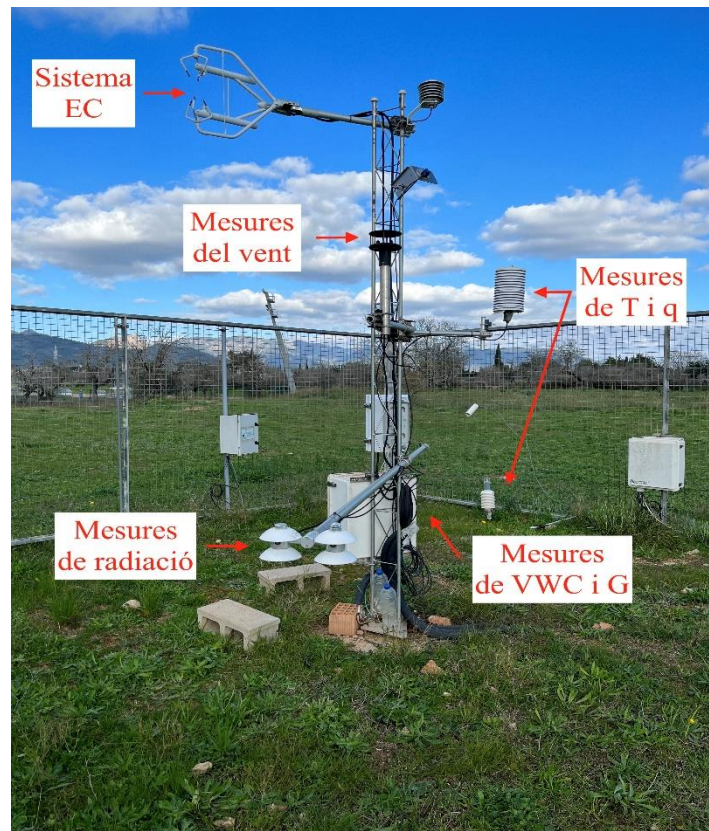


Figura 2: Estació EC del grup de meteorologia de la UIB (ECUIB). Amb color vermell s'han assenyalat d'on s'obtenen les diferents variables meteorològiques. Font original: Belén Martí.

dades cada segon). Dels sensors que no estan enterrats, és a dir, les mesures de temperatura i humitat i l'anemòmetre sònic 2D mesuren les variables cada segon i es guarden les mitjanes cada minut. Les mesures de radiació es guarden cada 4 segons i cada minut i finalment, les dades del sòl tenen una freqüència d'un segon a excepció de les mesures del contingut volumètric d'aigua (VWC) que venen donades cada dos segons.

El VWC és una de les variables més importants a l'hora de fer el càlcul d'ET amb les fórmules esmentades anteriorment, ja que ens dona informació de la humitat del sòl. És una variable adimensional que expressa el tant per cent del volum del sòl (V_T) ocupat per aigua (V_a). [3]

$$VWC = \frac{V_a}{V_T} \quad (23)$$

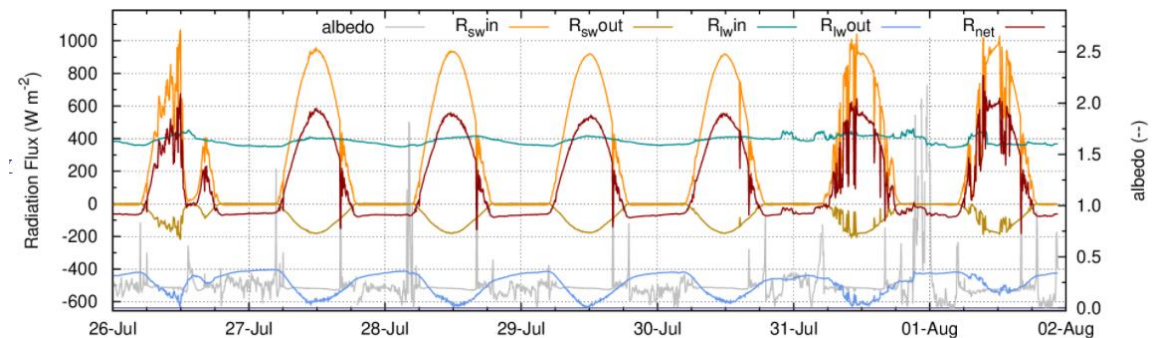


Figura 3. Corbes de la radiació neta per la setmana del 26 de juliol al 1 d'agost del 2021. $R_{sw,in}$ i $R_{sw,out}$ representen la radiació solar incident i reflectida respectivament. $R_{lw,in}$ i $R_{lw,out}$ són la radiació d'ona llarga incident i reflectida respectivament. R_{net} és la radiació neta.

La quantitat de dades que hi ha és molt gran i per analitzar-les els arxius corresponents s'han tractat mitjançant Python (versió 3.7). Atenent a la finalitat d'aquest treball, s'ha fet feina amb totes les dades proporcionades per l'estació ECUIB mitjançant una escala semihorària i diària, el que implica haver de promitjar les dades per convertir-les a l'escala temporal que ens interessa.

Els dies que s'han seleccionat per la seva realització es van consultar dins la base de dades de l'estació meteorològica. Les principals variables que s'han tingut en compte per la seva selecció han estat el contingut volumètric d'aigua (VWC) i la radiació neta (R_n). Per una banda, pel VWC s'ha establert un límit a partir del 14% on, per valors menors s'està en un sòl sec mentre que valors majors es té un sòl banyat. Per altra banda, també s'ha mirat que es tingués un bon cicle de radiació neta per evitar així tenir núvols que fessin variar el seu valor. Aquest fet el podem veure a la **figura 3** (obtinguda de la web de l'estació) on la radiació neta ve donada per la corba de color vermell.

Podem observar com des del dia 27 al 30 de juliol, la corba de radiació neta presenta una tendència suau amb pocs núvols i són els dies que ens interessaran, mentre que pel dia 1 d'agost i pels dies 26 i 31 de juliol tenim variacions en forma de pics, el que implica tenir més núvols.

3. AVALUACIÓ DE LES PARAMETRITZACIONS A ESCALA SEMIHORÀRIA

En primer lloc, s'ha analitzat com les parametritzacions s'ajusten a les observacions de les dades semihoràries. Per això, el que s'ha fet és determinar el valor d'evapotranspiració per a cada parametrització per un interval de temps de trenta minuts.

L'estudi d'aquest apartat s'ha dut a terme damunt dotze dies diferents dels anys 2018 i 2021. Per a poder comparar resultats diferents depenent de l'època de l'any en què ens

trobem, s'han elegit nou dies dins la primavera i l'estiu, i tres dies dins la tardor i l'hivern. Concretament, s'han seleccionat de l'any 2018: 24 setembre, 13 octubre i 15 desembre. I de l'any 2021: 15 març, 24 març, 2 abril, 29 maig, 7 juny, 23 juliol, 17 d'agost, 27 d'agost i 5 setembre.

A més, s'ha dividit l'anàlisi dels valors semihoraris en tres parts. A la primera part es representen els valors estimats per a cada parametrització respecte els valors mesurats per l'ECUIB. També es representen les sèries temporals dels fluxos d'evapotranspiració obtinguts per a cada mètode, i es veu l'evolució dels fluxos mesurats del balanç d'energia per tota la durada del dia analitzat.

A la segona part, s'ha realitzat una taula dels valors d'evapotranspiració obtinguts per cada parametrització per uns dies seleccionats en funció del VWC i, finalment, a la tercera part s'han fet uns anàlisis dels valors mitjans semihoraris de deu mesos de l'any 2021, des del 15 març de 2021 fins el 31 de desembre del 2021.

3.1 VALIDACIÓ DE LES PARAMETRITZACIONS

Per les parametritzacions de P-M i MOST s'han comparat els valors estimats contra els valors mesurats. Per P-M el càlcul s'ha realitzat estimant el valor de la r_{ae} de l'equació (20) a través de la u^* que s'obté fent el càlcul amb MOST. S'ha comprovat que si fem les dades dels fluxos mesurats en comptes de les estimacions de MOST els resultats que s'obtenen són molt similars.

Per P-T s'ha fet el mateix procediment però amb dues sèries de punts. A la primera s'ha imposat un valor de α en concret. Com hem mencionat anteriorment, quan es va plantejar l'equació de P-T es va proposar que $\alpha=1.26$ perquè aquest valor està ajustat per climes humits amb poca radiació solar. Al nostre clima, no podem agafar aquest valor ja que no se'ns ajusta igual, per això, hem imposat que $\alpha=1$ com si la proporcionalitat fos directe. A partir d'aquí, mitjançant una regressió lineal dels valors que ens dona l'estació ECUIB en funció dels valors estimats, s'ha cercat quin valor de α s'ajusta millor per cada dia.

Per a la realització dels gràfics s'han triat tres dies dels dotze mencionats anteriorment on es tingués diferent contingut volumètric d'aigua i així poder observar el seu comportament

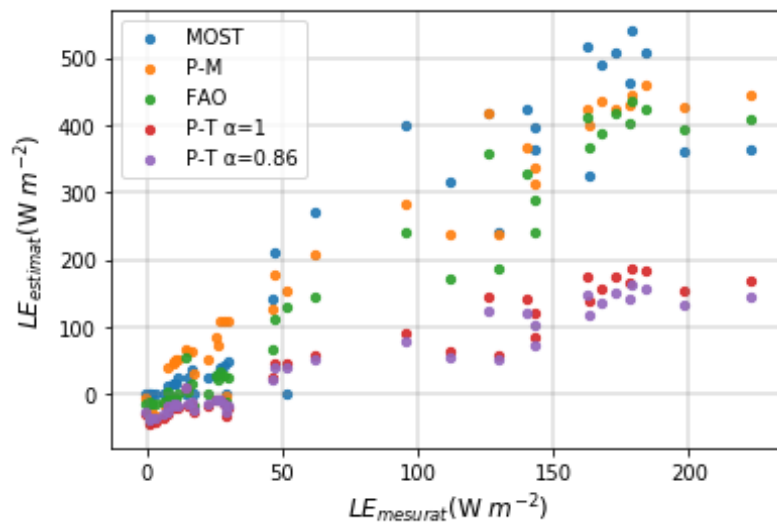


Figura 4. Representació de cada parametrització pel 24 de setembre del 2018 (sòl humit). Els punts de color blau representen el càlcul amb Monin-Obukhov, els taronges Penman-Monteith, els verds la FAO, els vermells Priestley-Taylor amb $\alpha=1$ i els liles Priestley-Taylor amb α ajustat.

estant a diferents condicions meteorològiques. El primer dia seleccionat ha estat el 24 de setembre de 2018 que presenta un VWC del 18% (sòl humit), el segon dia és el 24 de març de 2021 que té un VWC del 25% (sòl molt humit) i el tercer dia ha estat el 23 de juliol de 2021 amb un VWC del 10% (sòl sec).

De cara als gràfics, les etiquetes que venen donades per $LE_{estimat}$ fan referència als valors de les parametritzacions que s'han calculat a partir de les equacions emprant els valors de variables com la velocitat del vent, la humitat, la temperatura, entre altres proporcionades per l'estació ECUIB. Les que venen representades per $LE_{mesurat}$ són directament els valors obtinguts d'evapotranspiració per l'estació mitjançant el mètode EC.

3.1.1 SÒL HUMIT

Per aquest dia tenim un sòl banyat (VWC=18%), amb poca presència de núvols, ja que la corba de radiació neta presenta una tendència suau i, si mirem el valor de la velocitat del vent entre les 11 i les 14 hores, hi ha un valor relativament alt de 2.7 m s^{-1} , que implica tenir valors d'evaporació més alts respecte vents més fluixos.

A la figura 4 podem veure que, quan el valor mesurat està entre 0 i 50 W m^{-2} , els valors estimats són negatius i els mesurats són positius. Els mètodes emprats per estimar els valors d'evapotranspiració indiquen que tindriem un procés de condensació de l'aigua, fet que el sistema EC no veu. Tanmateix, com que els fluxos són petits, el canvi de signe

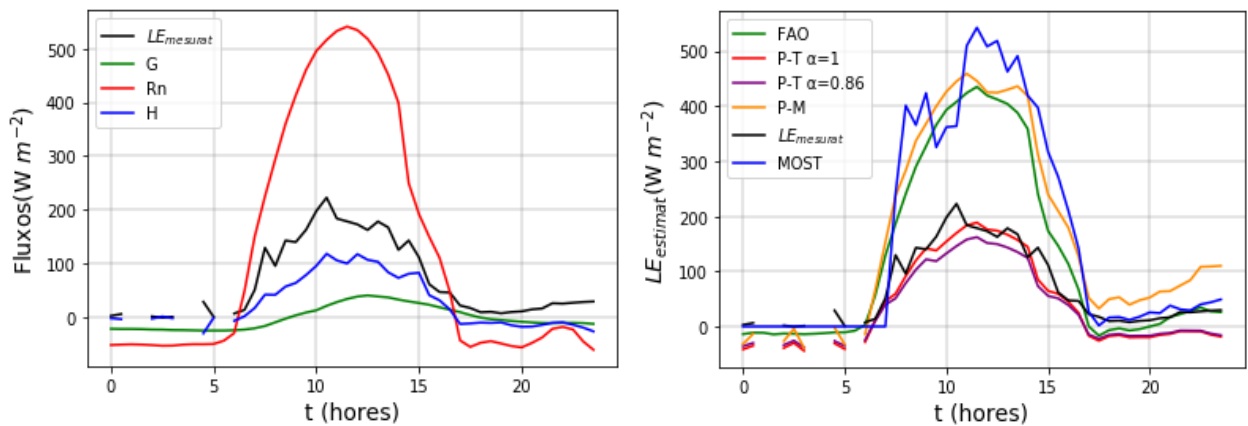


Figura 5. Sèries temporals pel 24 de setembre del 2018. A l'esquerra tenim representats els quatre fluxos d'energia respecte el temps. En color negre el flux LE, en color verd el flux G, en vermell la R_n i en blau el flux H. A la dreta tenim els fluxos d'evapotranspiració per cadascuna de les parametritzacions en funció del temps. Aquests estan representats amb els mateixos colors emprats a la figura 4.

podria estar dins el marge d'error de la mesura. Quan ens acostem a les hores centrals del dia, la radiació neta passa a ser la principal font d'energia amb el consegüent augment d'ET.

Es pot observar com MOST sobreestima fortament els valors obtinguts assolint en alguns casos valors de fins a 500 W m^{-2} quan els valors mesurats estan per davall de 200 W m^{-2} . Tant P-M com la FAO adquireixen valors similars seguint una mateixa tendència.

En canvi, per P-T les sobreestimacions no són tan altes. Quan es realitza per $\alpha=1$ veiem com els valors s'assemblen de manera general als valors mesurats. L'ajust de les dades ens dona un valor de $\alpha=0.86$. Com hem mencionat abans, el valor de α sol estar entre 0.6 i 2 depenent de la superfície que es té. En aquest cas, el valor de 0.86 es troba dins del marge de la predicció teòrica i, al no estar completament saturats al terra, el fet d'obtenir aquest valor de α significa que el factor (R_n-G) ens proporciona més evaporació de la que tocaria. A més, podem veure com les dues sèries de punts van de manera paral·lela agafant valors quasi similars.

Per tant, a la figura 4, hem vist com l'estimació de MOST no es correspon als valors mesurats i com P-M la FAO sobreestimen fortament els valors obtinguts. Per aquestes dues es podria pensar que tenint un 18% de VWC al terra no fos suficient per complir les condicions de saturació del sòl de P-M.

Amb la representació de les sèries temporals de la figura 5 a l'esquerra, podem observar, per una banda, que la radiació neta R_n és la que predomina agafant un valor màxim de 550 W m^{-2} i com els altres fluxos són menors durant quasi totes les hores del dia. Després de la posta de Sol, podem veure com la superfície segueix evaporant, probablement per efecte

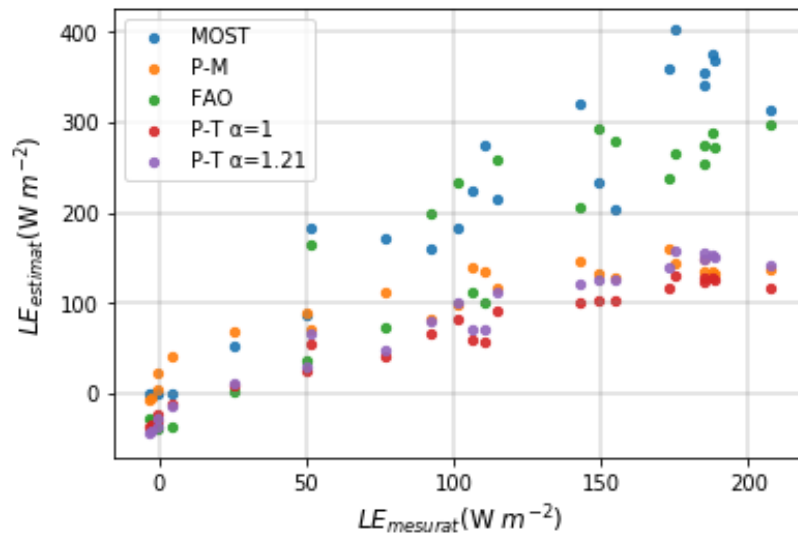


Figura 6. Representació de cada parametrització pel 24 de març del 2021 (sòl molt humit) amb els mateixos símbols que la figura 4.

del vent, mentre que els fluxos G i H tendeixen a compensar el refredament de la superfície per radiació i evaporació.

Per altra banda, a la figura 5 a la dreta podem observar com l'evolució temporal dels fluxos d'evapotranspiració confirmen que P-T és el que millor s'ajusta a la corba de $LE_{mesurat}$ mentre que la FAO, P-M i MOST tenen diferències molt significatives durant totes les hores centrals del dia.

3.1.2 SÒL MOLT HUMIT

Dins aquest dia, trobem un sòl molt banyat ($VWC=25\%$) i alguna presència de núvols en algunes hores concretes del dia. De cara a la velocitat del vent, tenim un valor no molt alt d'aproximadament 2.1 m s^{-1} .

A la figura 6 observem com al començament de cada gràfic seguim tenint una barreja de punts corresponents a les hores de matinada igual que passava amb el dia anterior amb la diferència que ara, el sistema EC sí que veu condensació i agafa valors negatius. Per tant, aquí ens equivoquem en magnitud i no en signe.

Per MOST encara seguim sobreestimant arribant a valors màxims d'aproximadament 400 W m^{-2} . Al igual que el dia anterior, el fet de tenir un sòl banyat fa que tinguem més sobreestimació dels valors.

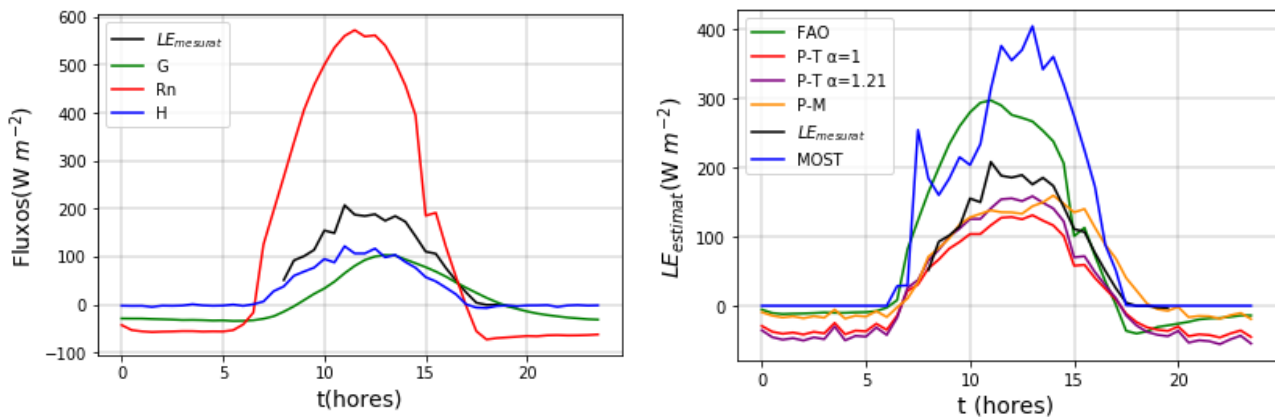


Figura 7. Representació de les sèries temporals pel 24 de març del 2021 amb els mateixos símbols que la figura 5.

Els resultats que s'obtenen per P-M veiem que milloren els resultats de manera significativa. Amb la FAO encara tenim una sobreestimació dels valors i per anar més enllà, caldria estudiar l'efecte de la velocitat del vent. Per P-T ja no és té un comportament similar al d'abans perquè ara el valor ajustat de α és de 1.21 i això implica que els punts es situïn per damunt dels calculats amb $\alpha=1$. Encara així, el valor de α obtingut està dins del marc de la predicció teòrica i, a diferència del dia anterior, a l'estar en condicions saturades el factor (R_n-G) no és suficient per tota l'evaporació que es té.

A la figura 7 a l'esquerra veiem com R_n predomina damunt els altres fluxos d'energia durant les hores centrals del dia i, en aquest cas, durant les hores de matinada i de nit els altres fluxos són positius per compensar la radiació neta. Al gràfic de la dreta, podem observar com P-T i P-M tenen una tendència similar respecte als valors mesurats (corba negra) mentre que la FAO i MOST sobreestimen fortament els valors.

3.1.3 SÒL SEC

Per aquest dia, en ser un dia de ple estiu disposem d'un sòl que no està banyat ($VWC=10\%$) on sí que es tenen algunes variacions molt petites en forma de pic a la corba de radiació neta, implicant així tenir alguns núvols. La velocitat del vent és relativament alta adquirint un valor de 3.3 m s^{-1} .

A la figura 8, observem com MOST és la que millor s'ajusta als valors mesurats en comparació a les altres, tot i agafar valors de l'ordre del doble que les mesures.

Per P-M sí que es veu una sobreestimació molt alta dels valors igual que passa amb la FAO, assolint valors fins a més de 700 W m^{-2} per P-M i 400 W m^{-2} per la FAO quan els

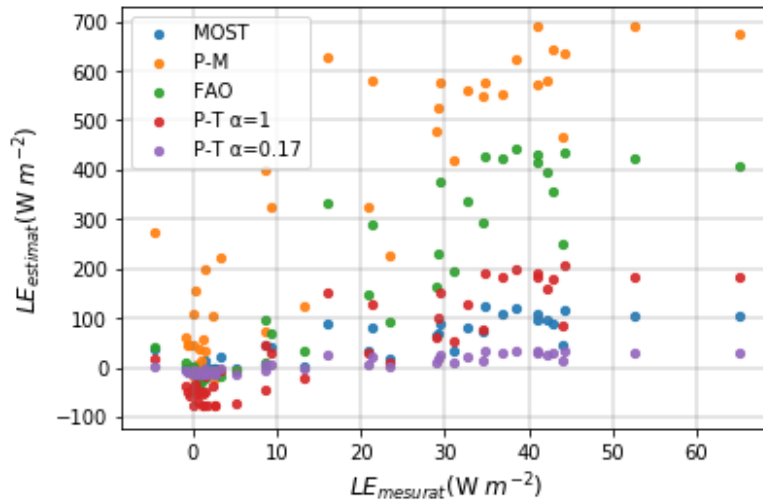


Figura 8. Representació de cada parametrització pel 23 de juliol del 2021 (sòl sec) amb els símbols de la figura 4.

valors mesurats no van més enllà de 70 W m^{-2} . Aquesta pujada dels valors calculats era esperable ja que tenim una velocitat del vent moderada.

Per P-T es veu molt diferent als casos anteriors. Pel cas de $\alpha=1$ els valors calculats sobreestimen bastant els valors mesurats. Ara bé, al realitzar la regressió veiem com obtenim un pendent de $\alpha=0.17$ i aquest sí que s'ajusta bé als valors mesurats però no s'ajusta als possibles valors teòrics de α entre 0.6 i 2. A més, a diferència dels gràfics anteriors, aquí es perd el paral·lisme entre les dues sèries de punts segons el valor de α .

Per P-M, P-T i la FAO tenim valors molt sobreestimats perquè estem amb un VWC del 10%, és a dir, no tenim un terra suficientment mullat per a poder emprar aquestes fórmules.

Si mirem les sèries temporals a la figura 9 a l'esquerra, podem observar com el flux de calor sensible H predomina sobre el flux de calor latent LE . Al gràfic de la dreta veiem com P-M i la FAO sobreestimen de manera notable tots els valors i P-T també s'allunya dels valors mesurats, encara que la sobreestimació no és tan alta. Per aquest cas, MOST, inclús anant per sobre de $LE_{mesurat}$, és la que millor s'ajusta en comparació a les altres.

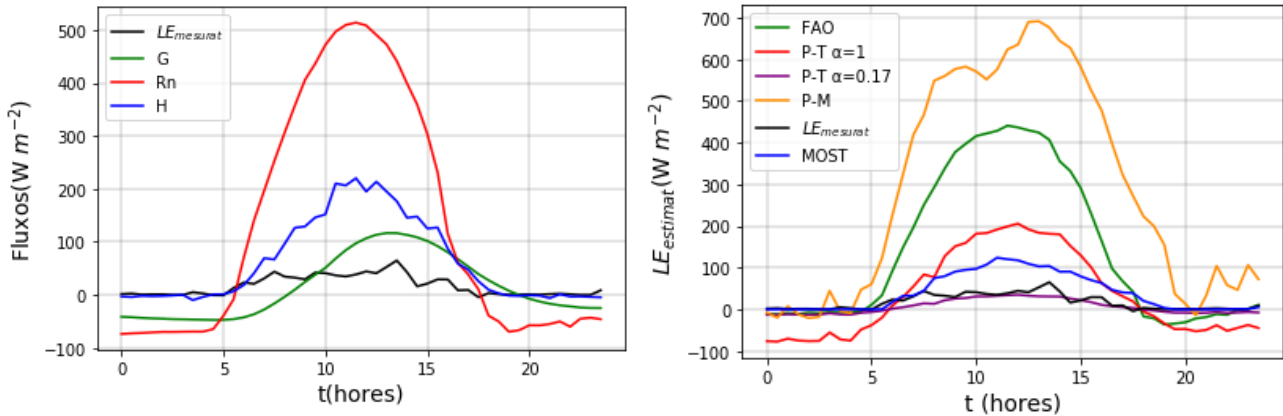


Figura 9. Representació de les sèries temporals pel 23 de juliol del 2021 amb els símbols de la figura 5.

3.2 VALORS PER DOTZE DIES ESPECÍFICS

Un pic analitzats els gràfics dels casos particulars, s'ha realitzat la **taula 1** amb els valors d'evapotranspiració per a cada parametrització pels dotze dies mencionats anteriorment. Aquests valors estan agafats com el valor mitjà que s'obté entre les 11 i les 14 hores ja que és quan disposem de major radiació neta. Amb ella, es pot veure com van variant els valors obtinguts estant a èpoques de l'any diferents i està ordenada en funció dels valors de VWC que s'obtenien per cada dia, d'un 30% fins a un 10% d'aigua al terra. Per a l'anàlisi, s'han classificat els dotze dies en tres rangs diferents depenent del VWC. Quan $VWC > 23\%$ es considera que s'està en un rang molt humit, per $14\% < VWC < 23\%$ en un rang humit i quan $VWC < 14$ en un rang sec.

Amb la taula 1, podem observar com P-T amb $\alpha=1$ i amb α ajustat destaca damunt de les altres parametritzacions en tots els rangs de VWC, ja que els valors calculats són més pròxims als mesurats. Aquest resultat no és igual per tots els casos ja que tenim excepcions a dies situats en el rang sec de VWC on MOST és la que millor s'aproxima als valors mesurats i P-T els sobreestima. A més, els valors obtinguts amb P-M per dies dins del rang molt humit són bastant semblants als mesurats excepte pel 13 d'octubre del 2018 i 29 de maig del 2021.

11h-14h	VWC (%)	LE _{mesurat} (W m ⁻²)	P-T (W m ⁻²)		P-M (W m ⁻²)		MOST (W m ⁻²)
			$\alpha=1$	α ajustat	MOST	FAO	
15 des.2018	30	100	40	60	150	150	280
24 març 2021	25	180	120	145	130	275	340
13 oct. 2018	24	160	100	130	230	380	320
15 març 2021	23	170	75	120	185	270	285
29 maig 2021	23	160	180	100	360	360	210
7 juny 2021	21	145	175	95	330	400	250
5 set. 2021	21	55	160	45	360	350	150
2 abril 2021	18	110	135	90	250	325	230
24 set. 2018	18	180	170	150	425	410	470
17 agost 2021	12	30	130	15	325	340	120
27 agost 2021	11	20	155	10	350	380	125
23 juliol 2021	10	50	200	35	640	430	120

Taula 1. Valors obtinguts d'evapotranspiració pels dotze dies. A la primera columna tenim el VWC, a la segona el valor d'evapotranspiració mesurat, a la tercera els valors amb P-T per $\alpha=1$ i α ajustat, a la quarta els valors mitjançant P-M amb dades de MOST i amb la FAO i finalment a la quinta els valors obtinguts amb MOST.

Crida l'atenció d'aquesta taula la desigualtat que hi ha de valors quan es realitza amb P-M i la FAO dins el rang humit, on clarament tots els valors estan sobreestimats. Finalment, observem com MOST va rebaixant el seu valor a mesura que ens acostem al rang sec on els valors estimats s'aproximen relativament als mesurats.

3.3 ANÀLISIS DELS VALORS MITJANS SEMIHORARIS

Dins aquest apartat disposem de dades de deu mesos de l'any 2021. Per a la realització dels gràfics, les dades que s'han obtingut estan agafades entre les 11:00 i les 14:00 hores (igual que s'ha fet per la *taula 1*). Per aquesta raó, es mostren les mateixes parametritzacions que l'apartat 3.1 (exceptuant la de P-T per α ajustat ja que al tenir un gran nombre de punts, la tendència no és lineal per a realitzar la regressió) per així poder veure el comportament d'un cúmul de dades.

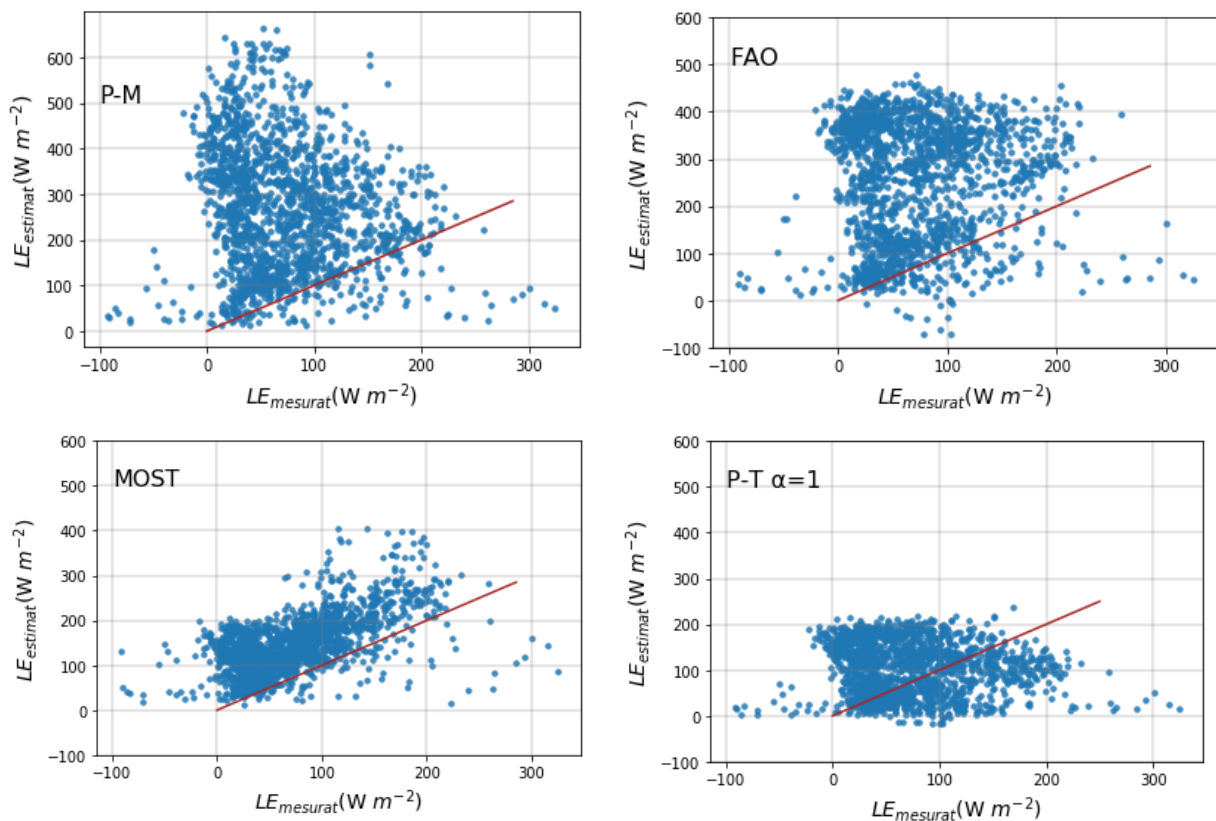


Figura 10. Valors mitjans semihoraris per a cada parametrització. A dalt a l'esquerra per P-M i a la dreta segons la FAO. Just davall a l'esquerra per MOST i a la dreta per P-T. El segment que hi ha pintat de color marró als gràfics representa la recta $y=x$.

Amb la figura 10, confirmem el que s'observava anteriorment amb els casos particulars. Podem veure com P-M s'allunya molt dels valors mesurats sobreestimant en quasi tots els casos i arribant a obtenir un conjunt de valors majors a 600 W m^{-2} . Amb la FAO, ho corregim una mica encara que també sobreestima de manera notable en la majoria dels casos. Ara bé, una gran diferència entre els dos gràfics és que quan estem amb valors alts d'aproximadament 150 W m^{-2} o més, P-M tendeix a acostar-se a la recta de color marró i la FAO no.

Amb MOST, encara seguim tenint una sobreestimació dels valors on aquesta no és tan alta i majoritàriament els valors estan més a prop de la recta. Podem observar com tenim molta dispersió al voltant del zero i com el núvol de punts es disposa, aproximadament, de forma paral·lela a la recta.

Finalment, amb P-T es segueix tenint dispersió i s'observa com es té un núvol de punts homogeni i isòtrop sense cap direccionalitat en concret. La recta $y=x$ passa pel mig d'aquest núvol de punts implicant tenir una sobreestimació i una infraestimació dels valors de manera equitativa.

Per tant, tant P-M com la FAO sobreestimen en la majoria de valors estant una gran part d'ells per sobre de la recta $y=x$. P-T no s'allunya tant però dona valors molt dispersats i, MOST, és la que millor s'ajusta als valors mesurats proporcionant resultats que s'organitzen paral·lelament a la recta.

4. VALORS DIARIS

En aquesta secció, hem examinat el comportament que tenim per dades diàries calculant el valor mitjà d'evapotranspiració per a cada parametrització, obtenint així un valor diari d'ET.

L'estudi d'aquest apartat s'ha dividit en tres parts. Dins la primera, s'ha realitzat una taula semblant a la *taula 1* per veure els valors que obtenim d'evapotranspiració emprant les diferents parametritzacions. Aquesta taula està feta pels mateixos dotze dies d'abans per així observar el comportament amb diferents condicions meteorològiques.

Pel que fa a la segona part, s'han calculat els valors mitjans diaris de l'any 2021 pel mateix interval de temps de l'apartat 3.3, és a dir, del 15 de març de 2021 fins el 31 de desembre del 2021.

Finalment, a la darrera part, tenim uns gràfics per veure el comportament que té la variable α de P-T en funció d'algunes variables rellevants pel càlcul de l'evapotranspiració.

4.1 CASOS PARTICULARS

Per a la realització d'aquest apartat, hem fet el càlcul del valor d'evapotranspiració pels dotze dies anteriors. Per a obtenir els diferents resultats que exposarem a la *taula 2*, hem partit dels quaranta-vuit valors que obteníem de cada variable dins l'apartat dels valors semihoraris i hem realitzat una mitjana d'aquests valors i calculat P-T, P-M i la FAO. Per MOST s'ha calculat directament la mitjana dels quaranta-vuit valors d'ET.

A diferència del que passava pels valors semihoraris, a la taula 2 podem veure com MOST és la que més s'acosta als valors mesurats. Tant P-T, P-M i la FAO sobreestimen en la majoria de casos exceptuant quan estem dins del rang molt humit, on els valors estimats i mesurats sí s'assemblen bastant exceptuant els dies 15 de març del 2021 i 13 d'octubre del 2018 que estan sobreestimats.

	VWC (%)	ET _{mesurat} (W m ⁻²)	P-T (W m ⁻²)	α per P-T	P-M (W m ⁻²)		MOST (W m ⁻²)
			$\alpha=1$		MOST	FAO	
15 des.2018	30	25	3	1.61	18	25	40
24 març 2021	25	103	74	1.21	58	66	87
13 oct. 2018	24	109	70	1.31	159	224	67
15 març 2021	23	55	53	1.44	70	70	65
29 maig 2021	23	47	118	0.53	142	116	65
7 juny 2021	21	48	133	0.51	117	123	72
5 set. 2021	21	19	95	0.25	112	97	47
2 abril 2021	18	38	76	0.66	95	85	65
24 set. 2018	18	71	58	0.86	133	113	130
17 agost 2021	12	6	51	0.11	133	77	29
27 agost 2021	11	4	102	0.07	126	103	39
23 juliol 2021	10	17	108	0.17	226	127	32

Taula 2. Valors diaris d'evapotranspiració obtinguts pels dotze dies. Mateixa estructura que la taula 1 exceptuant que P-T només ho mirem per $\alpha=1$ i afegim una columna que és la dels valors de α segons P-T.

Podem veure com els valors de α per P-T van rebaixant el seu valor a mesura que el VWC disminueix. Aquest fet ocorre generalment per tots els dies excepte pel 2 d'abril del 2021 i pel 24 de setembre el 2018, on per aquests dies sí que tenim una pujada del valor de α respecte al dia anterior.

Un altre fet a comentar és que en molts dies situats dins del rang humit, les parametritzacions de P-T, P-M i la FAO sobreestimin inclús estant dins del seu domini d'aplicació. A més, podem veure com els dies situats en el rang sec és on menys s'assemblen els valors estimats respecte als mesurats per P-M, P-T i la FAO degut a no estar en la principal hipòtesis de les fórmules.

4.2 ANÀLISIS DELS VALORS MITJANS DIARIS

Els punts mostrats als gràfics de la figura 11 estan calculats de la mateixa forma que els de la **taula 2** i pels mateixos mesos de l'apartat 3.3, on ara aquests vendran donats per 291 punts (l'equivalent als dies que hi ha entre el 15 de març i el 31 de desembre del 2021).

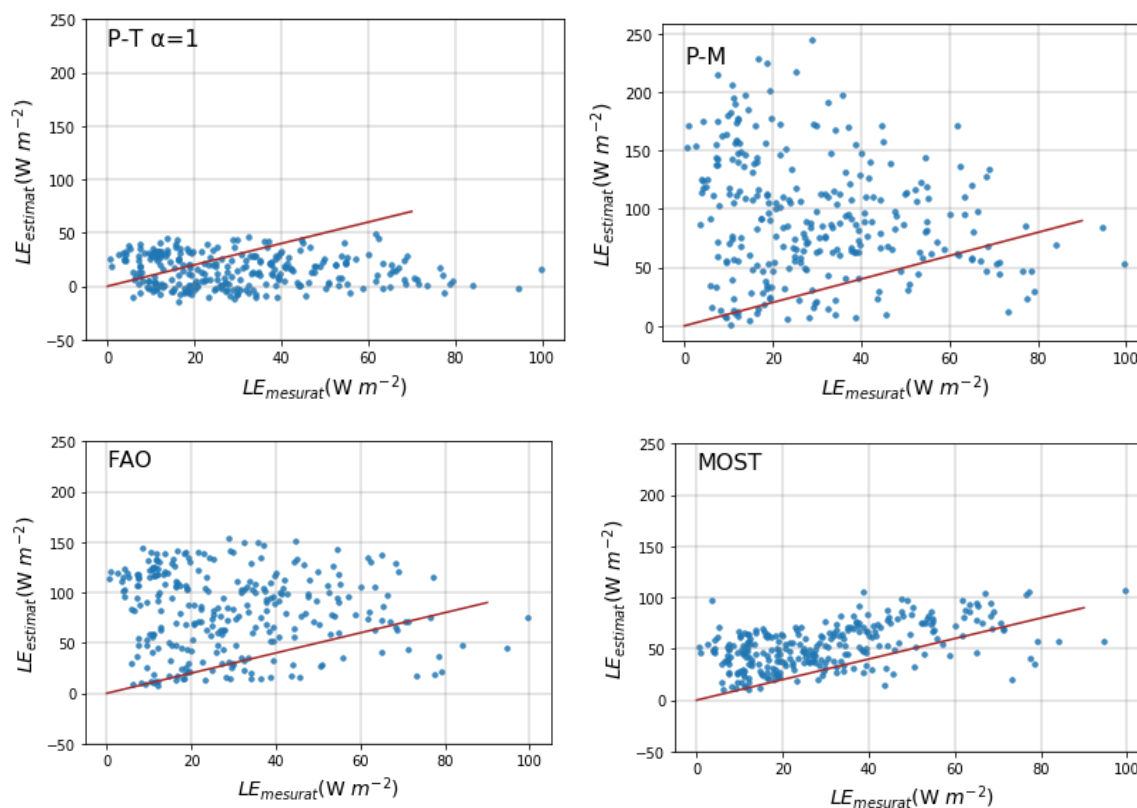


Figura 11. Valors mitjans diaris per a cada parametrització. A dalt a l'esquerra per P-T i a la dreta per P-M. Just davall a l'esquerra segons la FAO i a la dreta per MOST. La recta de color marró correspon a $LE_{mesurat}=LE_{estimat}$.

Des del punt de vista dels núvols de punts que conformen els gràfics de la figura 11, podem veure com s'assemblen als obtinguts a l'apartat 3.3. Ara bé, s'observa com el comportament per a cada parametrització és diferent.

Tant P-M com la FAO segueixen sobreestimant en la majoria de punts arribant a assolir valors de més de 200 W m^{-2} per P-M i valors propers als 150 W m^{-2} amb la FAO, quan els mesurats estan per davall de 80 W m^{-2} . Aquest fet el podem veure reflectit als gràfics perquè majoritàriament tots els valors estan situats per damunt de la recta $y=x$. Majoritàriament, una gran part dels punts sobreestimats que estan per sobre de la recta tenen un $VWC < 14\%$, el que implica tenir un sòl molt poc mullat i no estar al domini d'aplicació de les fórmules i tenir una gran diferència entre els valors estimats i mesurats.

Pel que fa P-T és veu diferent al cas de P-M perquè es pot observar que hi ha més valors infraestimats, situats davall de la recta. Encara així, tenim valors calculats que sí s'assemblen bastant als mesurats. Amb MOST, tenim que el comportament del núvol de punts és similar al dels valors semihoraris ja que la majoria d'ells estan disposats de forma paral·lela a la recta.

4.3 COMPORTAMENT DE LA α

Hem vist abans com P-M i FAO depenen únicament del valor que adopti cadascuna de les diferents variables que formen cada equació. Per exemple, quan hem realitzat el càlcul pel 23 de juliol de 2021 on teníem molta poca humitat al sòl, s'obtenien uns valors molt sobreestimats on aquests venien condicionats pels valors que adoptaven les diferents variables meteorològiques de cada parametrització. En canvi, amb P-T els resultats eren una mica diferents perquè la fórmula ve donada per un coeficient α davant l'energia disponible. Aquest coeficient permet realitzar un estudi de com es comporta la α al llarg de tot l'any i veure el seu comportament en funció d'algunes variables conegudes. Per aquesta raó, dins aquest apartat es veuen els valors que s'obtenen de α i s'analitza el seu comportament pel mateix període de temps que els valors mitjans diaris. Per a obtenir el valor de α per a cada dia de l'any, s'ha partit de l'equació (22) i s'ha aïllat el seu valor.

A la figura 12 a l'esquerra podem observar com tenim un doble comportament fins aproximadament el dia 158, que correspon al 7 de juny de 2021. Fins aquest dia, el valor de α disminueix a mesura que R_n va augmentant. A partir d'aquí, el terra s'escalfa prou com per seguir assecant i, per aquesta raó, α i VWC baixen de manera paral·lela i R_n canvia de pendent. Una de les variables a comentar és la humitat relativa (RH). A la figura 12 a la dreta, veiem com no es veu cap tendència dels seus valors a mesura que va passant el temps.

Si mirem els valors de α diaris en funció del temps observem com al començament del gràfic, durant l'època de primavera, tenim que tots els valors són majors a 1 fins que arribem al dia 100 (que correspon al 10 d'abril del 2021) quan els valors de α comencen a disminuir, estant aquests per sota de 1. A mesura que ens acostem al dia 200 (19 de juliol del 2021), aquests arriben a uns valors mínims tenint valors molt baixos per davall de 0.5 i molts d'ells en ple estiu per sota de 0.25, és a dir, que no es té suficient aigua evaporable. A partir del dia 250 (7 de setembre del 2021) torna a remuntar amb molta dispersió ja que VWC augmenta. Finalment, des del dia 300 fins els dia 365 (de novembre a desembre), els valors de α tornen a estar per damunt de 1 ja que durant aquests mesos el VWC està per sobre del 20% degut a les abundants pluges que es van tenir durant aquest període de temps.

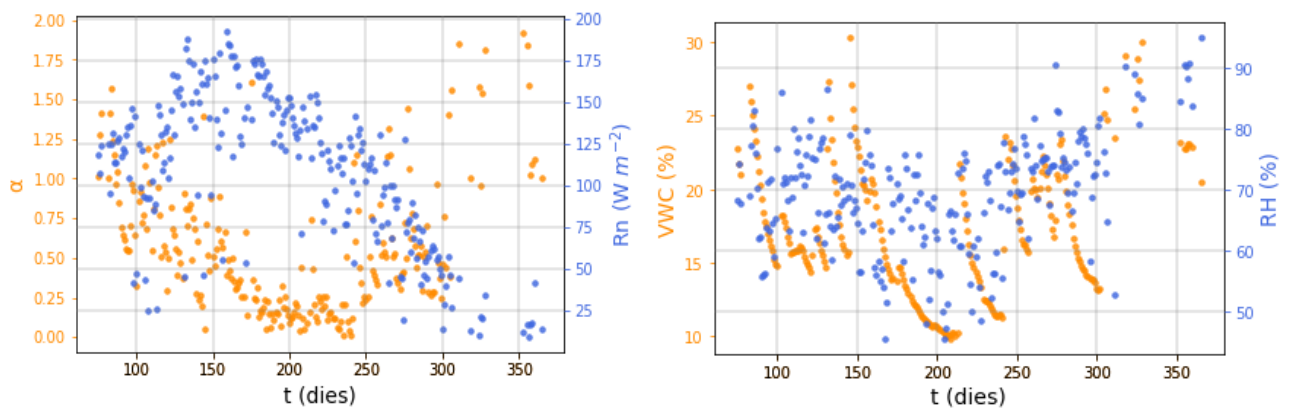


Figura 12. A l'esquerra veiem representats els valors de α durant deu mesos de l'any juntament amb els valors de R_n . A la dreta tenim reproduïts pels mateixos dies els valors del contingut volumètric d'aigua (VWC) i els de la humitat relativa (RH).

Com a darrers càlculs s'han realitzat diferents gràfics dels valors de α diaris obtinguts en funció de diferents variables meteorològiques. A la figura 13 a dalt a l'esquerra, podem veure com es té molta dispersió dels valors de α respecte la R_n , sense tenir cap tendència en particular. També es pot destacar que els valors de α són més petits que 1 quan $R_n > 140 \text{ W m}^{-2}$, fet que no ocorre quan $R_n < 140 \text{ W m}^{-2}$ ja que, per aquest cas, els valors de α oscil·len essent aquests més grans o més petits que 1.

A la figura 13 a dalt a la dreta, sí que es veu certa tendència lineal quan el VWC està dins del rang humit entre el 14%-19%. Aquest fet ens indica que el contingut volumètric d'aigua podria ser la variable més important dins aquest règim. Per valors de VWC per sota de 14% i per sobre de 19%, perdem completament aquesta linealitat.

Finalment, a la figura 13 a sota es veu com per davall del 60% d'humitat relativa de l'aire, el valors de α presenten una certa dependència amb RH on aquests són menors de 0.5. Quan $RH > 60\%$, tenim un canvi dels valors de α sense cap tendència ja que aquests van variant de manera significativa.

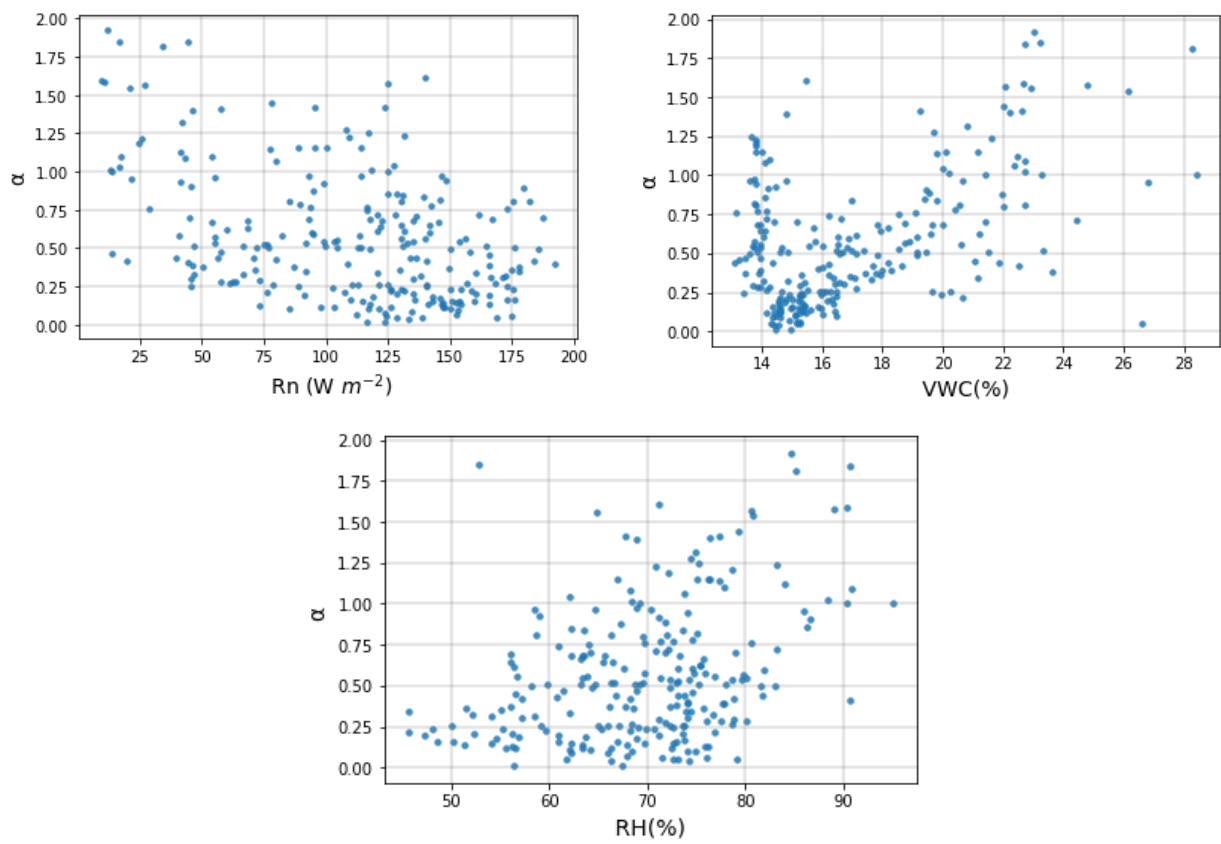


Figura 13. Gràfics dels valors de α diaris en funció de diferents variables. A la figura a dalt l'esquerra ho tenim pintat en funció de R_n i a la de la dreta en funció de VWC . Just davall d'aquests dos respecte de RH .

5. CONCLUSIONS

La realització d'aquest treball ha servit per obtenir una visió de com es comparen els valors obtinguts d'ET a escala semihorària i diària per cada parametrització respecte als mesurats a l'estació ECUIB. Pels casos estudiats, s'ha vist com P-M i la FAO sobreestimaven generalment tots els valors ja que la condició de tenir un sòl molt banyat rarament es compleix pel clima de Mallorca.

La parametrització de MOST ha estat la més consistent mantenint una certa correlació amb els valors mesurats. Segons els resultats obtinguts, sembla que MOST proporciona majors sobreestimacions quan es té un sòl molt banyat, fet contrari al que ocorre amb P-M. Per aquesta raó, MOST ha presentant un comportament similar a les dades mesurades ja que les condicions de saturació del terra a penes es donen Mallorca i, al tenir majoritàriament un sòl més sec, ha implicat tenir aquesta semblança dels valors estimats amb els mesurats.

L'estudi de P-T mostra la necessitat d'ajustar el coeficient de proporcionalitat α per obtenir un bon comportament de les dades, on aquest presenta una tendència lineal amb VWC quan el sòl es troba en un rang humit. Un punt interessant seria ajustar el valor de α per tots els dies de l'any. Aquest estudi segurament proporcionaria més linealitats amb altres variables meteorològiques, a part de l'obtinguda dins aquest treball.

Com a darrera conclusió, reincidir en el fet que els resultats obtinguts es podrien distribuir en diferents categories i queda com a treball futur, veure el comportament dels anàlisis mitjans semihoraris i diaris estant en un sòl humit, saturat i sec.

6. AGRAÏMENTS

Aquest treball no hagués estat possible sense el suport d'altres persones a les que vull agrair-ne l'ajuda. A la co-tutora d'aquest treball Belén Martí López per la seva inestimable ajuda en tots els àmbits del treball, al tutor, el Dr. Joan Cuxart, per la seva col·laboració i implicació al TFG i al Dr. Daniel Martínez, a càrrec de l'ECUIB i de la seva base de dades.

També agrair a la meva família el suport transmès i la oportunitat de fer aquest treball amb la tranquil·litat de saber que compto amb el seu ajut i a la meva parella que ha suposat ser un suport sempre que l'he necessitat.

REFERÈNCIES

- [1] J.Cuxart and A.A.Boone (2020). Evapotranspiration over Land from a Boundary-Layer Meteorology Perspective.
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10546-020-00550-9>
- [2] Arnold F.Moene, Jos C. Van Dam (2014). Transport in the Atmosphere-Vegetation-Soil Continuum.
- [3] Parri González, Antonio (2019). Procesos de transporte de agua en el interfaz superficie-atmósfera: estudio experimental y numérico.
<https://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/149783>
- [4] Martí López, Belén (2018). Design and data validation of a low-cost tethered balloon sounding system.
<https://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/149303>
- [5] Clima i temps a Mallorca.
<https://www.mallorca.org/es/tiempo-viaje-clima.html>
- [6] FAO Penman-Monteith equation.
<https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e06.htm#formulation%20of%20the%20penman%20monteith%20equation>
- [7] Temperatura virtual.
https://glossary.ametsoc.org/wiki/Virtual_temperature
- [8] Albedo.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Albedo#:~:text=El%20albedo%20es%20el%20porcentaje,radiaci%C3%B3n%20que%20incide%20sobre%20ella.&text=Es%20una%20medida%20de%20la,aprovechada%20para%20calentarlo%20es%20m%C3%ADnima>
- [9] Agustí Jansà (2014). El clima de les Illes Balears.
- [10] LI-COR. Sistmas Eddy-Covariance: Resultados de flujo totalmente procesados en su sitio de estudio.
<https://www.licor.com/documents/upvz5oa7d36opa7mjfw1vtgrqoi05whi>
- [11] González Piqueras, J., Villodre, J., Campos, I., Calera, A., Balbontín, C. (2014). Seguimiento de flujos de calor sensible y calor latente en vid mediante la aplicación del balance de energía METRIC.
https://www.researchgate.net/publication/281362500_Seguimiento_de_los_flujos_de_calor_sensible_y_calor_latente_en_vid_mediante_la_aplicacion_del_balance_de_energia_METRIC

[12] Pressió de vapor. https://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_de_vapor

[13] J.Cuxart, L.Conangla, M.A.Jiménez (2015). Evaluation of the surface energy budget equation with experimental data and the ECMWF model in the Ebro Valley.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014JD022296>

[14] Roland B.Stull (1950). An introduction to Boundary Layer Meteorology.

[15] Longitud d'Obukhov.
https://glossary.ametsoc.org/wiki/Obukhov_length#:~:text=A%20parameter%20with%20dimension%20of,consumption%20of%20turbulence%20kinetic%20energy.