



Prediksi Debit Bulanan Jangka Panjang untuk DAS Cimanuk

Long-term Monthly Discharge Prediction for Cimanuk Watershed

Marliana Tri Widyastuti dan Muh Taufik*

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Gedung FMIPA, IPB, Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 August 2019

Received in revised from 25 November 2019

Accepted 27 December 2019

doi: 10.29244/j.agromet.33.2.96-104

Keywords:

Hydrological modeling
Parameterization
Sensitivity analysis
Streamflow
SWAT

ABSTRACT

Although streamflow data is important for water resource planning, it's long-term availability for Indonesian rivers is limited. One factor could be identified for example lack of observation. Here, we presented observation-based modeling to predict long-term discharge data for Cimanuk watershed in Indonesia. The watershed is categorized as one of the critical watersheds, meanwhile it supports to more than one million people. A well-known hydrological model called Soil and Water Assessment Tools (SWAT) was used to predict monthly discharge. The model was fed with monthly climate data, topography, land use and soil characteristics. We calibrated the model with the observed data from 1974 to 1994 (20 years). Our results showed that the model was a good performance in estimating monthly discharge as indicated by three statistical metrics used. Based on statistical evaluation, the calibration resulted a low percent bias (3.20%), strong correlation (0.73), and high Kling-Gupta Efficiency (0.78). Further, we did a sensitivity analysis for the model, and we found that hydrological response unit was the most influential parameters for the Cimanuk watershed. A long-term discharge data indicated a monsoonal pattern for this watershed.

PENDAHULUAN

Daerah aliran sungai (DAS) Cimanuk, berdasarkan Keputusan Menteri Kehutanan No. 328/Menhut-II/2009, menjadi salah satu dari 108 DAS kritis di Indonesia. Kondisi DAS yang rusak ini, disebabkan oleh masalah sosial-ekonomi yang mencakup penegakan hukum penebangan liar yang lemah, koordinasi antar *stakeholder* pengelola DAS yang kurang terintegrasi, dan sikap masyarakat yang kurang peduli terhadap lingkungan (BBWS CC, 2010). Kondisi umum Sungai Cimanuk, sebagaimana kondisi sungai besar di Pulau Jawa, mengalami kekurangan pasokan air pada musim kemarau, tetapi mengalami kelebihan pasokan air pada musim penghujan. Perbedaan pasokan air yang besar sangat menarik untuk dikaji, agar diperoleh informasi yang jelas dan menyeluruh untuk mitigasi dan adaptasi kejadian bencana hidrometeorologi (kekeringan/banjir) tersebut. Kajian ini membutuhkan informasi perilaku hidrologis sungai (debit sungai) dalam jangka panjang. Namun

informasi jangka panjang tersebut di Indonesia masih terbatas.

Penelitian mengenai debit sungai jangka panjang sangat penting, misal dalam upaya mengurangi dampak banjir, prediksi kekeringan, efektifitas waduk, dan penggunaan air yang efisien. Prediksi debit jangka panjang yang akurat dapat digunakan sebagai landasan dalam manajemen sumber daya air yang terintegrasi dan efisien (Seo et al., 2015). Metode untuk prediksi debit jangka panjang dengan hasil akurat dan mendekati nilai observasi, menjadi salah satu topik penting dalam ruang lingkup hidrologi. Dalam hal ini, prediksi jangka panjang yang dimaksud adalah prediksi dalam skala bulanan, musiman, atau tahunan dengan periode data lebih panjang dari data pengukuran debit yang dilakukan pada DAS tersebut. Di lingkup global, prediksi debit jangka panjang telah dilakukan menggunakan berbagai jenis model (Liu et al., 2017; Singh, 2016), termasuk model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Liang et al., 2017; Noh et al., 2016). Untuk wilayah Indonesia, prediksi debit jangka panjang

* Corresponding author: mtaufik@apps.ipb.ac.id

pernah dilakukan oleh Widyastuti et al. (2018) dengan studi kasus Sungai Bengawan Solo dan menggunakan model SWAT.

Diantara berbagai model hidrologi, SWAT merupakan sebuah model semi distribusi, dikembangkan untuk menganalisis kuantitas air yang dihasilkan oleh daerah tangkapan air yang kompleks (Neitsch et al., 2011). Selama ini, penggunaan model SWAT untuk studi kasus Sungai Cimanuk lebih terfokus dan terbatas pada aspek kemampuan model dalam memprediksi perilaku debit sungai akibat perubahan kondisi lingkungan pada jangka waktu tertentu. Ridwansyah et al. (2018) melakukan simulasi debit Sungai Cimanuk di Bendungan Jatigede terkait perubahan kondisi hidrologis akibat upaya pengolahan lahan. Hasil kalibrasi model menunjukkan nilai akurasi yang cukup tinggi. Munggaran et al. (2017) mengidentifikasi pengaruh upaya konservasi tanah dan air terhadap nilai debit Sungai Cimanuk di outlet Leuwidaun, kinerja model cukup memuaskan.

Penelitian ini mencoba untuk melakukan prediksi debit jangka panjang (1901-2016) pada aliran Sungai Cimanuk menggunakan model SWAT. Uji kemampuan model dan prediksi debit sungai dilakukan dalam skala bulanan dan memanfaatkan data yang bersifat *open source* sebagai input model. Debit hasil prediksi kemudian digunakan untuk mengidentifikasi pola perilaku aliran Sungai Cimanuk.

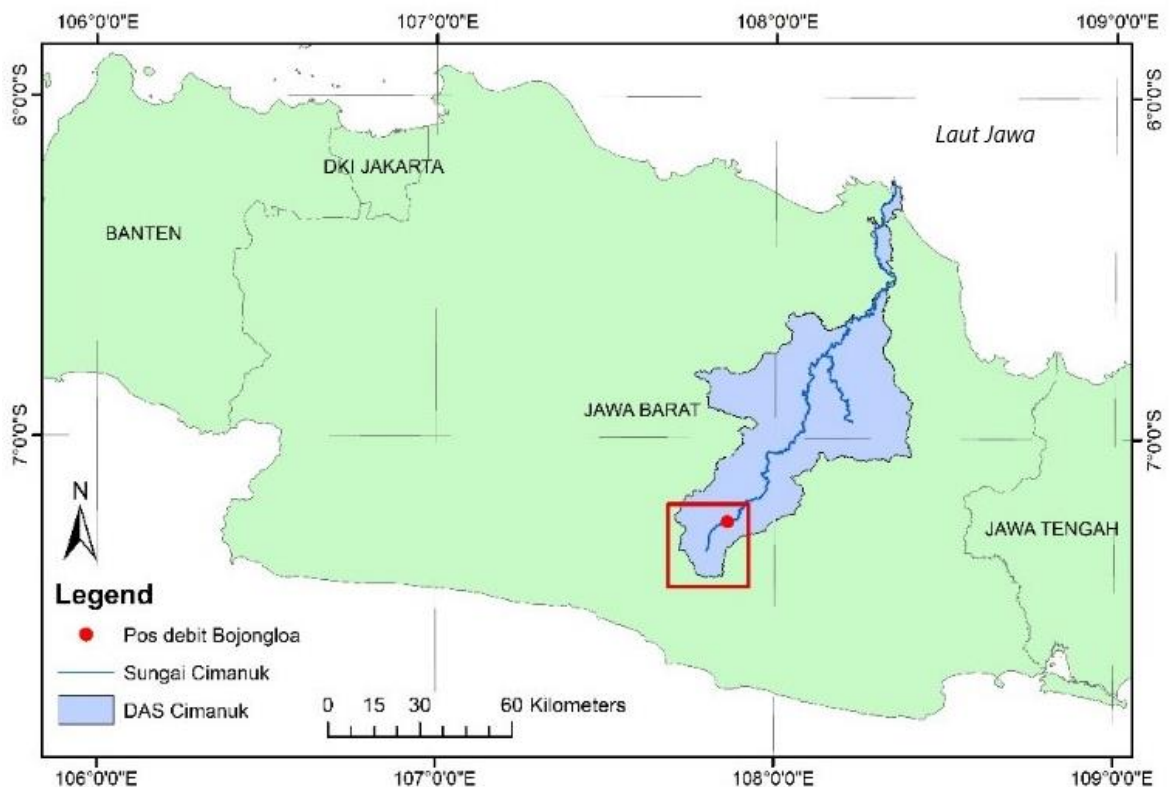
METODE PENELITIAN

Wilayah Kajian

Sungai Cimanuk memiliki luas daerah tangkapan air mencapai 350 ribu ha, dengan panjang aliran sungai sekitar 180 km. Aliran sungai berasal dari Gunung Papandayan pada ketinggian sekitar 2500 mdpl dan bermuara di Laut Jawa sebelah utara Kabupaten Indramayu (Gambar 1). Penduduk memanfaatkan aliran sungai ini terutama untuk sumberdaya air kebutuhan sehari-hari, irigasi pertanian, dan kegiatan perikanan. DAS Cimanuk terbagi menjadi tiga wilayah, meliputi Cimanuk Hulu di Kabupaten Garut-Sumedang, Cimanuk Tengah di Kabupaten Sumedang-Majalengka, dan Cimanuk Hilir di Indramayu. Pada penelitian ini, kami berfokus pada wilayah hulu DAS, yaitu pos pemantauan debit Bojongloa (Gambar 1). Luas daerah tangkapan air yang tercakup hampir 18.5 ribu ha.

Deskripsi Model

Model SWAT merupakan model semi-distribusi yang mampu menganalisis kondisi neraca air dalam periode waktu yang lama pada daerah tangkapan air (DTA) dengan kondisi tanah, penggunaan lahan dan manajemen lahan yang bervariasi (Heuvelmans et al., 2005; Uniyal et al., 2015). Komponen utama input model ini meliputi data: iklim (curah hujan, suhu udara maksimum, suhu udara minimum), topografi, tata guna lahan dan sebaran tanah.



Gambar 1. Lokasi pos pengamatan debit Bojongloa pada aliran Sungai Cimanuk. Kotak merah menunjukkan wilayah daerah tangkapan air yang tercakup oleh pos Bojongloa.

Dalam SWAT, DTA akan dibagi menjadi beberapa subbasin yang kemudian akan diuraikan lebih detail menjadi *hydrologic respon unit* (HRU). Dalam setiap HRU, model SWAT akan mensimulasikan perhitungan neraca air. Rumus neraca air yang digunakan dalam model SWAT ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$SW_{(t)} = SW_{(t-1)} + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

dimana $SW_{(t)}$ adalah kandungan air tanah (mm) pada waktu t , $SW_{(t-1)}$ adalah kandungan air tanah tersedia untuk tanaman (mm) yang merupakan selisih kandungan air tanah awal dengan titik layu permanen, t adalah skala waktu (dalam penelitian ini: bulan), R_i adalah hujan (mm), Q_i adalah limpasan permukaan (mm), ET_i adalah evapotranspirasi (mm), P_i adalah perkolasi (mm) dan QR_i adalah aliran balik (mm) (Anand et al., 2018).

Komponen limpasan permukaan (Q) diestimasi menggunakan pendekatan *Soil Conservation Service-Curve Number* (SCS-CN). Nilai CN yang didefinisikan pada setiap tutupan lahan sebagai input model, berpengaruh langsung terhadap nilai limpasan yang dihasilkan. Sedangkan untuk fase pemodelan aliran, model ini menggunakan pendekatan *Muskingum*. Nilai koefisien *manning* yang didefinisikan dalam parameter sungai, berpengaruh pada nilai laju aliran air (debit aliran).

Data Input Model SWAT

Data hidrometeorologi yang digunakan meliputi data titik curah hujan, suhu maksimum, suhu minimum, dan evapotranspirasi potensial dalam skala bulanan. Data tersebut diperoleh dari data Climate Research Unit (CRU)¹ dengan resolusi spasial 0.5° untuk periode 1901-2016 (Harris et al., 2014). Sedangkan data spasial yang digunakan untuk membangun model SWAT, meliputi data *digital elevation model* (DEM), data tutupan lahan, dan data sebaran jenis tanah, kami peroleh dari sumber data bersifat *open-source*. Data DEM yang digunakan adalah Data ASTER-GDEM (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model)² resolusi 30m dengan akuisisi data tanggal 7 Oktober 2011. Peta tutupan lahan tahun 2011 diperoleh dari Kementerian Lingkungan Hidup³.

Peta sebaran tanah yang digunakan adalah *Digital Soil Map of the World* (DSMW) yang

dikembangkan *Food and Agricultural Organization* (FAO)⁴. Data jaringan sungai Cimanuk diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG)⁵, sebagai peta dasar saat pendefinisian aliran sungai dalam model SWAT.

Tahap Evaluasi Model

Akurasi model SWAT untuk memprediksi debit aliran sungai dinilai berdasarkan hasil perbandingan grafik debit hasil estimasi terhadap debit observasi periode 1974-1994. Data debit observasi kami peroleh dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air (Pusair). Periode 1974-1987 untuk proses kalibrasi, sedangkan 1988-1994 untuk validasi. Proses kalibrasi dilakukan secara otomatis dan manual. Kalibrasi otomatis menggunakan SWAT-Calibration and Uncertainty Programs (CUP) dengan pendekatan *Sequential Uncertainty Fitting version 2* (SUFI-2) (Abbaspour, 2015). Parameter model SWAT yang dikalibrasi sebanyak 9 dari 36 parameter submodel siklus hidrologi (Arnold et al., 2012), yang dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Deskripsi parameter SWAT yang dikalibrasi dengan data observasi 1974-1987.

Parameter	Deskripsi
CN2	<i>SCS runoff curve number</i>
SOL_AWC	<i>Available water content of soil</i>
CH_N1	<i>Manning coefficient of branches</i>
CH_K2	<i>Channel effective hydraulic conductivity (mm/h)</i>
GWQMN	<i>Threshold water depth in the shallow aquifer for return flow to occur (mm)</i>
ESCO	<i>Soil evaporation compensation factor</i>
OV_N	<i>Manning's "n" value for overland flow</i>
GW_REVAP	<i>Groundwater reevaporation coefficient</i>
CH_N2	<i>Manning coefficient of the main channel</i>

Secara kuantitatif, akurasi model SWAT dinilai berdasarkan beberapa indikator statistik *goodness-of-fit* pada Software R package hydrogof (Zambrano-Bigiarini, 2017). Indikator statistik yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Percent bias* (PBIAS), *Kling-Gupta Efficiency* (KGE), dan *Coefficient of Determination* (R^2). Pada penelitian ini, indikator KGE menggantikan indikator *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) dalam kombinasi umum, yaitu NSE, PBIAS, dan R^2 (e.g. (Worqlul et al., 2018) untuk menguji performa model hidrologi.

¹ http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_4.01/data/

² <https://earthexplorer.usgs.gov/>

³ <http://webgis.menlhk.go.id:8080/kemenhut/index.php/id/fitur/unduh>

⁴ <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>

⁵ <https://portal.ina-sdi.or.id/downloadaoi/>

Percent BIAS (PBIAS)

Nilai PBIAS digunakan untuk mengukur rerata kecenderungan dari data hasil simulasi apakah lebih besar atau lebih kecil dari data observasi. Nilai PBIAS optimal jika mendekati angka 0. Nilai positif menunjukkan bahwa hasil simulasi model adalah *over-estimate*, sedangkan nilai menunjukkan hasil simulasi model *underestimate* (Moriasi et al. 2007). Rumus untuk menghitung nilai PBIAS disajikan pada Persamaan (2).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim}) \times (100)}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} \right] \quad (2)$$

dimana Q^{obs} adalah nilai debit observasi (mm/bulan) dan Q^{sim} adalah nilai debit simulasi (mm/bulan).

Kling-Gupta Efficiency (KGE)

KGE merupakan indikator statistik yang dikembangkan oleh Gupta et al. (2009) untuk mendukung diagnosis dekomposisi NSE, yang menggunakan analisis relatif berbagai komponen yang berbeda (korelasi, bias dan variabilitas) dalam pemodelan hidrologi. Metode ini kemudian dikembangkan untuk memastikan bahwa bias dan rasio variabilitas tidak memiliki hubungan korelasi silang. Rumus untuk menghitung nilai KGE disajikan pada Persamaan (3-4).

$$KGE = 1 - ED \quad (3)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4)$$

dimana $\alpha = \frac{\sigma^{sim}}{\sigma^{obs}}$ dan $\beta = \frac{\mu^{sim}}{\mu^{obs}}$. Nilai α adalah perhitungan variabilitas 99nderest pada data simulasi dan observasi, β adalah bias yaitu rasio mean data simulasi dengan mean data observasi, dan ED (Euclidian Distance) adalah jarak sebaran hasil dari titik ideal. Rentang nilai KGE antara $-\infty$ sampai dengan 1. Nilai mendekati 1 menunjukkan performa model akurat.

Coefficient of Determination (R²) dan korelasi (r)

Nilai R² menggambarkan besar proporsi dari variansi data observasi yang mampu dijelaskan oleh model. Rentang nilai R² antara 0 sampai dengan 1 dengan nilai yang makin tinggi mengindikasikan variansi error yang makin rendah. Nilai R² lebih dari 0.50 menjadi kriteria umum suatu model dapat diterima (Santhi et al. 2001). Meskipun metode statistik R² sering digunakan dalam evaluasi model, metode ini terlalu sensitif terhadap nilai ekstrem (outliers) dan kurang sensitif terhadap perbandingan perbedaan antara data model dengan data observasi (Legates and McCabe 1999). Rumus untuk menghitung nilai R² disajikan pada Persamaan (5).

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{sim})^2} \right) \quad (5)$$

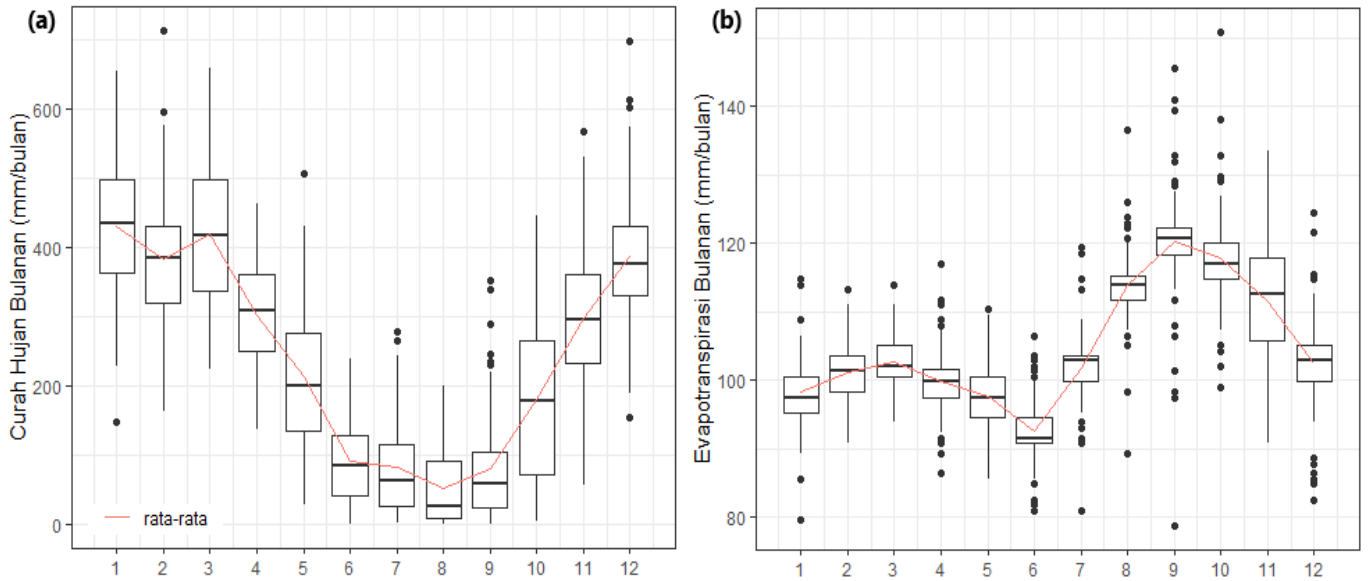
dimana nilai \bar{Q}^{sim} adalah nilai rata-rata debit simulasi (mm/bulan). Nilai korelasi (r) merupakan akar kuadrat dari R², dengan rentang nilai -1 sampai 1. Angka positif menunjukkan hubungan yang searah, angka negatif hubungan terbalik, dan mendekati angka nol menunjukkan hubungan yang semakin lemah.

Setelah kalibrasi parameter telah menghasilkan nilai indikator statistik yang bagus, kami melakukan identifikasi sensitivitas tiap parameter. Uji sensitivitas dilakukan secara manual, yaitu dengan mengubah nilai salah satu parameter sebesar $\pm 30\%$, kemudian dilakukan secara bergantian untuk parameter yang lain. Tingkat sensitivitas dianalisis berdasarkan pada perubahan nilai indikator statistik yang terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Variabilitas iklim DAS Cimanuk**

Berdasarkan data iklim CRU, pola curah hujan bulanan DAS Cimanuk termasuk pada kategori monsunial, yaitu memiliki satu kali puncak hujan dan satu kali periode kering dalam setahun (Gambar 2a). Periode kering terjadi pada bulan Juni-September dengan puncak bulan kering adalah Agustus, sedangkan periode basah pada bulan Desember-Maret dengan puncak bulan basah pada Januari. Nilai curah hujan pada tiap bulan sangat bervariasi. Pada bulan tertentu terdapat data diluar boxplot yang menandakan nilai pencilan (*outlier*). Pencilan menunjukkan bahwa selama tahun 1901-2016, DAS Cimanuk mengalami kekeringan ekstrem pada tahun tertentu, seperti El Niño kuat disertai fenomena IOD positif pada tahun 1997. Untuk skala tahunan, curah hujan rata-rata DAS Cimanuk berkisar 2903 mm/tahun. Curah hujan tahunan paling rendah terjadi pada tahun 1963 (1875 mm/tahun), dan paling tinggi pada tahun 2010 (3908 mm/tahun).

Selain parameter curah hujan, kami juga menganalisis variasi bulanan dari data ETp pada DAS Cimanuk (Gambar 2b). Nilai ETp rata-rata bulanan bervariasi dari 80-140 mm/bulan dengan nilai rata-rata sebesar 105 mm/bulan. Dalam satu tahun, nilai ETp bulanan tertinggi terjadi pada bulan September, sedangkan nilai terendah terjadi pada bulan Juni. Selama musim kemarau (Juni-Juli-Agustus), ETp cenderung meningkat lebih besar jika dibandingkan dengan saat musim penghujan (Desember-Januari-Februari). Untuk parameter suhu udara, nilai maksimum sekitar 30.6 °C, sedangkan nilai minimum sekitar 18.2 °C selama periode 1901-2016.



Gambar 2. Kondisi iklim DAS Cimanuk berdasarkan variasi bulanan parameter: (a) curah hujan, dan (b) evapotranspirasi, kedua parameter dalam skala mm/bulan. Analisis dilakukan selama periode 1901-2016. (Sumber data: CRU)

Evaluasi model SWAT

Hasil kalibrasi dan validasi model dalam bentuk grafik perbandingan deret waktu dari debit simulasi dan observasi disajikan pada Gambar 3. Secara visual, model SWAT mampu memodelkan debit sesuai dengan variasi curah hujan bulanan di DAS Cimanuk (Gambar 2a). Pada setiap periode satu tahun, model SWAT mensimulasikan debit dengan pola puncak-lembah-puncak. Hal ini menunjukkan bahwa data CRU sebagai input data iklim SWAT, mampu merepresentasikan kondisi iklim di wilayah DAS Cimanuk. Temuan ini searah dengan hasil penelitian Fadil et al. (2011) yang memodelkan kondisi hidrologis DAS Bouregreg (Morocco) menggunakan data CRU.

Selain itu, model SWAT mampu mensimulasikan debit rendah/periode kering lebih baik dibandingkan dengan debit tinggi/periode basah. Hampir seluruh periode debit rendah hasil simulasi sesuai dengan observasi. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter model SWAT yang berkaitan dengan karakteristik *groundwater* (dalam penelitian ini: GWQMN dan GW_REVAP), berhasil mencapai nilai optimal untuk DAS

Cimanuk. Sedangkan untuk debit puncak/periode basah, nilai debit simulasi memiliki pola yang sama dengan observasi, namun beberapa nilai debit simulasi lebih besar dari observasi (*overestimate*) dan ada beberapa lebih rendah dari observasi (*underestimate*). Untuk menegaskan kemampuan model dalam mensimulasikan debit puncak/periode basah, kami menggunakan nilai indikator statistik sebagai acuan proses kalibrasi.

Hasil kuantifikasi indikator statistik menunjukkan bahwa akurasi model SWAT mengalami penurunan pada proses validasi dibandingkan dengan proses kalibrasi (Tabel 2). Selisih antara nilai rerata debit observasi dengan simulasi pada validasi (2.36 m³/s) lebih besar dibandingkan saat proses kalibrasi (0.29 m³/s). Simulasi debit menghasilkan kisaran nilai yang sama pada periode kalibrasi dan validasi (~12 m³/s), sedangkan debit observasi mengalami penurunan (dari ~12 menjadi ~10 m³/s). Selisih nilai tersebut mengakibatkan perbedaan pada nilai PBIAS, r dan KGE di masing-masing periode.

Tabel 2. Kuantifikasi nilai akurasi model SWAT berdasarkan indikator statistik *goodness-of-fit*.

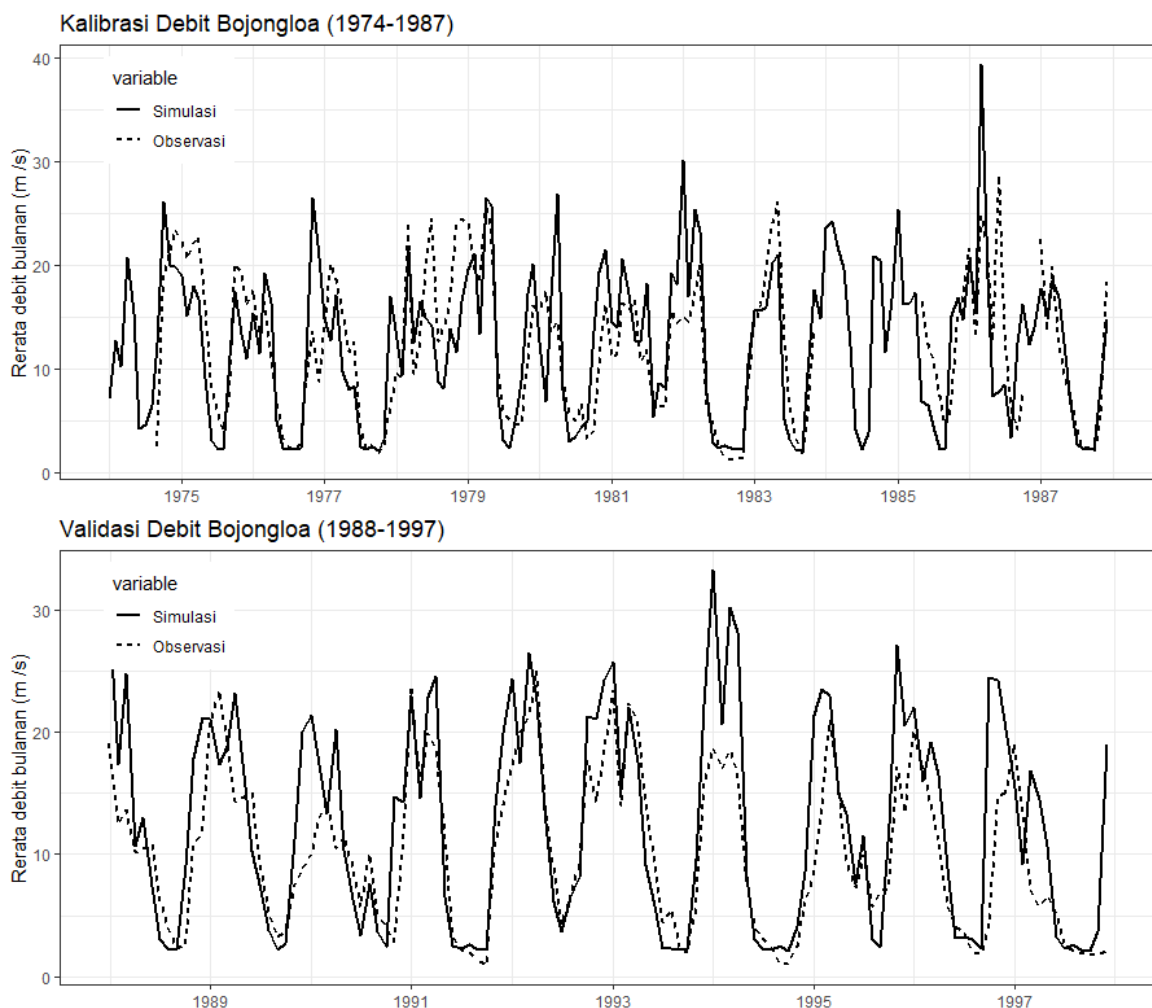
Indikator statistik	Kalibrasi (1974-1987)		Validasi (1988-1997)	
	Observasi	Simulasi	Observasi	simulasi
Rerata debit bulanan (m ³ /s)	12.30	12.09	10.21	12.57
PBIAS	-1.00		23.00	
R ²	0.54		0.66	
r	0.73		0.81	
KGE	0.73		0.56	

Pada periode kalibrasi, nilai PBIAS, r , dan KGE termasuk dalam kategori sangat baik (Moriassi et al., 2007; Pechlivanidis and Arheimer, 2015; Santhi et al., 2001). Pada periode validasi, nilai PBIAS menjauhi nilai 0, sehingga masuk dalam kategori memuaskan dan nilai KGE juga mengalami penurunan sehingga masuk dalam kriteria sedang. Sedangkan untuk nilai r mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Berdasarkan hasil tersebut, model SWAT yang terkalibrasi dinilai mampu digunakan untuk mensimulasikan debit bulanan jangka panjang. Beberapa perubahan nilai indikator statistik ini diduga dipengaruhi oleh kejadian iklim ekstrem kekeringan selama periode validasi, yaitu pada tahun 1997 (Fanin and van der Werf, 2017). Pada akhir tahun 1997 nilai debit simulasi berkisar $19 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan nilai observasi $\sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$ (lihat Gambar 3).

Nilai Parameter dan Analisis Sensitivitas

Proses kalibrasi menghasilkan nilai parameter model yang optimal untuk DAS Cimanuk (Tabel 3). Nilai optimal parameter CN2 menunjukkan bahwa selama

periode kalibrasi (1974-1987) DAS Cimanuk memiliki dominasi jenis lahan yang mampu menahan curah hujan dengan baik, misal pada kawasan hutan. Parameter SOL_AWC menunjukkan bahwa ketersediaan kandungan air tanah di DAS Cimanuk berkisar antara 11.8-21.4 %vol terhadap volume tanah. Untuk parameter koefisien manning (kekasaran) permukaan saluran sungai, kami mengkalibrasi untuk tiga jenis yang berbeda, meliputi kekasaran saluran anak sungai (CH_N1), kekasaran permukaan tanah (OV_N), dan kekasaran saluran sungai utama (CH_N2). Berdasarkan dokumentasi model SWAT, nilai parameter CH_N1 dan CH_N2 (0.12 dan 0.11) menunjukkan bahwa anak sungai dan sungai merupakan saluran sungai alami yang sekitar alirannya penuh semak dan pepohonan besar. Sedangkan parameter OV_N bernilai 0.1-0.15 menunjukkan bahwa kekasaran permukaan tanah DAS Cimanuk mendekati kekasaran lahan di padang rumput (Arnold et al., 2012). Parameter CH_K2 (konduktivitas hidrolik sungai) bernilai 100 mm/jam berarti bahwa karakteristik dasar saluran sungai utama berupa kerikil dan berpasir.



Gambar 3. Grafik perbandingan deret waktu debit hasil simulasi (merah) dengan debit observasi (biru) pada periode kalibrasi dan validasi. (Sumber data: model SWAT dan Pusair)

Parameter GWQMN bernilai 5000 mm menunjukkan bahwa aliran air tanah (*interflow* maupun *baseflow*) hanya terjadi jika tinggi muka air tanah maksimum 5m. Parameter ESCO bernilai 0.1 menunjukkan bahwa ekstraksi air tanah pada lapisan yang lebih dalam mudah terjadi jika tingkat evaporasi permukaan meningkat. Parameter GW_REVAP bernilai 0.2 menunjukkan bahwa pergerakan air dari lapisan akuifer dangkal menuju ke lapisan perakaran agak terbatas. Dalam penelitian ini, analisis sensitivitas juga dilakukan untuk mengidentifikasi parameter model yang paling berpengaruh terhadap nilai debit (Tabel 3). Parameter CN2 menjadi parameter yang paling sensitif terhadap nilai debit aliran Sungai Cimanuk. Parameter ini berpengaruh langsung pada perhitungan debit, dimana dalam model SWAT, komponen limpasan dihitung menggunakan metode SCS-CN. Dari sembilan parameter yang digunakan, terdapat empat parameter (ESCO, OV_N, GW_REVAP, dan CH_N2) yang dinilai paling kurang sensitif. Perubahan sebesar +30% hingga -30% belum mampu mengubah nilai/pola debit simulasi.

Debit Bulanan Jangka Panjang

Model SWAT yang telah dikalibrasi kemudian digunakan untuk memprediksi nilai debit bulanan Sungai Cimanuk periode 1901-2016. Data debit bulanan jangka panjang mengindikasikan bahwa DAS Cimanuk memiliki pola musonial (Gambar 4a), sesuai dengan pola curah hujan (Gambar 2a). Periode debit rendah terjadi pada musim kemarau (Juni-September), dan kemudian meningkat hingga mencapai debit tinggi pada akhir tahun dan awal tahun setelahnya. Temuan ini searah dengan hasil penelitian Aidi (2019) yang menyatakan hubungan kuat ($r = 0.807$) antara debit sungai dengan curah hujan bulanan. Debit bulanan ekstrem tinggi selama tahun 1901-2016 terjadi pada bulan Maret tahun 1931 dan 1994 (38.2 dan 39.3 m^3/s) (lihat juga pada Gambar 4b). Pencilan data debit

di bagian atas boxplot menunjukkan bahwa beberapa kali kejadian debit ekstrem puncak akibat fenomena La Nina yang meningkatkan debit pada musim kemarau, seperti pada tahun 1955-56, dan 1988-89 berdasarkan data Oceanic Niño Index (ONI) yang bernilai negatif (<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov > ONI v5>).

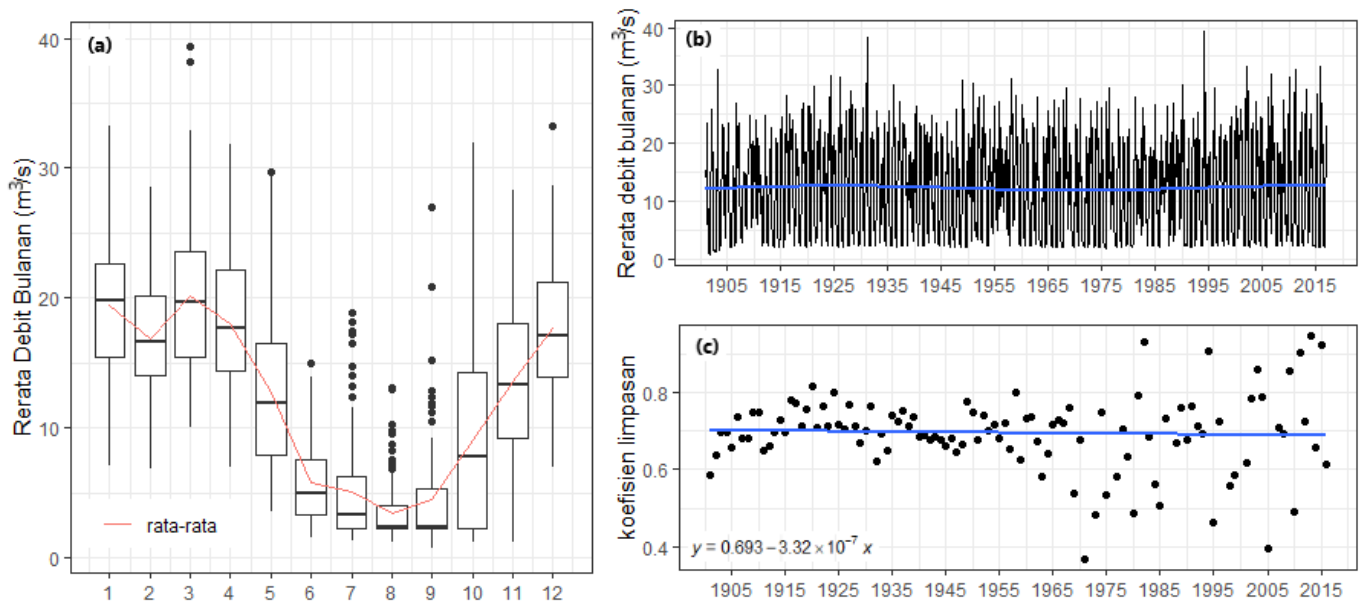
Berdasarkan data deret waktu debit bulanan (Gambar 4b), secara visual data tidak menunjukkan tren perubahan selama tahun 1901-2016. Hal ini sama dengan hasil penelitian Julian et al. (2018) yang melakukan analisis tren debit menggunakan uji Man-Kendall pada beberapa sungai besar di Jawa Barat, termasuk Cimanuk. Variasi nilai koefisien limpasan mengalami peningkatan mulai tahun 1970an (Gambar 4c). Hal ini berbeda dengan peubah hidrologi lain, seperti kadar air tanah yang menunjukkan tren penurunan di wilayah *humid* Palembang (Taufik, 2010). Rentang nilai koefisien limpasan sebelum tahun 1970an berkisar 0.6-0.8, kemudian berubah secara signifikan menjadi 0.3-0.9. Peningkatan variasi koefisien limpasan dapat disebabkan oleh perubahan tutupan lahan dan variabilitas curah hujan (Herawati et al., 2018).

Keterbatasan Hasil Simulasi Debit

Model SWAT menggunakan data input spasial, meliputi data DEM, data tutupan lahan, dan data jenis tanah, sebagai data yang bersifat stasioner (tetap). Untuk berbagai panjang periode simulasi debit, data spasial yang digunakan, terutama data tutupan lahan, diasumsikan tidak mengalami perubahan. Pada penelitian ini, kami menggunakan asumsi bahwa tutupan lahan pada tahun 1901-2016 adalah sama dengan tutupan lahan pada tahun 2011. Untuk prediksi debit secara historis, data tutupan lahan kurang relevan dengan kondisi tutupan lahan pada masa lampau, yang mana tahun 2011 telah terjadi perubahan lahan di kawasan DAS Cimanuk sejak tahun 1994 (Devianti, 2016).

Tabel 3. Hasil parameterisasi model SWAT untuk pemodelan debit bulanan Sungai Cimanuk dan urutan sensitivitas tiap parameter.

Parameter	Deskripsi	Nilai Terkalibrasi	Urutan Sesitivitas
CN2	<i>SCS runoff curve number</i>	52.5-69	1
SOL_AWC	<i>Available water content of soil</i>	0.118-0.214	2
CH_N1	<i>Manning coefficient of branches</i>	0.12	3
CH_K2	<i>Channel effective hydraulic conductivity (mm/h)</i>	100	4
GWQMN	<i>Threshold water depth in the shallow aquifer for return flow to occur (mm)</i>	5000	5
ESCO	<i>Soil evaporation compensation factor</i>	0.1	6
OV_N	<i>Manning's "n" value for overland flow</i>	0.1-0.15	6
GW_REVAP	<i>Groundwater revaporation coefficient</i>	0.2	6
CH_N2	<i>Manning coefficient of the main channel</i>	0.11	6



Gambar 4. Hasil simulasi jangka panjang (1901-2016) untuk Sungai Cimanuk oleh pemodelan SWAT: (a) variasi nilai debit rata-rata bulanan, (b) deret waktu nilai debit bulanan, dan (c) perubahan nilai koefisien limpasan. Garis biru menunjukkan tren data deret waktu.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini, model SWAT dengan input data CRU digunakan untuk memprediksi debit bulanan jangka panjang periode 1901-2016. Berdasarkan analisis time series dari data hidrometeorologi CRU di DAS Cimanuk, parameter suhu udara memiliki tren positif, sedangkan evapotranspirasi potensial memiliki tren yang negatif. Evaluasi model terlebih dahulu dilakukan pada periode 1974-1997, untuk menilai akurasi nilai debit simulasi terhadap observasi. Kalibrasi otomatis dengan algoritma SUFI-2 dikombinasikan dengan kalibrasi manual dilakukan dalam proses kalibrasi model SWAT. Berdasarkan hasil kalibrasi dan validasi, model SWAT mampu mensimulasikan debit bulanan dengan performa yang baik. Model yang telah dikalibrasi, kemudian digunakan untuk prediksi jangka panjang. Berdasarkan hasil simulasi, debit aliran Sungai Cimanuk dalam skala bulanan memiliki pola muson. Sedangkan analisis deret waktu debit bulanan dan koefisien limpasan menunjukkan tren normal selama periode 1901-2016.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaspour, K.C., 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual.
- Aidi, M.N., 2019. The Influence of Precipitation, Stream Discharge, and Physiographic Factors on Flood Vulnerability at Cimanuk River-West Java, Indonesia. *Journal of Sustainability Science and Management* 14, 125-136.
- Anand, J., Gosain, A.K., Khosa, R., Srinivasan, R., 2018. Regional scale hydrologic modeling for

prediction of water balance, analysis of trends in streamflow and variations in streamflow: The case study of the Ganga River basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 16, 32-53. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.007>

- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., Neitsch, S.L., 2012. Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation. Version 2012.
- Devianti, 2016. Pola Perubahan Penggunaan Lahan Sub Sub Daerah Aliran Sungai (DAS) Cikujang. *Journal Rona Teknik Pertanian* 9, 147-156.
- Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., Bachir, O.A., 2011. Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model. *Journal of Geographic Information System* 03, 279-289. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.34024>
- Fanin, T., van der Werf, G.R., 2017. Precipitation-fire linkages in Indonesia (1997-2015). *Biogeosciences* 14, 3995-4008. <https://doi.org/10.5194/bg-14-3995-2017>
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., Lister, D.H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset: Updated High-Resolution Grids of Monthly Climatic Observations. *International Journal of Climatology* 34, 623-642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Herawati, H., Suripin, S., Suharyanto, S., Hetwisari, T., 2018. Analysis of River Flow Regime Changes Related to Water Availability on the Kapuas River, Indonesia. *Irrigation and Drainage* 67, 66-71. <https://doi.org/10.1002/ird.2103>

- Heuvelmans, G., Garcia-Qujano, J.F., Muys, B., Feyen, J., Coppin, P., 2005. Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO₂ emission reduction scenarios. *Hydrological Processes* 19, 729–748. <https://doi.org/10.1002/hyp.5620>
- Julian, M., Nishio, F., Poerbandono, Ward, P.J., 2018. Simulation of River Discharges in Major Watersheds of Northwestern Java from 1901 To 2006. *INA-Rxiv*. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v2i1.44>
- Liang, Z., Tang, T., Li, B., Liu, T., Wang, J., Hu, Y., 2017. Long-term streamflow forecasting using SWAT through the integration of the random forest precipitation generator: case study of Danjiangkou Reservoir. *Hydrology Research* 49, 1513–1527. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.085>
- Liu, Y., Sang, Y.-F., Li, X., Hu, J., Liang, K., 2017. Long-Term Streamflow Forecasting Based on Relevance Vector Machine Model. *Water* 9. <https://doi.org/10.3390/w9010009>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Munggaran, G., Hidayat, Y., Tarigan, S.D., Baskoro, D.P.T., 2017. Analisis Respon Hidrologi dan Simulasi Teknik Konservasi Tanah Dan Air Sub DAS Cimanuk Hulu. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan* 25–31.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Noh, H., Lee, J., Kang, N., Lee, D., Kim, H.S., Kim, S., 2016. Long-Term Simulation of Daily Streamflow Using Radar Rainfall and the SWAT Model: A Case Study of the Gamcheon Basin of the Nakdong River, Korea. *Advances in Meteorology* 2016, 12. <https://doi.org/10.1155/2016/2485251>
- Pechlivanidis, I.G., Arheimer, B., 2015. Large-scale hydrological modelling by using modified PUB recommendations: the India-HYPE case. *Hydrology and Earth System Sciences* 19, 4559–4579. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4559-2015>
- Ridwansyah, I., Fakhrudin, M., Wibowo, H., Yulianti, M., 2018. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of best management practices in Jatigede Catchment Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 118, 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012030>
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M., 2001. Validation of The Swat Model on A Large River Basin with Point and Nonpoint Sources. *Journal of the American Water Resources Association* 37, 1169–1188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>
- Seo, Y., Kim, S., Kisi, O., Singh, V.P., 2015. Daily water level forecasting using wavelet decomposition and artificial intelligence techniques. *Journal of Hydrology* 520, 224–243. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.050>
- Singh, S.K., 2016. Long-term Streamflow Forecasting Based on Ensemble Streamflow Prediction Technique: A Case Study in New Zealand. *Water Resources Management* 30, 2295–2309. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1289-7>
- Taufik, M., 2010. Analysis of Drought Index in Fire-Prone Region Of South Sumatra. *Agromet* 24, 9–17.
- Uniyal, B., Jha, M.K., Verma, A.K., 2015. Assessing Climate Change Impact on Water Balance Components of a River Basin Using SWAT Model. *Water Resources Management* 29, 4767–4785. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1089-5>
- Widyastuti, M.T., Taufik, M., Santikayasa, I.P., 2018. Prediksi Debit Jangka Panjang untuk Sungai Bengawan Solo. *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian* 15, 71–82.
- Worqlul, A.W., Ayana, E.K., Maathuis, B.H.P., MacAlister, C., Philpot, W.D., Osorio Leyton, J.M., Steenhuis, T.S., 2018. Performance of bias corrected MPEG rainfall estimate for rainfall-runoff simulation in the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology* 556, 1182–1191. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.058>
- Zambrano-Bigiarini, M., 2017. hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time seriesR package version 0.3-10.