

Penilaian umum pemodelan evapotranspirasi harian TSEB-PT berbasis Sentinel-2 dan Sentinel-3 di Jawa Timur

Ahmad Ridho Nugroho, Ike Sari Astuti*, Sugeng Utaya

Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5 Malang, Jawa Timur, 65145, Indonesia

*Penulis korespondensi, Surel: ike.sari.fis@um.ac.id

Paper received: 14-03-2023; revised: 21-04-2023; accepted: 09-05-2023

Abstract

The Sentinel-2 and Sentinel-3 constellations provide options to complement the use of open source satellites data (Modis and Landsat) through the advantages of spatial and temporal resolution to monitor terrestrial ecosystems, one of which is evapotranspiration. Recently, Guzinski developed a daily evapotranspiration estimation methodology (ETd) which combines the roles of these two satellites with several models and TSEB-PT becomes the model with the best accuracy for EC sites on their study areas. This research is intended to assess the performance of TSEB-PT in general to be applied in East Java (Indonesia) which has different climates and landscapes using the same methodology as Guzinski. Some experimental parameterizations were also used outside of the standard operational mode, including the resistance model, and ETi to ETd extrapolation method. Our study found that the model worked well in Juanda site and was applied in other areas but did not work as well as in Juanda. The Rsl from ECMWF reanalysis data had the most significant role in producing errors, causing high average bias error in ET estimation of ~ 2 mm/day. Landscape also affects the model performance, although in low to medium scale, whereas the model tends to work very well on homogeneous lowland landscape but the accuracy would drop on mountainous area as the cloud cover probability increased resulting the higher error chance on ETi to ETd extrapolation stage.

Keywords: evapotranspiration; Two Surface Energy Balance (TSEB); remote sensing; Sentinel-2; Sentinel-3

Abstrak

Konstelasi Sentinel-2 dan Sentinel-3 memberikan opsi untuk melengkapi penggunaan data satelit open source (modis/landsat) melalui keunggulan resolusi spasial dan temporal untuk monitoring ekosistem terestris, salah satunya evapotranspirasi. Baru-baru ini Guzinski mengembangkan metodologi estimasi evapotranspirasi harian (ETd) yang menggabungkan peran kedua satelit ini dengan beberapa model kesetimbangan energi dan TSEB-PT menjadi model dengan akurasi paling baik terhadap situs EC di beberapa wilayah studinya. Artikel ini dibuat untuk menilai kinerja TSEB-PT secara umum ketika diterapkan di Jawa Timur yang berbeda secara iklim dan lanskapnya menggunakan metodologi yang sama Guzinski. Beberapa pengaturan yang berbeda dengan mode operasional model dijalankan antara lain model resistans dan proporsi nilai G serta tiga metode ekstrapolasi ETi ke ETd. Studi kami menemukan bahwa model bekerja baik pada stasiun Juanda dan memiliki kelayakan untuk diterapkan di wilayah lain meskipun tidak sebaik di Juanda. Masalah utama dan paling signifikan disemua stasiun pada temuan kami ada pada input data Rsl yang berpengaruh pada tingkat kesuksesan pemodelan serta bias error yang cukup tinggi (~ 2 mm/hari). Bentang lahan juga berpengaruh pada tingkat rendah-menengah pada performa model dimana wilayah homogen cenderung memiliki tingkat keberhasilan yang tinggi, serta wilayah dengan potensi frekuensi tutupan awan tinggi seperti pegunungan berisiko pada penurunan akurasi pada tahap ekstrapolasi ETi ke ETd.

Kata kunci: evapotranspirasi; *Two Surface Energy Balance* (TSEB); remote sensing; Sentinel-2; Sentinel-3

1. Pendahuluan

Perhitungan Evapotranspirasi (ET) yang akurat dan berdimensi spasial perlu untuk dikaji sejalan dengan peningkatan populasi dan kebutuhan ekonomi secara global maupun di tingkat nasional yang menekan ketersediaan sumber daya air tawar dan persediaan bahan makanan. Pemetaan ET telah dimanfaatkan pada berbagai bidang seperti yang dirangkum didalam Anderson et al. (2012) dimana bidang tersebut berhubungan langsung dengan poin-poin didalam agenda pembangunan berkelanjutan (SDGs) yaitu Goal 2: mengakhiri kelaparan melalui pertanian yang berkelanjutan, Goal 6: air bersih dan sanitasi, Goal 13: Perubahan iklim serta dampaknya, dan Goal 15: keberlanjutan ekosistem terestris.

Pemodelan ET dengan data penginderaan jauh dari teknologi satelit yang dapat diakses secara gratis oleh publik telah secara luas dikembangkan dan diteliti, mulai skala global-regional hingga skala lapangan dengan MODIS (Mu et al., 2007; Mu et al., 2011; Rasmussen et al., 2014), dan landsat (Sanchez et al., 2008; Senay et al., 2016; Elnmer et al., 2019; Bosquilia et al., 2018), maupun fusi dari beberapa produk citra (Bindhu et al., 2013; Huang et al., 2019). Hal ini tidak terlepas dari kebutuhan akan data yang berdimensi spasial yang tidak bisa didapatkan dari data berbasis pengukuran lapangan/stasiun pengamatan. Namun demikian permasalahan klasik dari data satelit open source tersebut adalah pada resolusi temporal dan spasialnya. Produk baru Sentinel-2 dan Sentinel-3 dari *European Space Agency* (ESA) telah membuka opsi baru yang dapat dipertimbangkan untuk digunakan didalam pemodelan ET dengan resolusi spasial dan temporal yang lebih baik dari kedua produk sebelumnya.

Project Sen-ET (<https://www.esa-sen4et.org/>) berusaha mengembangkan metodologi yang tepat untuk menghitung evapotranspirasi aktual (ETa) skala spasial tinggi (10–20m) dengan memanfaatkan pengamatan sinergis dari citra Sentinel-2 dan Sentinel-3. Konstelasi satelit Sentinel memiliki keunggulan pada resolusi temporal, dimana 5 hari untuk Sentinel-2 (2A dan 2B) dan <2 hari untuk sentinel-3 SLSTR, keduanya lebih unggul dibandingkan Landsat 8 dan Modis MOD16 yang masing-masing adalah 8 hari dan 16 hari. Dari segi resolusi spasial, sensor optik Sentinel adalah 10-60m (tergantung band) dibandingkan dengan Landsat 8 (30m) dan Modis MOD16A (500m-1000m). Meskipun sensor thermal yang dimiliki Sentinel 3 sangat kecil (1000m) namun penggunaan sinergi dengan sensor optik Sentinel 2 memungkinkan untuk dilakukan penajaman pada data LST (hingga puluhan meter) sebelum dipakai untuk perhitungan fluks dan pendekatan ini terbukti bisa diandalkan untuk mengatasi keterbatasan resolusi spasial sensor thermal Sentinel-3, walaupun tidak dapat menggantikan peran keseluruhan dari sensor thermal resolusi tinggi (Guzinski & Nieto, 2019). Karakteristik resolusi spasial dan temporal yang dimiliki Konstelasi Sentinel berpotensi menjadi alternatif untuk menggantikan dan/atau melengkapi penggunaan Landsat dan Modis MOD16 yang selama ini sering dipakai didalam berbagai penelitian dan aplikasi. Hal ini searah sesuai karakteristik dari fluks air (misal: Evapotranspirasi) dan fluks energi (misal: *latent Heat* dan *Sensible Heat*) yang memiliki variasi spasio-temporal tinggi karena selain dipengaruhi oleh kondisi meteorologis juga karakteristik properti permukaan yang meliputi suhu, penutupan lahan, biomasa vegetasi dan kesehatannya.

Two Surface Energy Balance Priestley-Taylor (TSEB-PT), yang dikembangkan pertama kali oleh Norman et al. (1995) dan beberapa improvisasi oleh Kustas and Nornam (1999) menjadi model dengan akurasi yang paling baik dibandingkan jenis model lainnya yang telah diuji dengan data Sentinel pada beberapa menara Eddy Covariance (tabel 1: Guzinski et al., 2020). Hanya saja, 11 menara Eddy yang digunakan di penelitian tersebut tidak meliputi

kondisi iklim yang ada di Indonesia yang sebagian besar adalah tropis basah dan porsi kecil untuk tropis kering. Selain itu, standar instrument pengukur parameter cuaca dan iklim yang dipakai di Indonesia (dalam hal ini yang dioperasikan oleh BMKG) berbeda dengan menara Eddy Covariance (EC) yang digunakan didalam penelitian tersebut. Fakta lain adalah studi mengenai produk Sentinel untuk evapotranspirasi, secara spesifik di dalam negeri, masih belum ada. Oleh karenanya didalam penelitian ini kami akan mengkaji bagaimana kinerja TSEB-PT untuk menghitung ET berdasarkan standar perhitungan data BMKG.

Berangkat dari hasil studi Guzinski et al. (2020) artikel ini dibuat untuk dua tujuan, yakni pertama memberikan informasi performa serta analisis error model TSEB-PT dalam memperkirakan evapotranspirasi harian pada kondisi iklim Indonesia yang sebagian besar adalah tropis lembab. Iklim tropis dengan durasi pembagian musim yang panjang (~6 bulan masing-masing) menjadi tantangan tersendiri dalam bidang penginderaan jauh, terutama saat musim angin muson barat di Indonesia berpotensi memiliki frekuensi tutupan awan yang tinggi dan berakibat kepada ketersediaan data yang buruk sehingga pada tujuan kedua dari penelitian ini adalah penilaian terhadap penerapan gap-filling pada hari-hari kosong tersebut. Titik studi berfokus di stasiun pengamatan Juanda-Surabaya dengan tutupan lahan dominan disekitar situs adalah lahan terbangun dan lapangan rumput yang luas disela-selanya. Situs Juanda dipilih sebagai situs utama karena kondisi lingkungan tutupan lahanya sejalan dengan kriteria ETo (data pengamatan in-situ) yang diasumsikan valid pada kondisi tanaman acuan rumput untuk meminimalisir error dari dua pendekatan yang berbeda. Sebagai tambahan, tiga titik situs pengamatan dari tutupan lahan dan ketinggian tempat yang berbeda akan digunakan dalam studi ini sebagai pembanding dan menggali potensi dari model untuk diterapkan pada kriteria wilayah yang lebih heterogen, yakni stasiun Geofisika Pasuruan, Klimatologi Malang dan Geofisika Malang.

2. Metode

2.1. Deskripsi ringkas model

2.1.1. BMKG-ETo

Data klimatologi BMKG didesain untuk perhitungan Evapotranspirasi tanaman acuan (ETo), yaitu tanaman rumput dengan kriteria kebutuhan airnya terpenuhi. Standar perhitungan ET yang ditetapkan oleh Badan Standarisasi nasional tertuang pada dokumen SNI 7745:2012 menggunakan metode FAO dengan basis persamaan Penman-Monteith (Allen et al. (1998):

$$ET_0 = \frac{k\omega(R_n - G) + \beta \frac{m}{T+273} u_2 (VPD)}{\omega + \beta(1 + nu_2)} \quad (1)$$

k, m, n adalah konstant 0.408, 900, dan 0.34 secara berurutan. ω adalah kurva tekanan uap air terhadap suhu ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), R_n adalah Net Radiasi matahari ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$), β adalah konstanta psikometrik ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), rata-rata suhu udara (T, $^\circ C$) dan kecepatan angin (u_2 , $m \text{ s}^{-1}$) masing-masing diukur pada ketinggian 2m, ϵ_s dan ϵ_a adalah tekanan uap jenuh dan tekanan uap aktual (kPa) serta $VPD = \epsilon_s - \epsilon_a$. Fluks panas pada tanah (G) umumnya bernilai sangat kecil dibawah tutupan rumput, sehingga diabaikan ($G = 0$).

2.1.2. TSEB-PT

Two Surface Energy Balance (Norman et al., 1995) menggunakan data direksional LST (observasi sudut pandang tunggal, $T_R(\theta)$) untuk memperkirakan komponen fluks energi. Didalam model ini $T_R(\theta)$ dianggap gabungan antara suhu permukaan kanopi (T_C) dan tanah (T_S), melalui persamaan linear campuran sederhana Stephan-Boltzman antara radiasi dan suhu, keduanya dapat dicari menggunakan:

$$T_R(\theta) \approx [f(\theta)T_C^n + (1 - f(\theta))T_S^n]^{1/n} \quad (2)$$

Dimana $f(\theta)$ adalah nilai fraksi vegetasi yang ditangkap oleh sensor pada sudut θ , dan $n \sim 4$. Energi *Balance* diekspresikan seperti pada (3), dengan kedua komponen suhu diketahui maka komponen sistem fluks energi permukaan bisa dihitung secara terpisah antara permukaan kanopi dan tanah (4, 5) :

$$R_N \approx H + LE + G \quad (3)$$

$$R_{N,C} \approx H_C + LE_C \quad (4)$$

$$R_{N,S} \approx H_S + LE_S + G \quad (5)$$

Subscript "c" dan "s" merujuk pada kanopi (Canopy) dan permukaan tanah (Soil). LE, yaitu energi yang akan dikonversikan menjadi ET, dihitung sebagai residu dari sistem fluks energi setelah R_N , H, dan G diketahui. Transfer panas masing-masing komponen dengan atmosfer (H_C , H_S) dimodulasi oleh variabel resistans (hambatan, analogi yang sama didalam sistem kelistrikan) yang bergantung terhadap kondisi meteorologi dan pergerakan udara (aerodinamis). Dua skema jaringan resistans yaitu 'Parallel' (Norman et al., 1995) dan 'Series' (Norman et al., 1995) yang dipakai secara default pada Sen-ET. Jaringan Series mengasumsikan bahwa terdapat interaksi antara fluks panas vegetasi dengan permukaan tanah melalui ruang udara kanopi (T_{AC}). Karena hal ini didalam konfigurasi Series terdapat tiga resistans yaitu aerodinamik resistans R_A (Kustas & Norman, 1999) , resistans di lapisan batas dekat kanopi R_x (Norman et al., 1995), dan resistans terhadap aliran panas di lapisan atas dekat permukaan tanah R_s (Norman et al., 1995). Kemudian setelah resistans diketahui, H dapat dihitung dengan persamaan A.1-A.3 didalam Norman et al. (1995).

Persamaan Linear (3.a) memerlukan salah satu komponen suhu permukaan (T_C atau T_S) untuk diketahui. Norman et al (1995) menggunakan model Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972) untuk menghitung LE_C tahap inisial, yang mengasumsikan tanaman bertranspirasi pada laju potensial:

$$LE_C = \alpha_{PT} f_g \frac{\omega}{\omega + \beta} R_{N,C} \quad (6)$$

Koefisien Priestley-Taylor (α_{PT}) bernilai 1.26 secara default untuk bagian kanopi hijau (f_g) dan dapat diturunkan secara bertahap pada proses iterative ketika nilai LE_S (yang dihitung sebagai residual energi) < 0 . Tahap inisial (6) memungkinkan H_C untuk dihitung melalui sistem persamaan 3.c ($H_C = R_{N,C} - LE_C$), kemudian T_C dengan persamaan A.2 Norman et al (1995) dan T_S menggunakan 3.a.

Untuk penjelasan lebih lengkap mengenai model TSEB-PT, pembaca diarahkan langsung ke sumber rujukan utama Norman et al. (1995) dan Kustas dan Norman (1999). Untuk basis teori implementasi model dengan data Sentinel bisa ditemukan di jurnal publikasi Guzinski dan Nieto (2019) dan Guzinski et al. (2020), serta dokumen project Sen-ET bisa didapatkan dan dipelajari di laman <https://www.esa-sen4et.org/outputs>.

2.2. Lokasi Studi (situs validasi)

Penelitian ini melibatkan 4 titik situs stasiun pengamatan BMKG yang berada di Provinsi Jawa Timur (lihat tabel 1) pada tanggal 2019/01/01 hingga 2019/12/31. Dengan ketersediaan air melimpah dan karakteristik cuaca yang ditampilkan di Tabel.1 berdampak terhadap tingginya evapotranspirasi yang terjadi pada wilayah ini.

Tabel 1. Situs validasi dan lokasinya. Karakteristik parameter cuaca adalah rata-rata harian yang diperoleh dari data pengamatan BMKG selama tahun 2019 yaitu: Ta (suhu min/max °C), kecepatan angin (m/s), RH (kelembapan %), CH(curah hujan mm), SS (penyinaran jam)

Stasiun (kode)	Altitude(m)	Karakteristik parameter cuaca					Lokasi
		Ta	angin	RH	CH	SS	
St. geo. Pasuruan (GPAS)	832	17.9/28.3	0.67	83	2320	1301	Kab. Pasuruan, Jatim lat: -7.70456 long: 112,63533
St. klimat. Malang (KMLG)	590	19.6/27.2	1.70	77	1774	2469	Kab. Malang, Jatim lat: -7.9008 long: 112.5979
St. met. Juanda (JD)	3	25.0/33.2	2.86	75	1865	2480	Kab. Sidoarjo, Jatim lat: -7.3846 long: 112.7833
St. geo. Malang (GMLG)	285	22.1/29.0	1.14	80	1541	2480	Kab. Malang, Jatim lat: -8.15 long: 112.45

Letak masing-masing stasiun pengamatan bervariasi, dimana GMLG terletak di area terbangun dan dekat dengan tubuh air berupa bendungan, sedangkan KMLG berada di area pertanian (sawah), untuk GPAS berada di dekat pemukiman dan area hutan tipikal pegunungan, dan JD berada di dekat bandara yang dominan tanah lapang dan rumput dan laut di sebelah timurnya.

Gambar lokasi studi disajikan pada Gambar 1. (B-E) adalah detail titik stasiun secara berurutan Selatan ke Utara mulai dari GMLG, KMLG, GPAS dan JD. Titik merah adalah lokasi penempatan alat parameter iklim BMKG. Grid berwarna putih adalah posisi pixel Sentinel-2 dengan resolusi 20m. Untuk stasiun KMLG dan JD karena dalam satu taman alat bisa diliput oleh lebih dari satu pixel maka masing-masing pixel akan dipisah ketika penilaian, yakni: K1, K2, K3, K4, J1 dan J2.



Gambar 1. Lokasi Studi di Provinsi Jawa Timur

2.3. Sumber Data

2.3.1. Data BMKG

Enam Parameter iklim yang digunakan yaitu suhu udara minimum (T_{min}), suhu udara maksimum (T_{max}) dan rata-rata suhu udara (T_{avg}) dalam satuan $^{\circ}C$, rata-rata kelembapan relatif (RH_{avg} %), lama penyinaran (jam), dan rata-rata kecepatan angin (ms^{-1}). Semua parameter tersedia dalam skala harian dan bisa diakses secara gratis di dataonline. [bmkg.go.id/home](https://dataonline.bmkg.go.id/home).

2.3.2. Data Satelit dan Pra-Pemrosesan

Total 78 produk Sentinel-2A dan 2B L1C (path 49MFM) dan 250 produk Sentinel-3B LST L2 diinventarisasi dari Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu>). Produk L1C masih berupa Top of Atmosphere (TOA) dan perlu untuk dikoreksi ke Bottom of Atmosphere (BOA) reflectance (L2A). Tugas ini dilakukan dengan menggunakan Sen2Cor atmospheric correction processor (Louis et al., 2016) v.2.9 dengan konfigurasi bawaan. Selanjutnya 13 band L2A di sampel ulang ke resolusi 20m sesuai dengan resolusi asli band red-edge dan Shortwave-infrared yang kemudian digunakan untuk memperoleh parameter biofisik menggunakan

Biophysical Processor yang tersedia didalam aplikasi SNAP v8.0.0. Parameter biofisik selanjutnya akan digunakan untuk memperoleh nilai reflectance dan transmittance vegetasi dan fraction green, masing-masing menggunakan processor yang tersedia di Sen-ET plugin: "Estimate leaf reflectance and transmittance" dan "Estimate fraction of green vegetation".

Sentinel-3 memiliki cover area, resolusi dan proyeksi yang berbeda dengan Sentinel-2, sehingga pemrosesan tahap awal data meliputi proyeksi ulang, resampling, dan subset ke ukuran dan proyeksi Sentinel-2 untuk produk data geometri. Kemudian untuk mendapatkan Sentinel-3 LST dalam resolusi tinggi penajaman dilakukan dengan menggunakan metode Data Mining Sharpener diprakarsai oleh Gao et al. (2012) yang kemudian diaplikasikan oleh Guzinski & Nietto (2019) dan Guzinski et al. (2020) dengan memakai Sentinel-2 dan Digital Elevation Model (DEM). Semua proses diatas dilakukan melalui Sen-ET plugin operator yang tersedia yaitu: "Warp to template" dan "Sharpen LST", output dari proses ini adalah LST resolusi tinggi (20m / sesuai dengan input Sentinel-2 yang dipilih)

2.3.3. Data Tambahan

Data tambahan meliputi semua parameter yang dibutuhkan didalam pemodelan TSEB-PT yang tidak bisa didapatkan melalui produk satelit. Dengan sumber dan prosedur yang sama dengan yang dipakai didalam Guzinski et al., (2020), data-data tersebut adalah SRTM DEM, tutupan lahan CCI-LC (Bontemps et al., 2013), dan data meteorologi reanalisis ECMWF-ERA5. Dengan parameter biofisik yang telah tersedia dan data tutupan lahan dari CCI-LC kemudian parameter struktur vegetasi (tinggi tanaman dan struktur daun) ditentukan. Bersama data struktur vegetasi dan biofisik parameter aerodynamic roughness bisa diperoleh. Seluruh proses dijalankan melalui Sen-ET plugin operator yaitu: "Produce maps of vegetation structural parameters" dan "Estimate aerodynamic roughness". Untuk data ECMWF meliputi suhu udara (ketinggian 2m), suhu dew point (ketinggian 2m), kecepatan angin (ketinggian 100m), tekanan uap, radiasi matahari, dan rata-rata harian radiasi matahari. Karena resolusi yang sangat kasar dari data suhu udara dan kecepatan angin ECMWF (puluhan kilometer) data tersebut diasumsikan lebih tepat untuk mempresentasikan kondisi diatas 100m daripada untuk mempresentasikan kondisi 2m diatas permukaan, oleh karena itu kondisi 100m dihitung dari data 2m yang ada, dan proses ini dapat dilakukan menggunakan Sen-ET plugin operator "Prepare ERA5 reanalysis data" dengan output akhir adalah data resolusi tinggi meteorologi yang mempresentasikan 100m diatas permukaan tanah. Tanggal dan jam dari data meteorology ECMWF akan disesuaikan dengan tanggal dan jam pengamatan Sentinel-3.

2.3.4. Konfigurasi Pemodelan Fluks TSEB-PT dan Outputnya

Semua teori pemodelan fluks TSEB-PT diimplementasikan melalui program python yang bisa didapatkan gratis secara online (<https://github.com/hectornieto/pyTSEB>, terakhir diakses pada 08/02/2022). Secara default data yang digunakan untuk pemodelan oleh Sen-ET meliputi semua data yang dirangkum pada sub-bab 2.3.2 – 2.3.3 dengan konfigurasi menggunakan model resistance RX dari Norman et al. (1995) dan RS dari Kustas et al. (1999). Selanjutnya G dihitung berdasarkan rasio Rns (0.35Rns). Menggunakan data yang sama untuk penelitian ini kami menjalankan model dengan konfigurasi default Sen-ET ditambah dengan beberapa eksperimen dengan opsi lain yang tersedia didalam script pyTSEB pada pemodelan resistans RX dan RS yaitu model Choudhury & Monteith (1988) dan McNaughton & Van Den Hurk (1995). Selain model resistans, eksperimen juga dipakai pada variabel G, dengan asumsi

tutupan lahan rumput rapat pada titik stasiun pengamatan lapangan yang berada pada 1 pixel maka nilai G konstan (0) akan dipakai sebagai ganti dari ratio R_{ns} . Selain itu konfigurasi tambahan didasarkan pada input data tambahan (ancillary) yang meliputi parameter fisik vegetasi yang disesuaikan kondisi taman alat BMKG yakni $h_C = 0.1$ m, $fc = \sim 1.0$, $lw = 0.02$ m, $X_{ld} = 0.5$, dan $w_C = 1.0$ sesuai kriteria tanaman rumput taman alat BMKG.

Penajaman LST Sentinel-3 membutuhkan data reflectance Sentinel-2, dimana tanggal observasi keduanya tidak harus sama dan bisa berjarak dengan maksimal perbedaan 10 hari. Pemodelan fluks dilakukan di setiap tanggal observasi Sentinel-3 LST dengan alasan suhu permukaan lebih dinamis daripada parameter fisik tumbuhan seperti LAI, tinggi tanaman, dsb, yang didapatkan melalui pengamatan Sentinel-2 dan data tambahan. Pemodelan fluks akan memiliki resolusi yang sama dengan resolusi Sentinel-2 (20m), dengan output utama fluks instantenous antara lain adalah Net radiasi (R_{Ni}), Sensible Heat (H_i), Latent Heat (LE_i) dan Ground Heat (G_i), masing-masing dengan satuan $W\ m^{-2}$.

2.4. Ekstrapolasi Evapotransporasi Harian

Metode Evaporative fraction (7) oleh Shuttleworth et al. (1989) dan Sugita & Brutsaert (1991) dipakai untuk merubah fluks instantenous ke ET didalam studi ini, dan 3 metode ekstrapolasi (8-9) untuk merubah ET instantenous ke ET harian.

$$EF = LE_i / (R_N - G)_i \quad (7)$$

Dengan EF adalah Evaporative fraction, LE_i adalah Latent Heat instantenous atau output dari pemodelan fluks pada 3.b ($LE_i = R_{ni} - H_i - G_i$). $(R_n - G)_i$ adalah energi yang tersedia pada waktu pengamatan.

$$ETd_1 = (EF(R_N)_d) \times (cf/\lambda\rho_w) \quad (8)$$

$$ETd_2 = (LE_i(R_N)_i) \times (R_N)_d \times (cf/\lambda\rho_w) \quad (9)$$

Dengan subscript "d" adalah harian dan "i" adalah instantenous, cf adalah unit konversi waktu = $86400\ s\ d^{-1}$, λ adalah latent heat of vaporization, $MJ\ kg^{-1}$ (Allen et al., 1998), dan $\rho_w = 10^3\ kg\ m^{-3}$ adalah kerapatan air di udara. ETd_1 dan ETd_2 adalah variasi dari metode *constant evaporative*, dimana pada ETd_1 nilai fluks G harian diabaikan, metode ini dipikih karena dari beberapa penelitian salah satunya Allen et al. (1998) nilai G harian cenderung bernilai 0. Pada ETd_2 selain mengabaikan nilai G harian, G instantenous juga diabaikan (Chávez et al., 2008). Karena R_{Nd} ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) tidak tersedia didalam dataset pengolahan Sen-ET, maka data ini diperoleh dari data pengamatan BMKG terdekat (menggunakan jam penyinaran atau suhu minimum dan maksimum jika tidak tersedia) yang kemudian dihitung berdasarkan persamaan (40) Allen et al. (1998). Pengerjaan R_{Nd} dilaksanakan menggunakan *open source code python pyETo* yang bisa diakses di <https://github.com/woodcrafty/PyETo>.

Metode ekstrapolasi ketiga menggunakan prosedur Jackson et al (1983) yang juga digunakan secara default didalam Sen-ET. Metode ini didasarkan pada asumsi bahwa nilai ET kurang-lebih proporsional dan berkorelasi terhadap nilai radiasi matahari (R_{si}) yang diterima permukaan.

$$ET_i = LE_i \times (cf/\lambda\rho_w) \quad (10)$$

$$ETd_3 = \frac{(R_{sl})_d}{R_{sl}} \times ET_i \quad (11)$$

Dengan R_{sl} adalah instantenous radiasi matahari dan R_{sd} adalah rata-rata radiasi matahari harian kondisi hari cerah. Kedua data ada didalam dataset ECMWF Sen-ET.

2.5. Metode Gap-Filling

Metode nearest-evaporative-fraction digunakan pada penelitian ini, yakni data ET harian dihitung dengan input fluks pemodelan terdekat dari tanggal yang kosong. Metode yang sama juga diterapkan oleh Chen et al. (2020) pada pemodelan skala global dan memberikan hasil yang bagus dibandingkan tanpa gap-fill. Prosedur reanalisis dua arah mungkin untuk diterapkan namun penelitian ini hanya mensimulasikan pada penggunaan operasional normal sehingga hanya data fluks tanggal yang telah berlalu saja yang akan dipakai untuk mengisi kekosongan, sedangkan fluks tanggal didepan tanggal kosong tidak akan digunakan.

2.6. Skema Pengujian dan Analisis Statistik

Pemodelan TSEB-PT pada studi ini hanya akan mengambil pixel dimana taman alat observasi BMKG berada (gambar 1 B-E), dengan asumsi bahwa satu pixel (resolusi 20m) cukup/tidak terlalu besar untuk meliputi luas taman alat. Nilai E_{To} dianggap sangat akurat untuk memprediksi nilai ET referensi berupa tutupan lahan rumput seperti pada lokasi dimana alat berada (lihat gambar 2). Dengan kondisi lingkungan yang memenuhi standard (kondisi tanaman cukup air) maka nilai E_{To} BMKG diasumikan mewakili kondisi ET aktual yang kemudian bisa dipakai sebagai bahan untuk menguji nilai ET aktual dari pemodelan.



Gambar 2. Kondisi Tutupan Lahan Taman Alat Stasiun BMKG Klimatologi Karangploso Malang

Terlihat bahwa tutupan berupa tanaman rumput dan minim gangguan tanaman berkanopi lebar. Dengan luas yang membentang melebihi representasi ukuran dari 1 pixel pemodelan fluks pada studi ini (yakni 20mx20m). Desain yang diterapkan pada foto ini juga kurang lebih sama dengan yang ada pada stasiun-stasiun pengamatan lainnya sebagai standard taman alat observasi, walaupun tidak menutup kemungkinan ada perbedaan pada luasnya.

Karena keterbatasan data lapangan, hanya hasil akhir yang bisa dibandingkan yaitu ET dalam skala harian (mm d-1). ET hasil dari semua opsi konfigurasi pemodelan fluks (sub-bab 2.4) dan metode ekstrapolasi (sub-bab 2.5) akan dibandingkan dengan data E_{To} BMKG untuk dicari yang paling baik menggunakan analisis regresi linear sederhana, dimana E_{To} BMKG sebagai variabel basis (data aktual) dan ET berbasis TSEB-PT sebagai variabel yang diuji. Nilai

koefisien determinasi (R²) akan digunakan untuk mengetahui seberapa baik model ET memprediksi nilai aktual.

$$r^2(O, P) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (12)$$

Dimana O adalah nilai observasi aktual ETo BMKG, P adalah nilai prediksi dari model ET, \bar{O} adalah rata-rata nilai observasi aktual, dan n adalah jumlah observasi. Sebelum diuji data pemodelan akan dipilah karena hasilnya belum tentu sempurna. Beberapa pemodelan bisa berakhir dengan kondisi tanpa fluks positif, bernilai 0, atau bahkan fluks yang sangat tidak rasional ($> 10 \text{ mm d-1}$). Kondisi-kondisi tersebut tidak diinginkan untuk dimasukkan kedalam penilaian, oleh karenanya akan diabaikan. Penentuan batas fluks maksimum didasarkan pada batas maksimum ETo yang tercatat selama pengamatan 20 tahun BMKG pada stasiun bersangkutan.

Dua analisis tambahan untuk menganalisa error pada nilai prediksi, yaitu Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Squared Error (RMSE):

$$\text{MAE}(O, P) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (13)$$

$$\text{RMSE}(O, P) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (14)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Komparasi Performa Model pada Stasiun Utama Juanda dengan Tiga Stasiun Tambahan di Jawa Timur

Dari segi koefisien determinasi tabel 2 terlihat bahwa performa model di stasiun pengamatan Juanda mengungguli 6 titik situs di tiga stasiun lainnya, dan jika dilihat lebih detail lagi per-level konfigurasi (tabel 4 lampiran) model memberikan kesesuaian yang sangat bagus di titik ini, dimana dengan mode operasional default Sen-ET nilai R² hampir selalu dikisaran angka 0.8-0.9. Namun demikian perlu untuk dicatat pada waktu bersamaan nilai MAE dan RMSE yang dihasilkan juga lebih tinggi dibandingkan dengan situs lainnya serta dengan jumlah sampel yang lebih sedikit digunakan. Aspek tutupan lahan bisa menjadi penyebab terhadap hasil performa model karena ada proses penajaman citra Sentinel-3 (resolusi kasar ke halus) yang meskipun sulit untuk mengukur besaran efek yang ditimbulkan, namun secara teori akan berpengaruh negatif terhadap hasil akhirnya dimana stasiun Juanda memiliki tingkat tutupan lahan yang lebih homogen dibandingkan dengan situs lainnya kemudian disusul dengan stasiun Klimatologi Malang yang memiliki karakteristik hampir sama yakni pertanian.

Terlepas dari performa model terlihat dalam studi ini terutama pada situs diluar Juanda, harus juga dipertimbangkan bahwa pengukuran in-situ (ETo) tidak bebas dari ketidakpastian seperti kualitas dari data parameter cuaca yang tersedia oleh pengukuran BMKG. Dan meskipun upaya minimalisir perbedaan pendekatan antara ETo dengan TSEB-PT telah dilakukan namun keduanya secara mendasar tetaplah berbeda, dua alasan tersebut mempengaruhi sudut pandang peneliti dimana kami menilai bahwa model Sen-ET ini sebenarnya adalah solusi yang menjanjikan untuk pemetaan evapotranspirasi skala lapangan dengan rekomendasi pada wilayah tutupan lahan yang cenderung homogen.

Tabel 2. Perbandingan Nilai Metrik Situs Juanda dengan Situs GMLG, GPAS dan KMLG

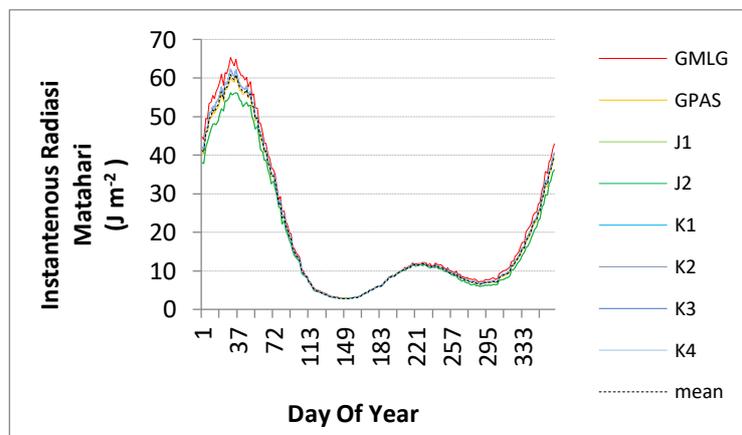
Sta/stat	R ²	MAE	RMSE	n
GMLG	0,15	2,09	2,46	20,11
GPAS	0,11	1,95	2,23	28,53
K1	0,19	1,85	2,19	13,67
K2	0,17	1,94	2,29	19,94
K3	0,20	2,06	2,38	20,69
K4	0,26	2,28	2,60	12,00
J1	0,34	2,30	2,55	5,82
J2	0,48	2,35	2,53	5,75

3.2. Analisa Sumber Error Model

Ketidakterediaan data lapangan pada komponen energi (yakni: R_n, H, LE) serta berbagai variabel input lainnya (T_c, T_s, dan parameter cuaca skala jam atau lebih detail) menjadi tantangan tersendiri untuk menemukan dan menyimpulkan sumber error pada model didalam studi ini. Oleh karenanya, kami menggunakan berbagai konfigurasi parametrisasi tersedia (seperti pada uraian sesi metode poin 2.4) sebagai strategi pendekatan untuk sarana menemukan jawabanya.

3.3. Data “Instantenous” Solar Radiasi ECMWF

Permasalahan umum yang ditemui disemua stasiun pengamatan adalah minimnya hasil akhir pemodelan yang dapat dipakai. Rata-rata pemodelan fluks dijalankan adalah 30% dari total hari pengamatan sepanjang 2019 (365 hari) atau 60% dari total potensial fluks dijalankan (± 180 hari) akibat dari karakteristik resolusi temporal satelit dan kondisi tutupan awan. Lebih lanjut kegagalan terstruktur (flag 5 dan 15) dan fluks tidak rasional ($0 > EF > 1.5$) banyak ditemui dari hasil yang dilaporkan sebesar 30% dan 20% dari potensial. Investigasi sumber error kami mengarah kepada R_{sl} dari ECMWF dimana pada bulan 5-11 (lihat gambar 3) energi masuk pada waktu Sentinel-3 overpass sangat minim kemudian berdampak terhadap estimasi radiasi gelombang pendek model dan disisi lain radiasi termal yang dideteksi oleh sensor Sentinel-3 cukup tinggi (data tidak ditampilkan) akibatnya radiasi gelombang panjang lebih besar sehingga mengakibatkan defisit energi R_{Ni} yang selanjutnya bertanggung jawab atas hasil fluks LE = 0 dan/atau fluks yang tidak rasional.



Gambar 3. Instantenous Radiasi Matahari R_{sl} selama Hari Pengamatan Diseluruh Situs Pengamatan

Grafik memperlihatkan nilai radiasi matahari yang minim pada bulan 5-11 (Day Of Year 121-334) sebagai sumber error pemodelan fluks. Jumlah radiasi matahari minim pada waktu tersebut terjadi sebagai akibat dari sudut datang penyinaran rendah yang disebabkan oleh gerakan semu tahunan matahari.

Perlu untuk diperhatikan secara seksama bahwasanya kami menggunakan data R_{sl} pada waktu pengamatan yang berbeda beberapa jam dari waktu pengamatan Sentinel-3 (pukul 11:00 vs 14:00-15:00, atau 3-4 jam perbedaan) yang sebetulnya diluar apa yang direkomendasikan oleh Guzinski et al. (2020). Ini adalah hal yang tidak dapat kami hindari dan sebagai informasi bagi pembaca dan peneliti selanjutnya bahwasanya tidak ada data R_{sl} yang benar-benar tersedia pada rentang jam pengamatan 12:00 hingga 16:00, paling tidak selama rentang pengamatan satu tahun 2019 (data terakhir diakses pada 5/12/2021) yang telah kami lakukan screening dan kondisi serupa sangat mungkin terjadi pada tahun-tahun lainnya dan pada lokasi yang berbeda di beberapa wilayah Indonesia. Celah yang besar ini sangat mungkin bertanggung jawab atas MAE dan RMSE yang begitu tinggi (yakni ~ 2 mm/hari) yang dihasilkan didalam estimasi model. kami mengharapkan ada perbaikan data oleh pihak penyedia (yakni ECMWF) karena efek yang ditimbulkan mungkin berarti banyak dan signifikan untuk berbagai macam pemanfaatan di bidang yang berkaitan dengan fluks energi.

3.4. Parameter Fisik Vegetasi: Disesuaikan vs Mode Default Operasional Sen-ET

Hasil temuan pada studi menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara menggunakan parameter fisik vegetasi yang disesuaikan kondisi aktual lapangan dengan yang dihasilkan oleh algoritma dalam pemodelan, hampir sama dengan yang dilaporkan oleh Guzinski et al. (2020). Seperti yang disajikan pada tabel 3 perbedaan nilai MAE memang ada namun hanya sebesar ~ 0.18 mm/hari untuk versi disesuaikan memiliki error yang lebih rendah daripada error yang dihasilkan oleh mode default konsisten di semua situs. Terlepas dari error sistematis yang besar yang telah diuraikan diawal, menggunakan mode default operasional Sen-ET masih tergolong pada tingkat yang menjanjikan ketika tidak tersedia data lapangan yang mumpuni.

Tabel 3. Perbandingan nilai rata-rata metrik yang dikelompokkan berdasar konfigurasi input parameter fisik vegetasi pada masing-masing situs.

Situs	konf. Input	R^2_{avg}	MAE_{avg}	MSE_{avg}	$RMSE_{avg}$	n_{avg}
GMLG	def.Sen-ET	0,15	2,10	6,08	2,44	20
	disesuaikan	0,16	2,08	6,31	2,47	20
GPAS	def.Sen-ET	0,10	2,02	5,61	2,30	22
	disesuaikan	0,13	1,88	5,15	2,17	35
K1	def.Sen-ET	0,15	2,00	5,69	2,32	12
	disesuaikan	0,22	1,70	4,47	2,05	16
K2	def.Sen-ET	0,19	1,97	5,57	2,29	19
	disesuaikan	0,14	1,91	5,43	2,28	20
K3	def.Sen-ET	0,22	1,99	5,53	2,31	19
	disesuaikan	0,18	2,13	6,05	2,44	22
K4	def.Sen-ET	0,19	2,34	7,63	2,70	12
	disesuaikan	0,27	2,21	6,47	2,50	12
J1	def.Sen-ET	0,34	2,43	8,14	2,69	5
	disesuaikan	0,33	2,14	6,17	2,40	6
J2	def.Sen-ET	0,63	2,68	8,14	2,72	5
	disesuaikan	0,34	2,03	5,95	2,37	7

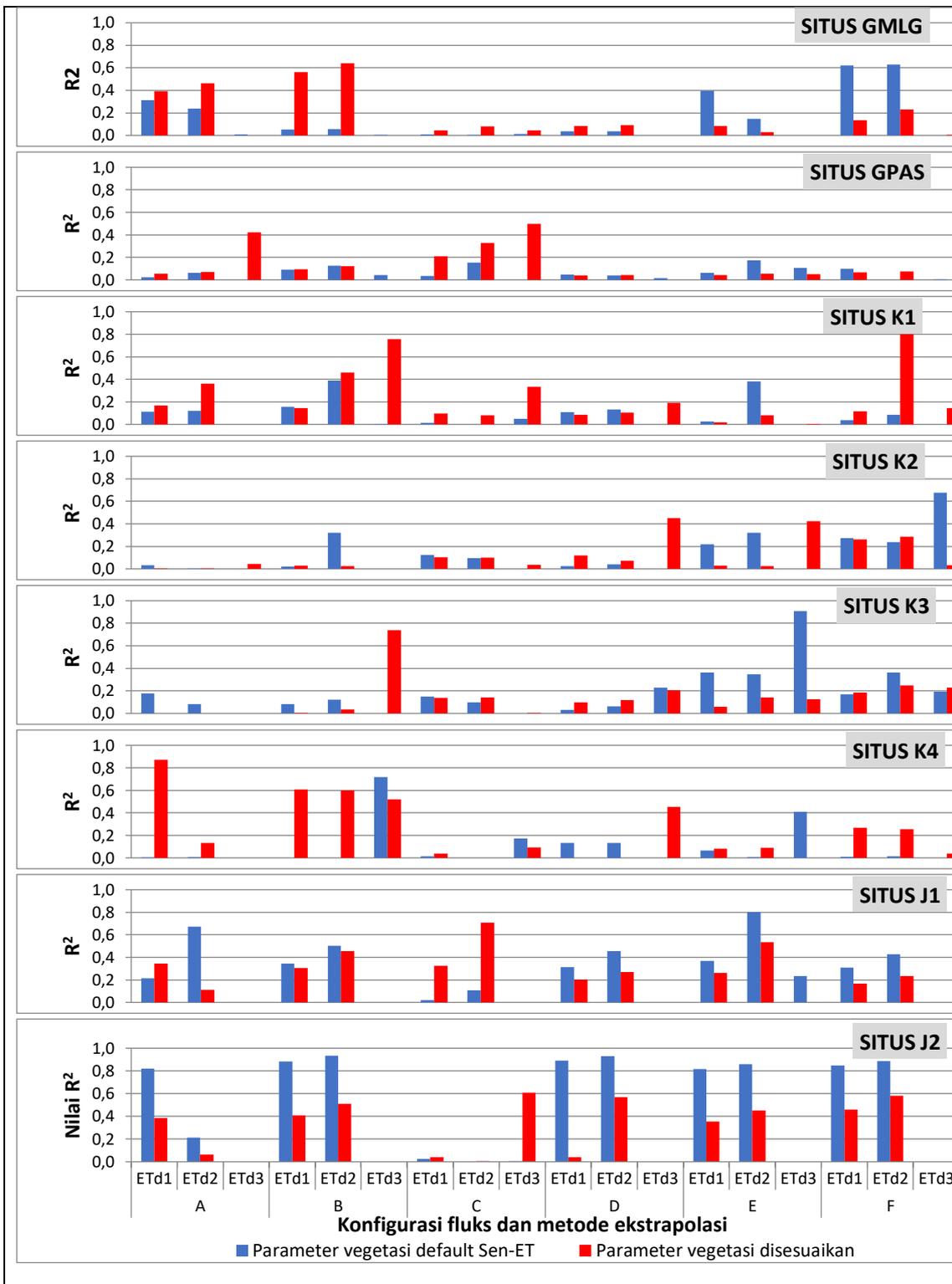
Penggunaan input data CCI-LC dengan resolusi kasar (300m) pada default Sen-ET bertanggung jawab terhadap generalisasi yang tidak dapat dihindarkan ketika diterapkan pada wilayah-wilayah dengan lanskap kompleks seperti pada lingkungan stasiun pengamatan. hampir keseluruhan situs validasi pada penelitian ini terindikasi berada di wilayah pertanian, kecuali GMLG yang masuk ke wilayah tutupan vegetasi kompleks. Memang benar bahwa kedua jenis tutupan lahan (yakni: pertanian dan rumput) diklasifikasikan pada jenis tanaman Terna (*harbaceus*) namun keduanya memiliki penetapan nilai yang berbeda berdasarkan *Look-Up Table* yang digunakan di pemodelan ini (lihat tabel.2 Guzinski et al, 2020). Kesalahan penentuan jenis tutupan lahan akan menyebabkan kesalahan beruntun pertama pada penetapan struktur daun $f_c = 0.5$ dan 1.0 , $l_w = 0.1$ dan 0.02 , $X_{lad} = 1.0$ dan 0.5 (“pertanian” dan “rumput” secara berurutan) dan karenanya menimbulkan kesalahan pada perhitungan transmisi radiasi yang berdampak terhadap nilai albedo dan partisi radiasi (Kustas & Norman, 2000). Kemudian kedua pada struktur tanaman ($h_{c_{max}} = 2.0$ dan 0.1) yang memberikan dampak signifikan terhadap nilai pemodelan fluks karena berpengaruh pada perhitungan *aerodynamic roughness* seperti yang dilaporkan oleh Raupach (1994) dan Schaudt & Dickinson (2000). Tinggi tanaman (h_c) terlihat memiliki nilai penetapan yang berbeda namun perlu diperhatikan bahwa nilai dari default Sen-ET bersifat dinamis yang dipengaruhi oleh nilai LAI sedangkan versi input disesuaikan bersifat konstan, akibatnya perbedaan nilai hasil yang dilaporkan tidak terlalu jauh namun penetapan nilai konstan cukup berarti banyak karena tidak memberikan kesempatan $h_c > 0.1m$ yang tidak mungkin sesuai dengan kondisi rumput di taman alat.

3.5. Model Resistans dan Penentuan Nilai Ratio G

Dari semua stasiun uji terlihat bahwa J1 dan J2 lebih longgar terhadap jenis model resistans yang bisa digunakan seperti yang ditampilkan di gambar 4 dengan nilai R^2 yang cenderung baik, sedangkan pada stasiun lainnya penentuan model resistans adalah hal yang sensitif dan perlu untuk diperhatikan. Terlepas dari itu model resistans permukaan kanopi dan permukaan tanah dari Norman et al. (1995) dan Kustas et al. (1999) (A & B), serta McNaughton & Van der Hurk (1995) (E & F) dilaporkan memberikan performa yang paling baik hampir disemua situs, kecuali GPAS konfigurasi E & F memberikan nilai R^2 yang lemah, dan kasus yang sama terjadi pada situs K2 dan K3 untuk konfigurasi A (lihat gambar 3). Sedangkan model resistans Choudhury & Monteih (1988) (C & D) menunjukkan performa yang paling rendah pada situs GMLG dan rata-rata R^2 yang sangat rendah pada situs-situs lainnya, kecuali GPAS, J1 dan J2.

Melalui perspektif penetapan nilai fraksi G terhadap R_n didalam pemodelan fluks menunjukkan pola yang berkebalikan dari yang diharapkan diawal bahwa dengan tutupan rumput nilai G cenderung minimal atau bahkan bisa diabaikan tetapi kenyataannya kondisi ini tidak terjadi. Konfigurasi yang menggunakan nilai fraksi konstant 35% R_n (A, C, E) secara rata-rata dari semua stasiun dan semua konfigurasi input menghasilkan nilai R^2 lebih rendah daripada fraksi konstan 10% R_n (B, D, F) meskipun tidak terlalu jauh jaraknya yakni 0.15 ± 0.21 , namun diwaktu yang sama error bias lebih rendah untuk A, C dan E yakni 2.03 ± 2.17 untuk MAE dan 2.18 ± 2.30 untuk RMSE. Pola ini masih menunjukkan kemiripan jika didasarkan pada konfigurasi input ancillary, tetapi hasil per situs sangat bervariasi dan tidak bisa ditebak (tidak ditampilkan). Hal ini sangat mungkin dipengaruhi oleh karakteristik tanah seperti tingkat kelembapan, tekstur dan struktur tanah berbeda disetiap situs. Rumput cenderung menutup permukaan tanah secara penuh sehingga nilai 10% R_n mungkin bisa valid terlepas dari sifat tanahnya (Ogée et al., 2001), namun faktanya fraksi tutupan mungkin saja berubah seiring

dengan musim atau keadaan tertentu pada stasiun pengamatan. Data Gambar 4 yang ditampilkan telah difilter untuk kasus nilai r negatif.



Gambar 4. Grafik Batang Menunjukkan Pola Rentangan Nilai r^2 Per Stasiun, Masing-Masing Konfigurasi Fluks (A-F) dan Ekstrapolasi ETd

3.6. Bentang Lahan

Ketinggian tempat mempengaruhi iklim mikro dan juga fitur tutupan vegetasi yang berakibat terhadap akurasi estimasi model. Sayangnya kami tidak dapat menilai kerja model di tahap pemodelan fluks karena keterbatasan data lapangan namun kami memiliki bukti yang bisa ditampilkan bagaimana faktor fisik ini berpengaruh terhadap proses ekstrapolasi ET_i ke ET_d melalui tabel 4 dan gambar 5.

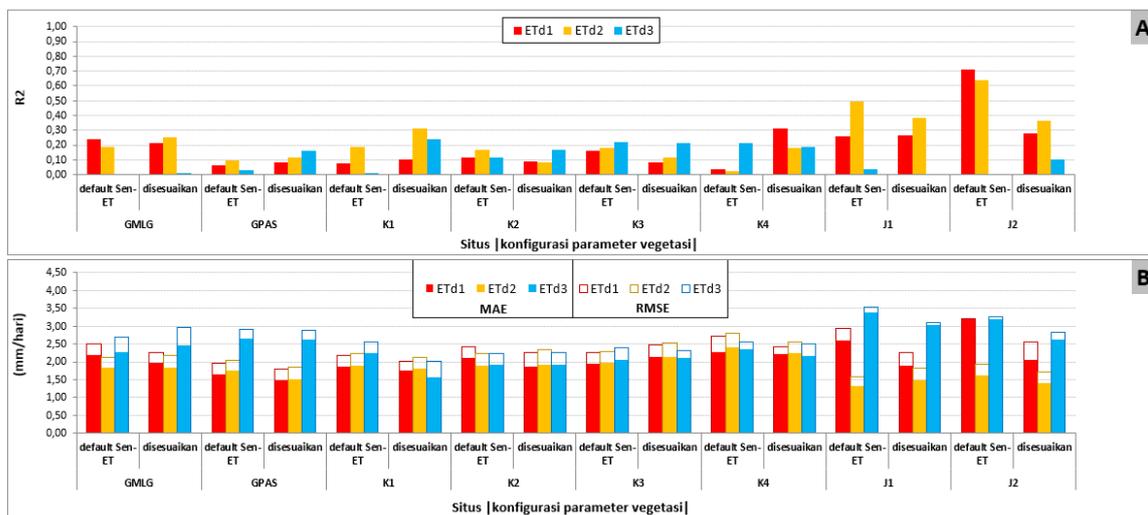
Tabel 4. Statistik Kinerja Metode Ekstrapolasi ET_d dari Rata-Rata Semua Situs dan Semua Konfigurasi Fluks

Statistik	Parameter Vegetasi	ET _{d1}	ET _{d2}	ET _{d3}
R ² _{avg}	def Sen-ET	0,21	0,25	0,08
	Disesuaikan	0,18	0,23	0,13
	total rata-rata	<u>0,19</u>	<u>0,24</u>	<u>0,11</u>
MAE _{avg}	def Sen-ET	2,23	1,84	2,51
	Disesuaikan	1,92	1,79	2,31
	total rata-rata	<u>2,08</u>	<u>1,82</u>	<u>2,41</u>
RMSE _{avg}	def Sen-ET	2,49	2,15	2,77
	Disesuaikan	2,26	2,14	2,61
	total rata-rata	<u>2,38</u>	<u>2,15</u>	<u>2,69</u>

Keempat stasiun memiliki bentang lahan yang berbeda satu dengan lainnya demikian juga berbeda keadaan iklim mikro dan tutupan lahanya. Metode ekstrapolasi ET_{d3} yang digunakan pada mode operasional Sen-ET mengandalkan radiasi matahari harian (langit cerah) dari data reanalysis ECMWF sehingga akan mencapai akurasi tertinggi ketika frekuensi tutupan awan sangat minim pada hari pengamatan dan juga sebaliknya. Kriteria kondisi ini tentu akan sangat sulit didapati di wilayah tropis seperti Indonesia ketika musim angin muson barat terlebih untuk wilayah dataran tinggi seperti GPAS dimana formasi awan sering terbentuk. Kami mendapati kesesuaian pola seperti ini pada stasiun GPAS dan GMLG dimana masing-masing memiliki rata-rata penyinaran tahunan (tanpa pemisahan musim) yang lebih sedikit daripada situs lain yakni 3.8 jam dan 6.6 jam dan menghasilkan bias MAE dan RMSE yang tinggi, sedangkan stasiun KMLG dengan rata-rata penyinaran paling tinggi dari pemodelan ET_{d3} memberikan kesesuaian paling baik dengan bias MAE dan RMSE cenderung konsisten dengan dua metode ekstrapolasi lainnya (lihat grafik gambar 5). Alasan lain datang dari cara kerja metode itu sendiri dimana Jackson et al. (1983) mengaitkan error berasal dari tidak mempertimbangkan ET diwaktu malam hari yang juga terjadi pada studi Ibáñez & Castellví (2000) dan Chávez et al. (2008). Bias error yang begitu tinggi di stasiun JD semata datang dari jumlah data pemodelan yang digunakan dimana hanya satu hingga dua data pengamatan yang berhasil memenuhi kriteria sehingga tidak bisa dipakai untuk menyimpulkan bagaimana ET_{d3} bekerja di wilayah ini.

Performa baik yang ditunjukkan ET_{d2} dan ET_{d1} bisa dijelaskan salah satunya akibat dari linearitas dari energi tersedia (Rn)_a yang digunakan untuk merubah ET_i ke ET_a, dimana sumber data yang digunakan sama dengan yang dipakai pada ETo yakni lama penyinaran matahari. Eliminasi nilai G menjadi alasan terhadap penurunan rata-rata nilai bias (MAE) dan juga terhadap variabilitas dari bias (RMSE). ET_{d1} menghilangkan nilai G pada tahap ekstrapolasi ke perkiraan ET harian dan menunjukkan performa yang lebih baik daripada ET_{d3} yang tetap memasukan variabel G, dimana hal ini sejalan dengan klaim beberapa penelitian yang menyatakan bahwa nilai positif dari G pada siang hari (proses pemanasan) umumnya

dikompensasi oleh nilai negatif G pada malam hari (proses pendinginan) pada tutupan lahan bervegetasi sehingga nilai harian 0 (Allen et al, 1998; Brutsaert, 2005). ETd_2 tidak hanya mengabaikan nilai G pada tahap ekstrapolasi harian seperti ETd_1 namun juga mengabaikan G_i pada tahap perhitungan eq.4.a berakibat pada peningkatkan nilai EF. Faktanya peningkatan nilai EF yang kemudian meningkatkan nilai ETd mengungguli metode ekstrapolasi lainya dengan R^2 $0.25 \pm 0.21 \pm 0.10$ dan MAE $1.84 \pm 2.23 \pm 2.51$ serta RMSE $2.15 \pm 2.49 \pm 2.77$ ($ETd_1 \pm ETd_2 \pm ETd_3$) pada skema parameter fisik vegetasi mode operasional dan pola nilai yang hampir sama pada skema yang disesuaikan. Metode ETd_2 bekerja paling baik pada stasiun JD dibandingkan dengan stasiun lainya baik dari R2 maupun kedua MAE dan RMSE. Hal ini sangat mungkin bisa dijelaskan melalui kondisi tutupan lahan dimana Secara khusus metode ekstrapolasi ETd_2 mungkin lebih cocok untuk diterapkan pada situs-situs studi ini dengan vegetasi rumput. Sebagai catatan bahwa mungkin metode ekstrapolasi ETd_2 hanya akan sesuai diterapkan pada rumput atau hutan yang rapat menutup tanah, dan akan memberikan bias yang besar jika diterapkan pada tutupan vegetasi renggang atau berkolom seperti pada pola tanaman pertanian sehingga tidak direkomendasikan (Chávez et al 2008).



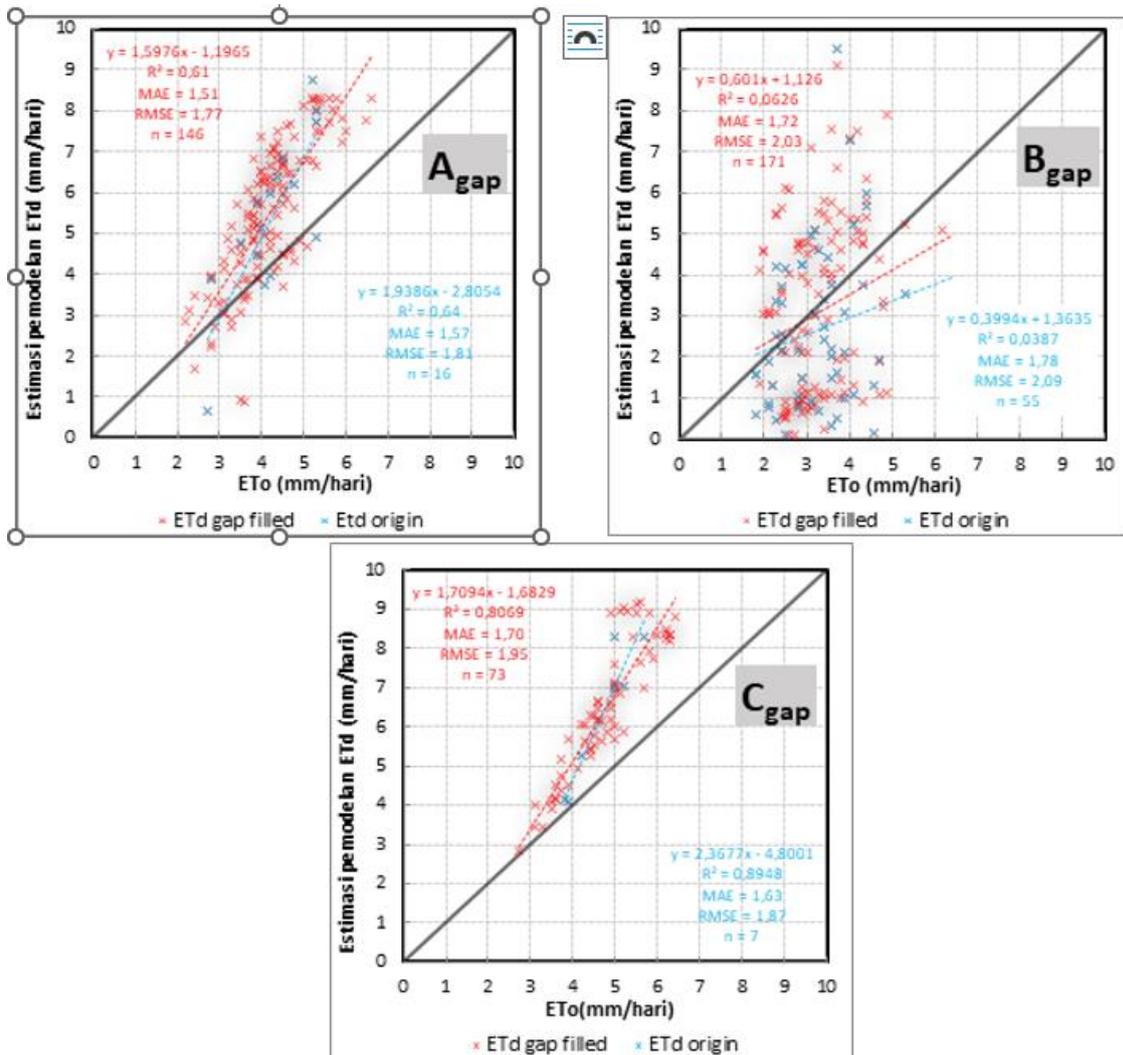
Gambar 5. Grafik Batang Menunjukkan Pola Statistik Koefisien Determinasi (A) dan Bias MAE/RMSE (B) yang Diperoleh dari Merata-Rata Semua Konfigurasi Masing-Masing Situs

Variasi performa lebih terlihat dibandingkan dengan rata-rata semua situs dan semua konfigurasi fluks tabel 4. Perhatikan bahwa kinerja ETd_3 cenderung dibawah dari ETd_1 dan ETd_2 dimana kami berpikir kondisi ini banyak dipengaruhi oleh intensitas penyinaran matahari dari gangguan tutupan awan. ETd_2 secara khusus bekerja paling baik di Stasiun Juanda baik dari R2 maupun bias error dimana kerapatan tutupan vegetasi berpengaruh besar terhadap tingkat kinerja metode ini.

3.7. Penilaian Gap-Filling

Disini penilaian hanya akan berfokus terhadap bagaimana setiap kondisi data keseluruhan berperilaku ketika diterapkan pada prosedur pengisian celah kosong pada pemodelan. Kami mengambil secara acak 3 kriteria data tersedia yakni pertama jumlah data sedang dengan performa cukup baik (diwakili oleh data GMLG-disesuaikan-A- ETd_2), kedua jumlah data banyak dengan performa lemah (diwakili oleh data GPAS-disesuaikan-C- ETd_2),

ketiga jumlah data minim dengan performa yang baik (diwakili oleh data J2-def.Sen-ET-B-ETd2). Semua hasil pengujian direpresentasikan di gambar 6.



Gambar.5. Scatter Plot (Pemodelan ETd vs ETo BMKG) Membandingkan Performa Data Original VS Data Setelah Gap-Fill Diterapkan Menggunakan *Nearest-EF*

Warna merah mempresentasikan data hasil gap-fill dan warna biru untuk data pemodelan original. Agap = GMLG-disesuaikan-A-ETd2, Bgap = GPAS-disesuaikan-C-ETd2, dan Cgap = J2-def.Sen-ET-B-ETd2. Pengujian menunjukkan bahwa terdapat perubahan performa namun tidak signifikan antara data pemodelan original dengan setelah prosedur gap-fill diterapkan pada semua kondisi data. Dari segi rata-rata bias Agap dan Bgap mengalami peningkatan performa sedangkan Cgap mengalami penurunan ketika jumlah data bertambah, namun dari segi r2 Cgap menjadi satu-satunya kriteria data yang mengalami peningkatan. Secara sederhana dari segi bias error hal ini bisa dijelaskan bahwa semakin banyak jumlah data original maka RMSE akan turun mengikuti distribusi data hasil pengisian celah yang semakin merata, begitu juga dengan rata-rata bias yang kemungkinan akan turun ketika jumlah data bertambah, dengan catatan, data original dengan bias kecil mengisi celah lebih banyak daripada data original dengan bias yang besar. Hal ini mungkin akan sangat sulit diterapkan pada mode operasional secara otomatis tanpa intervensi dari pengguna.

4. Simpulan

Studi ini menggambarkan secara umum bagaimana model Sen-ET Guzinski et al (2020) bekerja di wilayah Indonesia, khususnya di Jawa Timur pada tutupan lahan rumput. Model ini menunjukkan performa yang bagus di stasiun Juanda, sebaliknya cukup kurang untuk wilayah lainya seperti di KMLG, GPAS dan GMLG. Kami menemukan dua permasalahan utama pada penerapannya di wilayah studi, pertama adalah permasalahan umum untuk semua stasiun dan memiliki dampak paling signifikan terhadap hasil pemodelan, dan kedua adalah permasalahan berbasis per-situs yang berhubungan dengan variasi karakteristik setiap tempat.

Data meteorologi ECMWF Rsl dimana mode operasional model ini bergantung terlihat memiliki dampak paling signifikan terhadap jumlah keberhasilan pemodelan terutama pada hari pengamatan di bulan-bulan ketika posisi matahari jauh di Utara atau Selatan khatulistiwa, selain itu data ini sangat sulit tersedia pada jam pengamatan sentinel-3 sehingga sinkronisasi keduanya tidak tercapai berakibat pada error bias yang tinggi hingga ~2mm/hari. Selanjutnya masalah-masalah berhubungan dengan karakteristik wilayah atau bentang lahan berdampak minim hingga sedang terhadap pemodelan. Wilayah dengan tingkat tutupan lahan cenderung homogen akan memiliki tingkat kesesuaian yang bagus antara estimasi model dengan estimasi berbasis lapangan seperti Juanda karena terdapat proses penajaman citra Sentinel-3 dari resolusi kasar ke halus sehingga mengurangi akurasi. Seting pegunungan juga berdampak terhadap iklim mikro terutama adalah intensitas penyinaran matahari yang sangat bergantung terhadap kekasaran medan dan frekuensi tutupan awan yang tinggi seperti pada GPAS akan berpengaruh terhadap akurasi estimasi ET harian ketika menggunakan metode ETd3.

Penerapan *gap-fill* mungkin tidak meningkatkan performa yang begitu signifikan dan pada temuan kami cenderung memberikan pola yang sama dengan data pemodelan original dari beberapa sampel kriteria data. Namun untuk pemenuhan kebutuhan akan ketersediaan data, prosedur *gap-fill* bisa diterapkan, dengan catatan fluks hari terdekat yang dipakai memiliki akurasi yang bagus.

Diluar dari permasalahan utama input data Rsl kami menilai bahwa algoritma model ini memiliki kelayakan untuk dipakai. Lebih banyak pengujian pada wilayah Indonesia lainya dan dengan kondisi data Rsl yang lebih baik lagi sangat diperlukan untuk menilai performa dengan lebih jelas.

Daftar Rujukan

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and drainage paper No. 56 Crop Evapotranspiration*.
- Anderson, M. C., Allen, R. G., Morse, A., & Kustas, W. P. (2012). Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122, 50-65.
- Bindhu, V. M., Narasimhan, B., & Sudheer, K. P. (2013). Development and verification of a non-linear disaggregation method (NL-DisTrad) to downscale MODIS land surface temperature to the spatial scale of Landsat thermal data to estimate evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 135, 118-129.
- Bontemps, S., Defourny, P., Radoux, J., Van Bogaert, W., Lamarche, C., & Achard, F. (2013). *Consistent Global Land Cover Maps for Climate Modelling Communities: Current Achievements of The ESA' Land Cover CCI. ESA Living Planet Symposium*. Edinburgh, UK: ESA.
- Bosquilia, R. W., Neale, C. M., Duarte, S. N., Longhi, S. J., Ferraz, S. F. D. B., Muller-Karger, F. E., & McCarthy, M. J. (2018). Temporal evaluation of evapotranspiration for sugar cane, planted forest and native forest using landsat 8 images and a two-source energy balance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 70-76.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: An Introduction*. New York: Cambridge University Press.

- Chávez, J. L., Neale, C. M., Prueger, J. H., & Kustas, W. P. (2008). Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values. *Irrigation Science*, 27, 67-81.
- Chen, X., Su, Z., Ma, Y., Trigo, I., & Gentile, P. (2021). Remote sensing of global daily evapotranspiration based on a surface energy balance method and reanalysis data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(16), e2020JD032873.
- Choudhury, B. J., Idso, S. B., & Reginato, R. J. (1987). Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39(4), 283-297.
- Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S., & Tawfik, A. (2019). Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural Water Management*, 213, 682-692.
- Gao, F., Kustas, W. P., & Anderson, M. C. (2012). A data mining approach for sharpening thermal satellite imagery over land. *Remote Sensing*, 4(11), 3287-3319.
- Guzinski, R., & Nieto, H. (2019). Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations. *Remote sensing of Environment*, 221, 157-172.
- Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., & Karamitlios, G. (2020). Modelling high-resolution actual evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 data fusion. *Remote Sensing*, 12(9), 1433.
- Huang, L., Cai, J., Zhang, B., Chen, H., Bai, L., Wei, Z., & Peng, Z. (2019). Estimation of evapotranspiration using the crop canopy temperature at field to regional scales in large irrigation district. *Agricultural and Forest Meteorology*, 269, 305-322.
- Ibáñez, M., & Castellví, F. (2000). Simplifying daily evapotranspiration estimates over short full-canopy crops. *Agronomy Journal*, 92(4), 628-632.
- Jackson, R. D., Hatfield, J. L., Reginato, R. J., Idso, S. B., & Pinter Jr, P. J. (1983). Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural Water Management*, 7(1-3), 351-362.
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1), 13-29.
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (2000). A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observations for sparse canopy covered surfaces. *Agronomy Journal*, 92(5), 847-854.
- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-Knorn, M., Bieniarz, J., Mueller-Wilm, U., ... & Gascon, F. (2016). Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users. In *Proceedings living planet symposium 2016* (pp. 1-8). Spacebooks Online.
- McNaughton, K. G., & Van den Hurk, B. J. J. M. (1995). A 'Lagrangian' revision of the resistors in the two-layer model for calculating the energy budget of a plant canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, 74(3), 261-288.
- Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M., & Running, S. W. (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote sensing of Environment*, 111(4), 519-536.
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote sensing of environment*, 115(8), 1781-1800.
- Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), 263-293.
- Ogé, J., Lamaud, E., Brunet, Y., Berbigier, P., & Bonnefond, J. M. (2001). A long-term study of soil heat flux under a forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(3), 173-186.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92.
- Rasmussen, M. O., Sørensen, M. K., Wu, B., Yan, N., Qin, H., & Sandholt, I. (2014). Regional-scale estimation of evapotranspiration for the North China Plain using MODIS data and the triangle-approach. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 31, 143-153.
- Raupach, M. R. (1994). Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-layer meteorology*, 71(1-2), 211-216.

- Sánchez, J. M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V. A., & Telesca, V. (2008). Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology, 351*(1-2), 58-70.
- Schaudt, K. J., & Dickinson, R. E. (2000). An approach to deriving roughness length and zero-plane displacement height from satellite data, prototyped with BOREAS data. *Agricultural and Forest Meteorology, 104*(2), 143-155.
- Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment, 185*, 171-185.
- Shuttleworth, W. J., Gurney, R. J., Hsu, A. Y., & Ormsby, J. P. (1989). FIFE: The variation in energy partition at surface flux sites. *IAHS Publ, 186*(6), 523-534.
- Sugita, M., & Brutsaert, W. (1991). Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes. *Water Resources Research, 27*(5), 747-752.