

Analisis statistik kinerja dan koreksi kesalahan data curah hujan berbasis satelit di Provinsi Bali

Putu Aryastana^{1,2*}, Cokorda Agung Yujana^{2,3}, Kadek Windy Candrayana^{2,3}, Krishna Himawan Subiyanto⁴

¹Magister Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Universitas Warmadewa

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa

³Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa

⁴Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang

* Email: aryastanaputu@warmadewa.ac.id.

Submitted: 2024-09-14 Revisions: 2025-03-06 Accepted: 2024-09-11 Published: 2025-03-14

©2025 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2025 by the authors and Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Abstrak Data curah hujan yang akurat, reliabel, dan mendekati waktu nyata adalah faktor penting dalam analisis peramalan dan mitigasi bencana alam hidro klimatologi (banjir, tanah longsor, topan, dan curah hujan ekstrim), pemodelan hidrologi, prakiraan cuaca, perencanaan pertanian, manajemen ekologi, dan manajemen sumber daya air. Observasi curah hujan stasiun menghadapi kendala di Provinsi Bali, terutama pengukuran jarang ditemui di daerah terpencil dan pegunungan. Oleh karena itu, perlu mencari sumber data hujan yang dapat diandalkan seperti produk hujan berbasis satelit, yang menyediakan data dalam waktu mendekati waktu nyata (*near real-time*), deretan waktu hujan yang tidak terputus dengan resolusi spasial tinggi. Penelitian ini mengevaluasi kinerja produk hujan satelit global yang mendekati waktu nyata dengan 43 stasiun di Provinsi Bali. Produk curah hujan satelit yang dianalisis adalah *Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement-Early Run* (IMERG-ER) dan *The Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Dynamic Infrared Rain Rate near real-time* (PDIR-Now). Selanjutnya, kedua data curah hujan berbasis satelit tersebut dikoreksi menggunakan tiga pendekatan, yaitu koreksi rasio bias, koreksi rata-rata deviasi, dan koreksi nilai fungsi distribusi probabilitas. Metode tradisional berbasis titik ke piksel bersama dengan pengukuran statistik kontinu, metrik kategoris, serta indeks volumetrik diimplementasikan untuk mengevaluasi kinerja produk satelit. Studi ini menunjukkan bahwa meskipun kedua dataset memiliki kelebihan masing-masing, IMERG-ER cenderung lebih konsisten dan andal dalam berbagai kondisi dibandingkan PDIR-Now, terutama setelah koreksi dilakukan. Koreksi nilai fungsi distribusi probabilitas menunjukkan peningkatan kinerja paling signifikan dibandingkan dengan metode koreksi yang lainnya. Hasil studi ini juga mempertegas bahwa koreksi kesalahan perlu dilakukan sebelum data curah hujan berbasis satelit diaplikasikan dan berbagai bidang.

Kata kunci: curah hujan; kinerja; koreksi; peningkatan; satelit

Abstract Accurate, reliable, and near-real-time rainfall data are critical factors for forecasting and mitigating hydro-meteorological natural disasters (such as floods, landslides, typhoons, and extreme rainfall), hydrological modeling, weather forecasting, agricultural planning, ecological management, and water resource management. Rainfall observations from station measurements face challenges in Bali Province, particularly due to the scarcity of measurements in remote and mountainous areas. Therefore, it is necessary to seek reliable sources of rainfall data, such as satellite-based rainfall products, which provide near real-time data, uninterrupted rainfall time series, and high spatial resolution. This research evaluates the performance of global near real-time satellite rainfall products with data from 43 stations across Bali Province. The satellite rainfall products analyzed include the *Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement-Early Run* (IMERG-ER) and the *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Dynamic Infrared Rain Rate near real-time* (PDIR-Now). Subsequently, the satellite-based rainfall data were corrected using three approaches: bias ratio correction, mean deviation correction, and probability distribution function value correction. Traditional point-to-pixel methods, along with continuous statistical measurements, categorical metrics, and volumetric indices, were implemented to evaluate the performance of satellite products. The study reveals that although both datasets have their respective strengths, IMERG-ER tends to be more consistent and reliable under various conditions compared to PDIR-Now, especially after corrections are applied. The probability distribution function value correction demonstrated the most significant performance improvement compared to the other correction methods. The findings of this study also emphasize the necessity of error correction before satellite-based rainfall data is applied across various fields.

Keywords: rainfall; performance; correction; improvement; satellite

PENDAHULUAN

Hujan merupakan komponen vital dalam sistem iklim yang memiliki peran signifikan dalam siklus air serta menjaga keseimbangan energi di planet ini (Morbideilli et al., 2021;

Nurfaijin, 2013; Torre et al., 2024). Perubahan dalam intensitas curah hujan yang tinggi serta distribusi hujan secara signifikan berdampak pada ekosistem, siklus air, dan iklim (Shi et al., 2020; Tambie et al., 2024; Torre et al., 2024; Wang et al.,

2021). Curah hujan memengaruhi kejadian ekstrem seperti kekeringan, banjir, dan badai, yang dapat menyebabkan kerusakan besar bagi manusia serta lingkungan (Nguyen et al., 2018; Putra et al., 2024). Dengan demikian, pencatatan data curah hujan dalam jangka panjang sangat penting untuk memperkaya pemahaman terkait variabilitas dan dinamika iklim, serta memperkuat kapasitas dan ketahanan masyarakat dalam menghadapi dan beradaptasi terhadap peristiwa iklim ekstrem. Selain itu, diperlukan pengukuran curah hujan yang tepat dan terpercaya guna menggambarkan variabilitas curah hujan yang kompleks secara spasial dan temporal (Tambie et al., 2024).

Data curah hujan bisa diperoleh dari berbagai sumber, seperti pengukuran lapangan (misalnya, penakar hujan, disdrometer, dan radar) serta melalui pengukuran satelit (Kummerow & Giglio, 1994; Li et al., 2013; Salio et al., 2015; Q. Sun et al., 2018; Sunilkumar et al., 2015). Pengukuran di lapangan umumnya dilakukan menggunakan penakar hujan yang ditempatkan di stasiun hujan observasi pada suatu lokasi (New et al., 2001). Namun, karena curah hujan memiliki variabilitas spasial yang tinggi, stasiun hujan observasi sering kali tidak mampu memberikan gambaran yang akurat mengenai kondisi curah hujan di suatu wilayah. Kondisi ini terutama terjadi di berbagai wilayah dunia, terutama di negara-negara berkembang, di mana keberadaan stasiun hujan observasi sangat terbatas (Hughes, 2006), sehingga kejadian curah hujan di antara titik-titik stasiun hujan observasi berpotensi tidak terpantau. Untuk mengatasi keterbatasan ini, data curah hujan berbasis satelit (DCHBS) dapat dimanfaatkan untuk memantau curah hujan dengan cakupan yang lebih luas (Ayugi et al., 2019). Selama beberapa dekade terakhir, DCHBS telah menjadi metode utama untuk pengukuran curah hujan (Tan et al., 2015; Xu et al., 2017). Pemanfaatan satelit hujan menyediakan solusi yang lebih efisien dan biaya yang lebih rendah untuk memperkirakan curah hujan di skala wilayah tertentu (Artan et al., 2007). DCHBS banyak digunakan dalam berbagai aplikasi lingkungan, termasuk analisis karakteristik curah hujan (Sohn et al., 2013), pemodelan hidrologi (Zhu et al., 2016), dan pemantauan kekeringan (Tao et al., 2016). Beberapa contoh data satelit yang sering digunakan adalah *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP), *Global precipitation measurement-The Integrated Merged Multisatellite Retrievals* (GPM-IMERG), *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS), *Climate Prediction Center Morphing Method* (CMORPH), *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN), dan lain sebagainya (Brunetti et al., 2018; Liao et al., 2010; Muntohar et al., 2021; Rossi et al., 2017; Tan & Duan, 2017; Yuda et al., 2020).

Penggunaan DCHBS dalam berbagai bidang penelitian memerlukan validasi yang tepat untuk menilai kualitas data yang terkandung dalam DCHBS. Data dari stasiun hujan observasi sering dijadikan sebagai acuan lapangan untuk memvalidasi DCHBS (Dinku et al., 2007). Validasi ini telah dilakukan dalam berbagai kondisi iklim, seperti di daerah tropis (Tan & Santo, 2018), lingkungan kering (Katiraie-Boroujerdy et al., 2013), serta wilayah dengan topografi yang kompleks (Derin et al., 2016). Hasil yang diperoleh dari produk satelit hujan dapat berbeda tergantung pada kondisi lingkungan setempat. Oleh karena itu, (Feidas, 2010) menekankan pentingnya evaluasi kuantitatif terhadap kinerja produk satelit hujan di berbagai wilayah dan musim. Penilaian

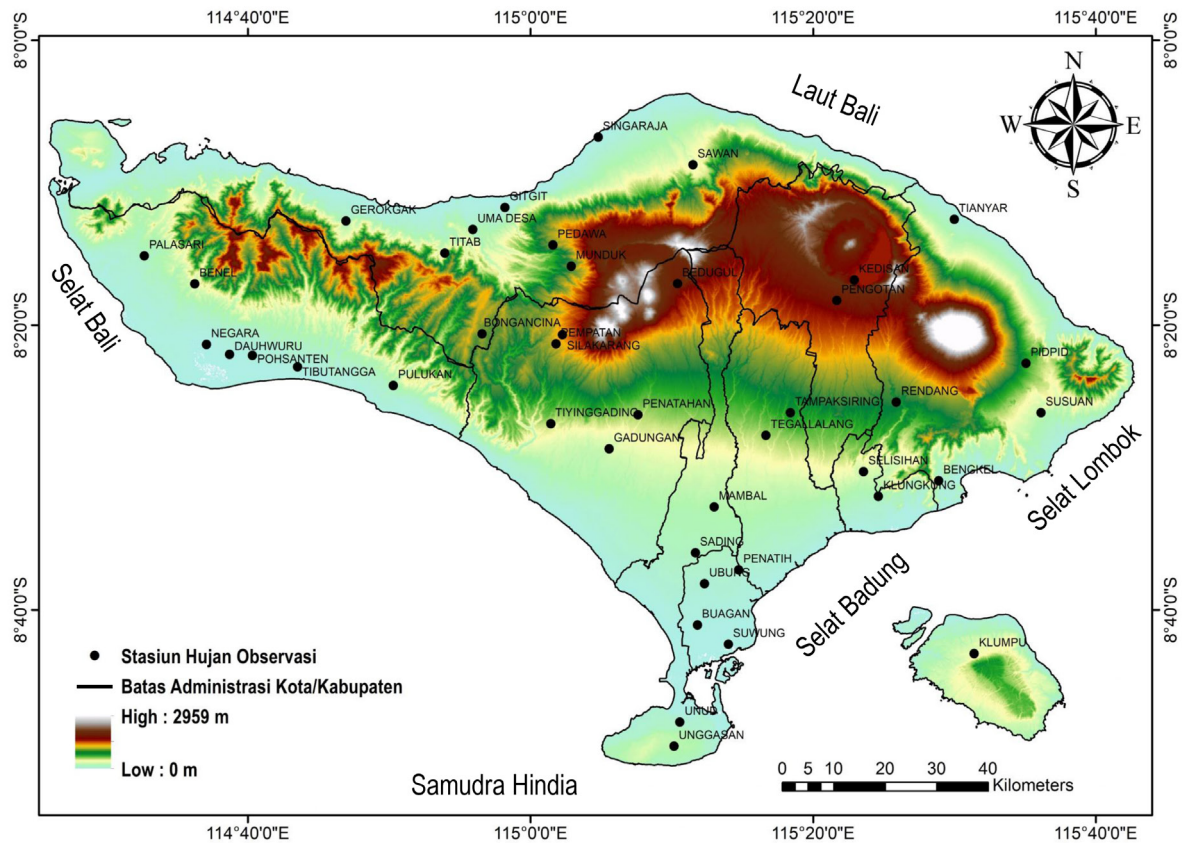
semacam ini sangat penting untuk mendukung pengembangan sensor satelit dan penyempurnaan algoritma yang digunakan dalam pembuatan produk tersebut (Tan & Santo, 2018). Sementara banyak penelitian yang telah mengevaluasi produk satelit hujan di wilayah daratan, hanya sedikit yang dilakukan di lingkungan kepulauan (Caracciolo et al., 2018; W.-R. Huang et al., 2018).

Penelitian mengenai penilaian atau evaluasi kemampuan DCHBS di Bali masih sangat terbatas. Pertama, perbandingan harian dan bulanan antara dataset TMPA 3B42 dan 3B43 dengan hanya 3 pengukuran alat ukur antara tahun 1998 dan 2002 dengan analisis deskriptif (As-Syakur et al., 2011). Kedua, validasi dataset PERSIANN, CMORPH, dan TRMM dengan menggunakan analisis deskriptif dan kategoris di berbagai ketinggian dan daerah iklim (Rahmawati & Lubczynski, 2018). Ketiga, penilaian 3 DCHBS yaitu GSMaP, IMERG, dan CHIRPS dengan menggunakan analisis deskriptif, kategori, dan volumetric indeks untuk berbagai intensitas curah hujan, berbagai skala waktu, dan ketinggian (Liu et al., 2020). Terakhir, penilaian produk IMERG dan produk analisis ulang dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) *Reanalysis v5* (ERA-5) dengan menggunakan analisis statistik kontinu, kategori matrik, dan volumetrik indeks dalam skala jam-jaman, 3-jaman, 6-jaman, 12-jaman, dan harian (Aryastana et al., 2023). Belum ada penelitian mengenai evaluasi kinerja dan koreksi kesalahan DCHBS yang mendekati waktu nyata (*near real-time*) di Pulau Bali, sehingga analisis ini dilakukan dalam studi saat ini.

Provinsi Bali, yang berbatasan dengan laut, memiliki topografi yang beragam. Di bagian utara terdapat jajaran pegunungan yang membentang dari timur ke barat. Sementara itu, wilayah dataran rendah di utara relative sempit dan memiliki ketinggian yang curam, sedangkan di bagian selatan dataran rendahnya lebih luas dan cenderung landai. Keadaan ini merupakan elemen regional yang mungkin berdampak pada pola curah hujan di sekitarnya (Liu et al., 2020). Curah hujan adalah input utama dalam simulasi hidrologi yang akan digunakan untuk menilai pengelolaan sumber daya air (Ayehu et al., 2018), sehingga diperlukan DCHBS di Provinsi Bali untuk melengkapi kepadatan yang relatif tinggi dari jaringan pengukuran alat ukur yang sudah ada. Selanjutnya, pengukuran curah hujan yang akurat pada berbagai skala ruang dan waktu sangat penting di berbagai wilayah termasuk salah satunya di Provinsi Bali untuk berbagai aplikasi (misalnya, manajemen sumber daya air, pemodelan hidrologi, analisis produktifitas pertanian, dan mitigasi bencana banjir, tanah longsor, dan kekeringan). Oleh karena itu, tujuan dari penelitian saat ini adalah untuk menilai kinerja DCHBS (IMERG-ER dan PDIR-Now) terhadap 43 stasiun hujan observasi di Provinsi Bali dari tahun 2013 hingga 2022 serta menganalisis koreksi kesalahan dengan menggunakan data hujan pengukuran stasiun. Hasil penelitian diharapkan dapat dijadikan alternatif data curah hujan pengganti data stasiun hujan observasi yang terbatas.

METODE PENELITIAN

Kemampuan kinerja produk IMERG-ER, dan PDIR-Now dievaluasi dengan membandingkan data dari 43 stasiun hujan observasi harian yang dikelola oleh Balai Wilayah Sungai Bali Penida (BWS-BP) di Provinsi Bali. Titik-titik lokasi stasiun hujan observasi sebagai referensi dapat dilihat pada Gambar 1. Gambar 1 juga menunjukkan variasi ketinggian di Provinsi Bali dari 0 sampai 2959 meter di atas permukaan laut. Variasi topografi memberikan pengaruh terhadap efektivitas kinerja



Gambar 1. Permukaan topografi di Provinsi Bali mencakup lokasi-lokasi stasiun hujan observasi.

dari DCHBS (Aryastana et al., 2022, 2023; Dinku et al., 2010; Liu et al., 2020).

Data penelitian

Data hujan harian dari 43 stasiun hujan observasi yang dikelola oleh BWS-BP digunakan sebagai referensi dalam menganalisis kinerja DCHBS. Rentang waktu data hujan yang diberikan oleh BWS-BP adalah dari tahun 2013 sampai dengan 2022. Dua DCHBS yang dianalisis keandalannya adalah IMERG-ER dan PDIR-Now. Produk IMERG yang diuji keandalannya adalah jenis harian, IMERG Early Precipitation (IMERG-E) Level 3 versi 6. Dataset ini memiliki resolusi spasial dan temporal masing-masing $0,1^\circ$ dan 30 menit (Huffman et al., 2019). Dataset ini diunduh secara bebas dalam format netCDF4 melalui *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* [GES DISC] di <https://disc.gsfc.nasa.gov/>. PDIR-Now adalah salah satu dataset dari PERSIANN yang dapat memperkirakan curah hujan global dengan resolusi spasial $0,04^\circ$ (sekitar 4×4 km) dengan algoritma *Cloud Clustering* dan data infrared (IR) sebagai data input tunggal. Data hujan satelit PERSIANN diperoleh dari website <http://chrdata.eng.uci.edu> (Nguyen et al., 2020).

Metode penelitian

Analisis kuantitatif terhadap kinerja produk IMERG-ER dan PDIR-Now dilakukan dengan menggunakan pengukuran statistik kontinu, metrik kategoris, serta indeks volumetrik dengan membandingkan nilai curah hujan titik-ke-piksel dari stasiun hujan observasi dan DCHBS yang bersesuaian. Metode uji yang digunakan meliputi *correlation coefficient* (CC), *mean absolute error* (MAE), *relative bias* (RB), dan *root mean square error* (RMSE). Parameter-parameter ini digunakan untuk

mengevaluasi perbedaan antara data curah hujan dari satelit dan data yang diperoleh dari stasiun pengamatan hujan (Ebert, 2007; Nikolopoulos et al., 2017; Xu et al., 2017). Metrik kategori diterapkan untuk mengevaluasi kemampuan data satelit dalam mengidentifikasi kejadian hujan atau tidak hujan. Tiga metrik kategori yang digunakan yaitu *probability of detection* (POD), *false alarm ratio* (FAR), dan *success ratio* (SR) (Dinku et al., 2007; Ebert, 2007; Gado et al., 2024; Xu et al., 2017). Indeks volumetrik mengevaluasi volume variabel yang sesuai yang berhasil terdeteksi oleh data satelit dibandingkan dengan hasil pengamatan dari stasiun hujan observasi (Aghakouchak & Mehran, 2013; Aryastana et al., 2022; Ayehu et al., 2018; Liu et al., 2020). Penelitian ini menggunakan *volumetric hit index* (VHI), *volumetric false alarm ratio* (VFAR), dan *volumetric critical success index* (VCSI). Persamaan statistik dari masing-masing parameter yang digunakan dalam menilai keandalan DCHBS dapat dilihat pada Tabel 1. Pada Tabel 1, S_i dan G_i menunjukkan nilai curah hujan berturut-turut dari DCHBS (IMERG-ER dan PDIR-Now) dan stasiun hujan observasi, sedangkan $\bar{S}$ dan $\bar{G}$ berturut-turut menyatakan nilai rata-rata curah hujan dari DCHBS dan stasiun hujan observasi. N merupakan jumlah keseluruhan data yang digunakan. A , B , C , dan D berturut-turut mewakili *hit*, *false alarm*, *miss*, dan *correct negative*. *Hit* menunjukkan perkiraan kejadian hujan dengan benar, *false alarm* menggambarkan saat hujan diperkirakan tetapi sebenarnya hujan tidak terjadi, *miss* adalah kondisi kapan hujan tidak diperkirakan tetapi kenyataannya hujan terjadi, dan *correct negative* menunjukkan perkiraan dan kenyataan tidak terjadi hujan. Pada indeks volumetrik, t adalah ambang batas intensitas hujan yang diinginkan. Penelitian ini menggunakan 1 mm/day sebagai ambang batas intensitas hujan untuk menganalisis keandalan DCHBS mendeteksi volume hujan tertentu.

Tabel 1. Indeks statistik evaluasi keandalan DCHBS

Indeks statistik	Nilai sempurna
$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}}$	1
$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N abs(S_i - G_i)$	0
$RB = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^N (G_i)}$	0
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - G_i)^2}$	0
$POD = \frac{A}{A+C}$	1
$FAR = \frac{B}{A+B}$	0
$SR = 1 - FAR$	1
$VHI = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i > t))}{\sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i > t)) + \sum_{i=1}^N (G_i / (S_i \leq t \& G_i > t))}$	1
$VFAR = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i \leq t))}{\sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i > t)) + \sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i \leq t))}$	0
$VCSI = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i > t))}{\sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i > t)) + \sum_{i=1}^N (G_i / (S_i \leq t \& G_i > t)) + \sum_{i=1}^N (S_i / (S_i > t \& G_i \leq t))}$	1

Tabel 2. Persamaan koreksi DCHBS

Metode koreksi	Persamaan
Koreksi rasio bias (Koreksi 1)	$S_{kor1} = S_i \times \frac{\sum G_i}{\sum S_i}$
Koreksi rata-rata deviasi (Koreksi 2)	$S_{kor2} = S_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - S_i)$
Koreksi nilai fungsi distribusi probabilitas (Koreksi 3)	$S_{kor3} = S_i + (G_i \times PDF_G)$

Data estimasi curah hujan berbasis satelit memiliki kelemahan yaitu terdapat bias atau kesalahan jika dibandingkan dengan data pengamatan stasiun, sehingga memerlukan koreksi guna meningkatkan keandalannya sebelum dipergunakan dalam pemodelan hidrologi, cuaca dan bencana alam. Perbandingan tiga metode koreksi dipergunakan pada studi saat ini yaitu rasio bias, rata-rata deviasi, dan nilai fungsi distribusi probabilitas (AghaKouchak et al., 2010; Chen et al., 2021; Dai et al., 2014). Persamaan detail untuk masing-masing metode koreksi dapat dilihat pada Tabel 2. Pada Tabel 1, S_i dan G_i menunjukkan nilai curah hujan berturut-turut dari DCHBS (IMERG-ER dan PDIR-Now) dan stasiun hujan observasi, sedangkan PDFG menggambarkan fungsi distribusi probabilitas dari data pengukuran stasiun hujan observasi. Simbol N adalah jumlah keseluruhan data yang digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja DCHBS sebelum koreksi

Analisis kinerja data curah hujan harian merupakan faktor kunci dalam pemodelan hidrologi (Wong et al., 2017). Perbandingan keandalan data IMERG-ER dan PDIR-Now dibandingkan dengan data pengamatan pada stasiun hujan observasi dapat dilihat pada Tabel 3. Data IMERG-ER terlihat lebih andal jika dibandingkan dengan data PDIR-Now. Hal ini terlihat dari nilai parameter statistik CC, MAE, RB, RMSE, POD, VHI, dan VCSI pada produk IMERG-ER lebih baik dari pada PDIR-Now. Keunggulan ini kemungkinan disebabkan karena data IMERG-ER diestimasi menggunakan gabungan citra gelombang mikro pasif dan inframerah, sedangkan data PDIR-Now diperkirakan hanya menggunakan citra inframerah (Huffman et al., 2019; Nguyen et al., 2020). Selain

itu, resolusi waktu IMERG-ER yang lebih tinggi dari PDIR-Now memungkinkan keefektifan dalam merekam variabilitas regional curah hujan harian (Dezfuli et al., 2017). Namun disisi lain, IMERG-ER masih memiliki nilai CC yang cukup rendah yaitu berturut-turut 0.52, 0.36, dan 0.38. Rendahnya nilai CC sebenarnya sejalan dengan penelitian sebelumnya di Provinsi Bali, dan China yaitu antara 0.20 sampai 0.57 (Aryastana et al., 2023; C. Huang et al., 2019; Liu et al., 2020). IMERG-ER cenderung mengestimasi curah hujan lebih tinggi, sedangkan PDIR-Now cenderung mengestimasi curah hujan lebih rendah yang dibuktikan dari nilai negatif pada RB.

Tiga metrik kategori yang digunakan yaitu POD, FAR, dan SR untuk menggambarkan kemampuan DCHBS dalam merekam kejadian hujan. Kejadian hujan dipertimbangkan bila curah hujan lebih dari 1 mm/day (Gado et al., 2024). Estimasi hujan IMERG-ER lebih tinggi dari pada PDIR-Now. IMERG-ER mampu mendeteksi kejadian hujan sekitar 71%, sedangkan PDIR-Now hanya mampu mendeteksi kejadian hujan sebanyak 62%. Probabilitas IMERG-ER dalam mencatat kejadian hujan palsu lebih tinggi dibandingkan dengan PDIR-Now berdasarkan nilai FAR yang mencerminkan sekitar 52% kejadian hujan salah diperkirakan oleh IMERG-ER, sedangkan rasio ini menurun hingga 50% untuk PDIR-Now. Kesimpulan serupa mungkin dapat ditarik dari hasil SR. Secara terbatas, dapat dilihat bahwa PDIR-Now memiliki deteksi kejadian hujan lebih baik dari IMERG-ER berdasarkan skor FAR yang lebih rendah dan SR yang lebih tinggi. Mengenai VHI, IMERG-ER (0.73) lebih unggul daripada PDIR-Now (0.67) yang mengindikasikan tingkat kemampuan satelit dalam mendeteksi jumlah hujan tertentu. Nilai VFAR untuk IMERG-ER dan PDIR-Now menunjukkan nilai yang sama yaitu 0.36, hal ini mengindikasikan kemampuan yang sama antara IMERG-ER dan PDIR-Now dalam mendeteksi volume curah hujan palsu. Kinerja indeks volumetric secara keseluruhan memperlihatkan bahwa IMERG-ER lebih unggul dari PDIR-Now yaitu dilihat dari nilai VCSI.

Kinerja DCHBS setelah koreksi

Penilaian sebelumnya menyimpulkan bahwa IMERG-ER menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan PDIR-Now berdasarkan pengukuran statistik kontinu, metrik kategoris, dan indeks volumetrik. Namun, koreksi tetap diperlukan dengan memanfaatkan data curah hujan dari stasiun pengamatan. Dalam penelitian ini, digunakan tiga pendekatan koreksi, yaitu rasio bias (koreksi 1), rata-rata deviasi (koreksi 2), dan nilai fungsi distribusi probabilitas

(koreksi 3). Efektivitas ketiga metode tersebut dalam mengurangi kesalahan dinilai pada skala waktu harian.

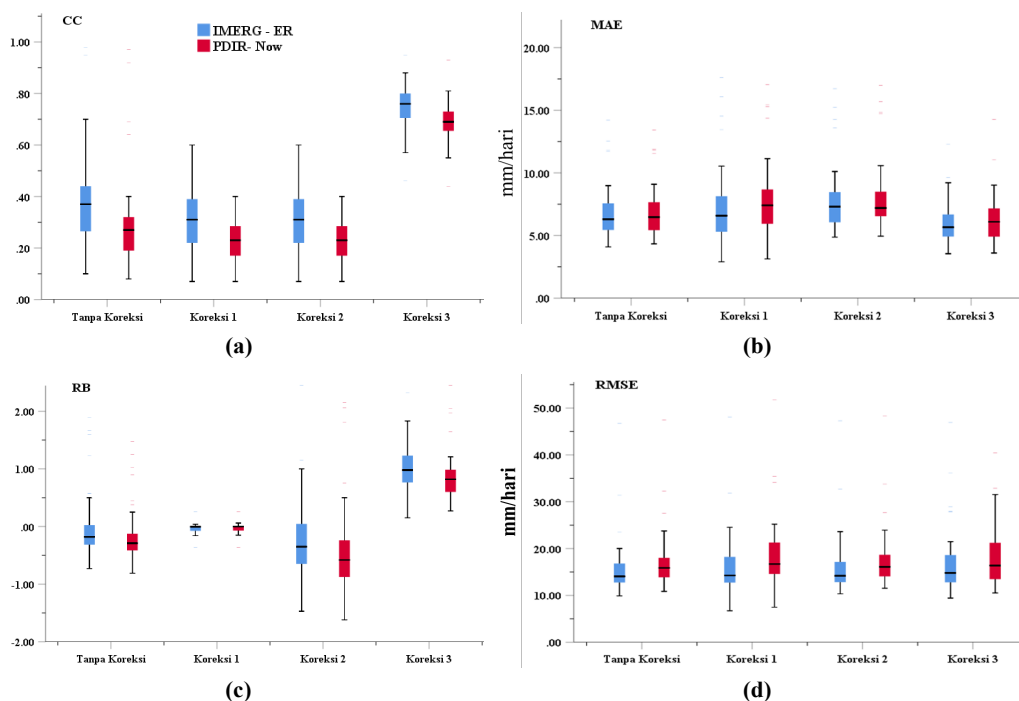
Hasil pengukuran statistik kontinu (CC, MAE, RB, dan RMSE) dari kedua DCHBS untuk setiap koreksi ditampilkan pada Gambar 2. Gambar tersebut memperlihatkan diagram kotak (box plot) untuk CC (Gambar 2a), MAE (Gambar 2b), RB (Gambar 2c), dan RMSE (Gambar 2d) yang dihasilkan oleh kedua DCHBS berdasarkan statistik dari seluruh stasiun pengamatan. Kuartil pertama dan ketiga ditunjukkan di bagian bawah dan atas kotak, sementara garis di tengah kotak menunjukkan median atau kuartil kedua. Garis di bagian atas dan bawah diagram mewakili nilai maksimum dan minimum, dan data yang berada di luar rentang garis ini dianggap sebagai *outlier*.

Gambar 2a menampilkan diagram kotak (*box plot*) yang menggambarkan nilai koefisien korelasi (CC) untuk dua metode estimasi curah hujan, yaitu IMERG-ER (warna biru) dan PDIR-Now (warna merah), dengan empat kondisi berbeda: tanpa koreksi, koreksi 1, koreksi 2, dan koreksi 3. Setelah penerapan koreksi 1, terjadi sedikit peningkatan dalam nilai CC untuk PDIR-Now, sementara IMERG-ER tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Ini menunjukkan bahwa koreksi rasio bias lebih berdampak pada PDIR-Now dibandingkan IMERG-ER. Pada koreksi 2, ada sedikit perbaikan pada nilai CC untuk kedua metode, namun peningkatannya tidak signifikan. IMERG-ER tetap mempertahankan nilai CC yang lebih tinggi dibandingkan PDIR-Now, meskipun jaraknya mulai sedikit menyempit. Koreksi 3 menunjukkan peningkatan paling signifikan, dengan kedua metode mengalami peningkatan CC yang cukup besar. Meskipun demikian, IMERG-ER tetap lebih unggul dibandingkan PDIR-Now, yang menunjukkan bahwa distribusi probabilitas lebih efektif dalam meningkatkan akurasi kedua metode ini. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi probabilitas mampu menangkap variabilitas curah hujan dengan lebih baik, sehingga menghasilkan nilai prediksi yang lebih akurat. Di sisi lain, meskipun PDIR-Now menunjukkan peningkatan setelah koreksi, secara keseluruhan IMERG-ER tetap memiliki performa yang lebih baik.

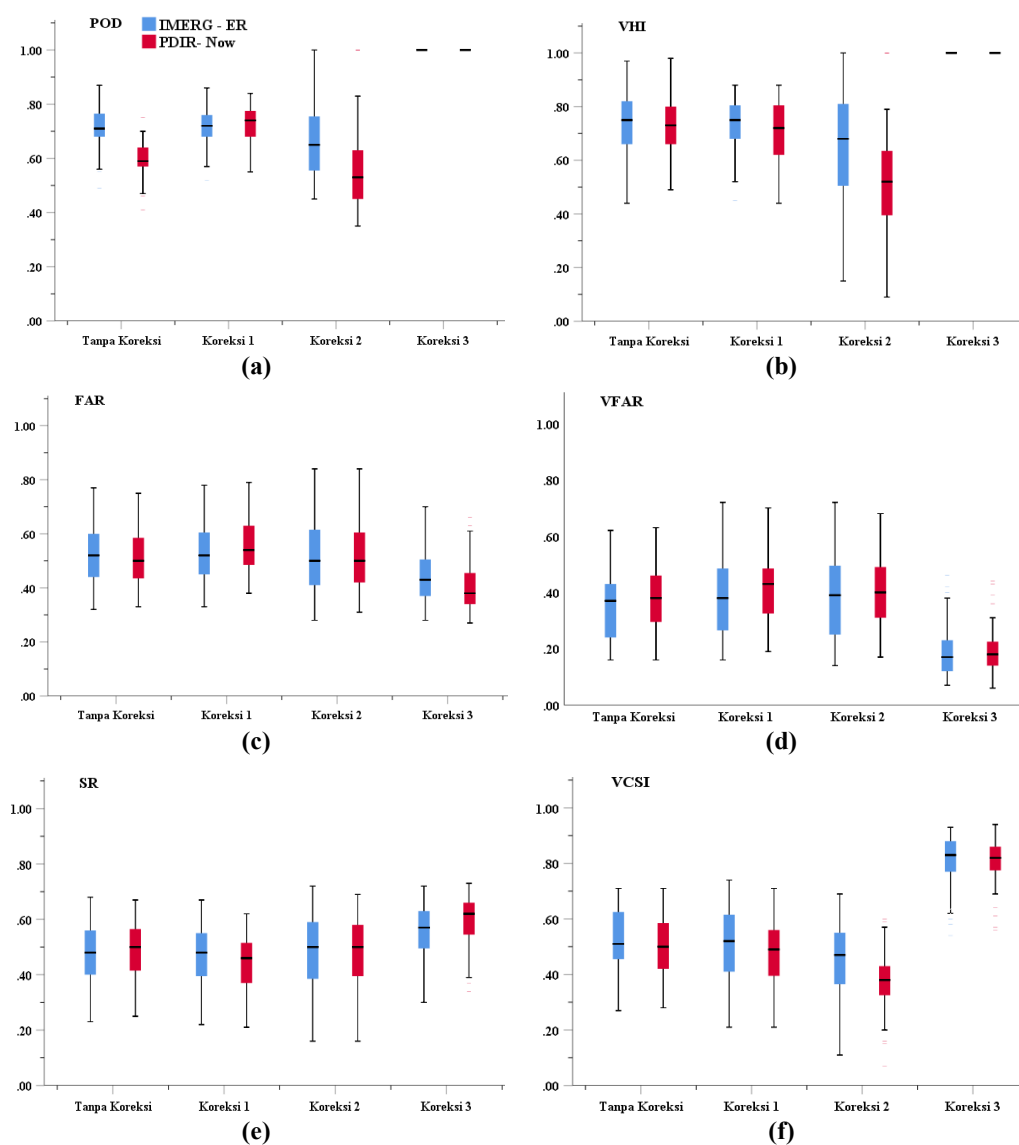
Gambar 2b menunjukkan bahwa koreksi 3 memberikan hasil yang paling baik dalam mengurangi nilai MAE pada kedua metode. Baik IMERG-ER maupun PDIR-Now mengalami penurunan MAE yang signifikan, dengan IMERG-ER menunjukkan *error* yang lebih rendah dibandingkan PDIR-Now setelah koreksi ini diterapkan. Gambar 2c memberikan gambaran bahwa koreksi 1 (rasio bias) mampu menurunkan

Tabel 3. Perbandingan kinerja IMERG-ER dan PDIR-Now

Parameter statistik	Nilai	
	IMERG-ER	PDIR-Now
CC	0.38	0.29
MAE (mm/hari)	6.89	6.99
RB	0.02	-0.14
RMSE (mm/hari)	17.67	18.86
POD	0.71	0.62
FAR	0.52	0.50
SR	0.48	0.49
VHI	0.73	0.67
VFAR	0.36	0.36
VCSI	0.52	0.50



Gambar 2. Evaluasi statistik kontinu IMERG-ER dan PDIR-Now pada berbagai tahap koreksi: (a) CC, (b) MAE, (c) RB, dan (d) RMSE.



Gambar 3. Analisis metrik kategoris dan indeks volumetrik IMERG-ER dan PDIR-Now pada berbagai tahap koreksi: (a) POD, (b) VHI, (c) FAR, (d) VFAR, (e) SR, dan (f) VCSI.

variabilitas nilai bias antara DCHBS dan stasiun, dimana nilai RB mendekati 0. Koreksi 1 tampaknya paling berhasil dalam menyempurnakan hasil, karena memiliki distribusi yang paling sempit dan nilai RB yang mendekati nol untuk kedua DCHBS. Gambar 2d menampilkan perbandingan nilai RMSE untuk IMERG-ER dan PDIR-Now pada beberapa jenis koreksi. Koreksi kedua dan ketiga tampaknya lebih efektif untuk IMERG-ER, yang menunjukkan hasil yang lebih stabil, sementara pada PERSIANN-Now variabilitas justru meningkat, terutama setelah koreksi 3. Koreksi tersebut mempertahankan kestabilan estimasi, dengan penurunan variabilitas dan distribusi yang lebih rapat (Huffman et al., 2020). Secara keseluruhan IMERG-ER menunjukkan konsistensi yang lebih baik di seluruh tahapan koreksi.

POD mengukur kemampuan sistem untuk mendeteksi kejadian hujan yang benar-benar terjadi. Semakin tinggi nilai POD, semakin baik kinerja sistem dalam mendeteksi kejadian hujan. Gambar 3a menunjukkan IMERG-ER dan PDIR-Now memiliki nilai POD yang stabil di koreksi 1 dan koreksi 3. Kedua metode koreksi menunjukkan kinerja yang relatif baik, dengan nilai di atas 0.5, bahkan di koreksi 3 mencapai nilai 1. Ini menunjukkan bahwa koreksi 1 dapat mendeteksi kejadian hujan dengan cukup andal, sedangkan koreksi 3 mampu mendeteksi kejadian hujan sempurna. Nilai VHI dari IMERG-ER dan PDIR-Now menunjukkan sedikit penurunan pada koreksi 1 dan koreksi 2, dengan PDIR-Now memiliki variabilitas yang lebih besar dibandingkan IMERG-ER (Gambar 3b). Ini mengindikasikan bahwa koreksi 1 dan 2 mungkin menyebabkan ketidakstabilan dalam estimasi volume curah hujan, terutama untuk PERSIANN-Now.

Kedua DCHBS menunjukkan nilai FAR yang cenderung stabil di seluruh tahap koreksi, dengan distribusi yang mirip (Gambar 3c). Namun, PDIR-Now cenderung memiliki sedikit keunggulan dengan nilai FAR yang lebih rendah, yang berarti metode estimasi pada PDIR-Now lebih baik dalam menghindari peringatan palsu dibandingkan IMERG-ER. Gambar 3d menunjukkan IMERG-ER mempertahankan nilai VFAR yang lebih rendah dibandingkan PDIR-Now untuk semua tahap koreksi. Nilai ini mengindikasikan bahwa IMERG-ER lebih akurat dalam prediksi volume curah hujan. Dataset PDIR-Now memiliki nilai SR yang sedikit lebih tinggi dibandingkan IMERG-ER di koreksi 2 dan 3, menunjukkan bahwa metode estimasi pada PDIR-Now lebih andal dalam memprediksi hujan yang benar-benar terjadi (Gambar 3e). IMERG-ER menunjukkan nilai VCSI yang lebih stabil dan sedikit lebih tinggi dibandingkan PDIR-Now, terutama pada koreksi 3 (Gambar 3f). Peningkatan variabilitas PDIR-Now pada koreksi ketiga mengindikasikan adanya ketidakstabilan dalam prediksi volumenya. Secara keseluruhan, IMERG-ER menunjukkan kinerja yang lebih stabil dan lebih baik dalam beberapa metrik kunci seperti VFAR dan VCSI, menunjukkan bahwa IMERG-ER lebih andal dan lebih konsisten dalam memperkirakan volume curah hujan yang benar. PDIR-Now, di sisi lain, menunjukkan peningkatan variabilitas dalam beberapa metrik setelah koreksi ketiga, terutama pada FAR dan SR, yang menunjukkan bahwa koreksi tersebut lebih efektif daripada koreksi yang lain.

DCHBS memiliki kemampuan rendah dalam mendeteksi frekuensi curah hujan dengan intensitas tinggi (Fang et al., 2019; Filho et al., 2022; C. Huang et al., 2019; R. Sun et al., 2016). Oleh karena itu, koreksi dengan memanfaatkan nilai fungsi probabilitas dapat menyelaraskan berbagai tingkat curah hujan dari DCHBS dengan hasil pengukuran alat

pengukur hujan (Ma et al., 2018; G. Tang et al., 2016; Xu et al., 2017). Studi sebelumnya juga memperkuat mengatakan bahwa kinerja DCHBS lebih baik pada skala harian setelah dilakukan koreksi untuk volume curah hujan tinggi (> 50 mm/hari) (Aryastana et al., 2024; Lu et al., 2018). Peningkatan kinerja yang konsisten disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk penyesuaian terhadap alat pengukur hujan, penggunaan data curah hujan dengan resolusi spasial-temporal yang lebih tinggi, dan koreksi model kesalahan (Marra et al., 2017; Nikolopoulos et al., 2017).

Penilaian kinerja DCHBS sebelum dan setelah koreksi, penting untuk mempertimbangkan berbagai faktor lokal yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Salah satu aspek utama yang harus dipertimbangkan adalah faktor elevasi (Dinku et al., 2008; Liu et al., 2020), mengingat setiap provinsi memiliki karakteristik topografi yang bervariasi. Sebagai contoh, Provinsi Bali menunjukkan perbedaan elevasi yang cukup mencolok antara wilayah pesisir, dataran rendah, dan pegunungan. Variasi ini dapat berpengaruh terhadap distribusi curah hujan serta tingkat akurasi estimasi yang dihasilkan oleh DCHBS (Aryastana et al., 2022; Lee et al., 2014; X. Tang et al., 2023). Wilayah dengan perbedaan ketinggian yang signifikan cenderung menunjukkan variasi kompleks dalam data yang diperoleh dari DCHBS. Sebelum dilakukan koreksi, perbedaan elevasi dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam estimasi curah hujan, terutama di daerah dengan topografi yang curam. Oleh karena itu, proses koreksi perlu mempertimbangkan faktor elevasi agar data yang dihasilkan lebih andal dan akurat (Yamamoto & Shige, 2015). Pertimbangan faktor elevasi yang spesifik pada suatu wilayah dalam pengembangan metode koreksi DCHBS dapat memberikan hasil yang lebih valid serta berkontribusi pada peningkatan model koreksi yang lebih sesuai dengan kondisi geografis di setiap provinsi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa produk curah hujan IMERG-ER memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan PDIR-Now dalam hal pengukuran statistik kontinu, metrik kategoris, dan indeks volumetrik. IMERG-ER menunjukkan keandalan yang lebih tinggi, terutama dalam menangkap variabilitas curah hujan harian, karena penggunaan citra gelombang mikro pasif dan inframerah. Meskipun IMERG-ER cenderung mengestimasi curah hujan sedikit lebih tinggi, kinerjanya tetap lebih stabil dan konsisten dibandingkan PDIR-Now di seluruh tahap koreksi. Di antara metode koreksi yang digunakan, koreksi fungsi distribusi probabilitas (Koreksi 3) menunjukkan peningkatan kinerja paling signifikan untuk kedua produk, terutama dalam meningkatkan korelasi (CC) dan mengurangi mean absolute error (MAE) serta root mean square error (RMSE). Secara keseluruhan, IMERG-ER memberikan akurasi yang lebih baik, terutama dalam mendeteksi intensitas hujan, seperti yang ditunjukkan oleh indeks volumetriknya yang lebih tinggi dibandingkan PDIR-Now. Penelitian selanjutnya perlu mengeksplorasi penerapan metode koreksi lain atau kombinasi koreksi untuk lebih meningkatkan akurasi produk curah hujan berbasis satelit. Selain itu, memperluas analisis ke wilayah lain dengan karakteristik iklim yang beragam dapat memberikan wawasan yang lebih luas tentang generalisasi metode koreksi ini. Penelitian juga disarankan untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang produk curah hujan satelit dalam kondisi cuaca ekstrem, karena hal ini dapat menawarkan perspektif yang berharga untuk pemodelan hidrologi dan manajemen risiko

bencana. Penelitian lanjutan dapat difokuskan pada evaluasi lebih mendalam terhadap ketepatan prediksi citra untuk setiap stasiun hujan dengan mempertimbangkan variasi spasial (elevasi dan penggunaan lahan). Studi ini dapat membantu mengidentifikasi pola perbedaan akurasi prediksi antara daerah dataran rendah, perbukitan, dan pegunungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih atas bantuan Balai Wilayah Sungai Bali-Penida yang telah menyediakan data curah hujan harian untuk Provinsi Bali. Kami juga berterima kasih kepada *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) yang telah menyediakan produk IMERG serta terima kasih kepada University of Arizona atas pengembangan produk PERSIANN. Penelitian ini didukung oleh Hibah Penelitian Lingkungan dan Sumber Daya Alam dari Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Warmadewa (Nomor Kontrak: 299/UNWAR/DPPM/PD-13/2024).

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama mendisain metode penelitian, interpretasi hasil, dan membuat naskah publikasi. **Penulis kedua** dan **penulis ketiga** merevisi dan mengulas naskah publikasi, sedangkan **penulis ketiga** menganalisis data dan merevisi dan mengulas naskah publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- AghaKouchak, A., Bárdossy, A., & Habib, E. (2010). Conditional simulation of remotely sensed rainfall data using a non-Gaussian v-transformed copula. *Advances in Water Resources*, 33(6), 624–634. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.02.010>
- Aghakouchak, A., & Mehran, A. (2013). Extended contingency table: Performance metrics for satellite observations and climate model simulations. *Water Resources Research*, 49(10), 7144–7149. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20498>
- Artan, G., Gadain, H., Smith, J. L., Asante, K., Bandaragoda, C. J., & Verdin, J. P. (2007). Adequacy of satellite derived rainfall data for stream flow modeling. *Natural Hazards*, 43(2), 167–185. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9121-6>
- Aryastana, P., Dewi, L., Wahyuni, P. I., Sinarta, I. N., Punay, J. P., & Wui, J. C. H. (2024). Evaluation of Double Fusion Satellite Rainfall Dataset in Establish Rainfall Thresholds for Landslide Occurrences Over Badung Regency-Bali. In *Landslide: Susceptibility, Risk Assessment and Sustainability. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 52 (pp. 571–591). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56591-5_22
- Aryastana, P., Liu, C.-Y., Jong-Do Jou, B., Cayan, E., Punay, J. P., & Chen, Y. (2022). Assessment of Satellite Precipitation Data Sets for High Variability and Rapid Evolution of Typhoon Precipitation Events in the Philippines. *Earth and Space Science*, 9(9). <https://doi.org/10.1029/2022EA002382>
- Aryastana, P., Wahyuni, P. I., Dewi, L., Punay, J. P., Haditama, I. G. N. H. R., & Jalakam, S. P. (2023). The Quantitative Comparison of Grid Re-analysis Rainfall Products, Satellite Rainfall Products, and Hourly Rainfall Gauge Observation over Bali Province. *E3S Web of Conferences*, 445, 01020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344501020>
- As-Syakur, A. R., Tanaka, T., Prasetya, R., Swardika, I. K., & Kasa, I. W. (2011). Comparison of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) products and daily-monthly gauge data over Bali. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24), 8969–8982. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.531784>
- Ayehu, G. T., Tadesse, T., Gessesse, B., & Dinku, T. (2018). Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4), 1921–1936. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1921-2018>
- Ayugi, B., Tan, G., Ullah, W., Boiyo, R., & Ongoma, V. (2019). Inter-comparison of remotely sensed precipitation datasets over Kenya during 1998–2016. *Atmospheric Research*, 225, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.032>
- Brunetti, M. T., Melillo, M., Peruccacci, S., Ciabatta, L., & Brocca, L. (2018). How far are we from the use of satellite rainfall products in landslide forecasting? *Remote Sensing of Environment*, 210, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.016>
- Caracciolo, D., Francipane, A., Viola, F., Noto, L. V., & Deidda, R. (2018). Performances of GPM satellite precipitation over the two major Mediterranean islands. *Atmospheric Research*, 213, 309–322. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.010>
- Chen, H., Yong, B., Kirstetter, P.-E., Wang, L., & Hong, Y. (2021). Global component analysis of errors in three satellite-only global precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3087–3104. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3087-2021>
- Dai, Q., Han, D., Rico-Ramirez, M., & Srivastava, P. K. (2014). Multivariate distributed ensemble generator: A new scheme for ensemble radar precipitation estimation over temperate maritime climate. *Journal of Hydrology*, 511, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.016>
- Derin, Y., Anagnostou, E., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Buytaert, W., Chang, C. H., Delrieu, G., Hong, Y., Hsu, Y. C., Lavado-Casimiro, W., Manz, B., Moges, S., Nikolopoulos, E. I., Sahlu, D., Salerno, F., Rodríguez-Sánchez, J. P., Vergara, H. J., & Yilmaz, K. K. (2016). Multiregional satellite precipitation products evaluation over complex terrain. *Journal of Hydrometeorology*, 17(6), 1817–1836. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0197.1>
- Dezfuli, A. K., Ichoku, C. M., Huffman, G. J., Mohr, K. I., Selker, J. S., van de Giesen, N., Hochreutener, R., & Annor, F. O. (2017). Validation of IMERG Precipitation in Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 18(10), 2817–2825. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0139.1>
- Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S. J., & Ropelewski, C. F. (2007). Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1503–1526. <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>
- Dinku, T., Chidzambwa, S., Ceccato, P., Connor, S. J., & Ropelewski, C. F. (2008). Validation of high-resolution satellite rainfall products over complex terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4097–4110. <https://doi.org/10.1080/01431160701772526>
- Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., & Ceccato, P. (2010). Validation and intercomparison of satellite rainfall estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5), 1004–1014. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2260.1>
- Ebert, E. E. (2007). Methods for Verifying Satellite Precipitation Estimates. In *Measuring Precipitation from Space: EURAINSAT and the Future* (pp. 345–356). Springer.
- Fang, J., Yang, W., Luan, Y., Du, J., Lin, A., & Zhao, L. (2019). Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmospheric Research*, 223(September 2018), 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.001>
- Feidas, H. (2010). Validation of satellite rainfall products over Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1–2), 193–216. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0135-8>
- Filho, G. R., Coelho, V. R., Freitas, E. S., Xuan, Y., Brocca, L., & Almeida, C. N. (2022). Regional-scale evaluation of 14 satellite-based precipitation products in characterising extreme events and delineating rainfall thresholds for flood hazards. *Atmospheric Research*, 276, 106259. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106259>

- Gado, T. A., Shalaby, B. A., Guo, Y., & Rashwan, I. M. H. (2024). Assessment of Satellite-Based Precipitation Estimates over Egypt. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(1). <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6051>
- Huang, C., Hu, J., Chen, S., Zhang, A., Liang, Z., Tong, X., Xiao, L., Min, C., & Zhang, Z. (2019). How Well Can IMERG Products Capture Typhoon Extreme Precipitation Events over Southern China? *Remote Sensing*, 11(1), 70. <https://doi.org/10.3390/rs11010070>
- Huang, W.-R., Chang, Y. H., & Liu, P. Y. (2018). Assessment of IMERG precipitation over Taiwan at multiple timescales. *Atmospheric Research*, 214(July), 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.004>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K.-L., Joyce, R. J., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Stocker, E. F., Tan, J., Wolff, D. B., & Xie, P. (2020). *Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG)* (pp. 343–353). https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19
- Huffman, G. J., Stocker, E. F., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2019). *GPM IMERG Early Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06*. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERGDE/DAY06>
- Hughes, D. A. (2006). Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks. *Journal of Hydrology*, 327(3–4), 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.041>
- Katiraei-Boroujerdy, P. S., Nasrollahi, N., Hsu, K. lin, & Sorooshian, S. (2013). Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran. *Journal of Arid Environments*, 97(March 2018), 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.05.013>
- Kummerow, C., & Giglio, L. (1994). A Passive Microwave Technique for Estimating Rainfall and Vertical Structure Information from Space. Part II: Applications to SSM/I Data. *Journal of Applied Meteorology*, 33(1), 19–34. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0019:APMTFE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0019:APMTFE>2.0.CO;2)
- Lee, K.-O., Uyeda, H., & Lee, D.-I. (2014). Microphysical structures associated with enhancement of convective cells over Mt. Halla, Jeju Island, Korea on 6 July 2007. *Atmospheric Research*, 135–136, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.08.012>
- Li, Z., Yang, D., & Hong, Y. (2013). Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 500, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.023>
- Liao, Z., Hong, Y., Wang, J., Fukuoka, H., Sassa, K., Karnawati, D., & Fathani, F. (2010). Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, 7(3), 317–324. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0219-7>
- Liu, C.-Y., Aryastana, P., Liu, G.-R., & Huang, W.-R. (2020). Assessment of satellite precipitation product estimates over Bali Island. *Atmospheric Research*, 244, 105032. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105032>
- Lu, X., Tang, G., Wei, M., Yang, L., & Zhang, T. (2018). Evaluation of multi-satellite precipitation products in Xinjiang, China. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21), 7437–7462.
- Ma, Y., Yang, Y., Han, Z., Tang, G., Maguire, L., Chu, Z., & Hong, Y. (2018). Comprehensive evaluation of Ensemble Multi-Satellite Precipitation Dataset using the Dynamic Bayesian Model Averaging scheme over the Tibetan plateau. *Journal of Hydrology*, 556, 634–644. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.050>
- Marra, F., Morin, E., Peleg, N., Mei, Y., & Anagnostou, E. N. (2017). Intensity–duration–frequency curves from remote sensing rainfall estimates: comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), 2389–2404. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2389-2017>
- Morbideilli, R., Saltalippi, C., Dari, J., & Flammini, A. (2021). A Review on Rainfall Data Resolution and Its Role in the Hydrological Practice. *Water*, 13(8), 1012. <https://doi.org/10.3390/w13081012>
- Muntohar, A. S., Mavrouli, O., Jetten, V. G., van Westen, C. J., & Hidayat, R. (2021). Development of Landslide Early Warning System Based on the Satellite-Derived Rainfall Threshold in Indonesia. In N. Casagli, V. Tofani, K. Sassa, P. T. Bobrowsky, & K. Takara (Eds.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk* (Issue January, pp. 227–235). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60311-3_26
- New, M., Todd, M., Hulme, M., & Jones, P. (2001). Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21(15), 1889–1922. <https://doi.org/10.1002/joc.680>
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., Ashouri, H., & Rose Thorstensen, A. (2018). The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5801–5816. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5801-2018>
- Nguyen, P., Shearer, E. J., Ombadi, M., Gorooh, V. A., Hsu, K., Sorooshian, S., Logan, W. S., & Ralph, M. (2020). PERSIANN Dynamic Infrared–Rain Rate Model (PDIR) for High-Resolution, Real-Time Satellite Precipitation Estimation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E286–E302. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0118.1>
- Nikolopoulos, E. I., Destro, E., Maggioni, V., Marra, F., & Borga, M. (2017). Satellite rainfall estimates for debris flow prediction: An evaluation based on rainfall accumulation-duration thresholds. *Journal of Hydrometeorology*, 18(8), 2207–2214. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0052.1>
- Nurfaijin, N. (2013). Analisis Karakteristik Hujan untuk Pendugaan Debit Aliran Rencana Sungai Anafri di Kota Jayapura. *Majalah Geografi Indonesia*, 27(1), 78–103. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22146/mgi.13451>
- Putra, M., Rosid, M. S., & Handoko, D. (2024). *A Review of Rainfall Estimation in Indonesia : Data Sources* . 542–561.
- Rahmawati, N., & Lubczynski, M. W. (2018). Validation of satellite daily rainfall estimates in the complex terrain of Bali Island, Indonesia. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1–2), 513–532. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2290-7>
- Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., Kirschbaum, D., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., & Guzzetti, F. (2017). Statistical approaches for the definition of landslide rainfall thresholds and their uncertainty using rain gauge and satellite data. *Geomorphology*, 285, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.001>
- Salio, P., Hobouchian, M. P., García Skabar, Y., & Vila, D. (2015). Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*, 163, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.017>
- Shi, J., Yuan, F., Shi, C., Zhao, C., Zhang, L., Ren, L., Zhu, Y., Jiang, S., & Liu, Y. (2020). Statistical Evaluation of the Latest GPM-Era IMERG and GSMaP Satellite Precipitation Products in the Yellow River Source Region. *Water*, 12(4), 1006. <https://doi.org/10.3390/w12041006>
- Sohn, B. J., Ryu, G. H., Song, H. J., & Ou, M. L. (2013). Characteristic features of warm-type rain producing heavy rainfall over the Korean peninsula inferred from TRMM measurements. *Monthly Weather Review*, 141(11), 3873–3888. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00075.1>
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K. (2018). A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- Sun, R., Yuan, H., Liu, X., & Jiang, X. (2016). Evaluation of the latest satellite–gauge precipitation products and their hydrologic

- applications over the Huaihe River basin. *Journal of Hydrology*, 536, 302–319. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.054>
- Sunilkumar, K., Narayana Rao, T., Saikranthi, K., & Purnachandra Rao, M. (2015). Comprehensive evaluation of multisatellite precipitation estimates over India using gridded rainfall data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(17), 8987–9005. <https://doi.org/10.1002/2015JD023437>
- Tambie, J., Campus, M., & Ramlal, B. (2024). *Comparison of GPM IMERG and PERSIANN-CDR satellite-derived precipitation estimate products over Trinidad Comparison of GPM IMERG and PERSIANN-CDR satellite-derived precipitation estimate products over Trinidad*. February.
- Tan, M. L., & Duan, Z. (2017). Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore. *Remote Sensing*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/rs9070720>
- Tan, M. L., Ibrahim, A. L., Duan, Z., Cracknell, A. P., & Chaplot, V. (2015). Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia. *Remote Sensing*, 7(2), 1504–1528. <https://doi.org/10.3390/rs70201504>
- Tan, M. L., & Santo, H. (2018). Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 202(November 2017), 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.006>
- Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., & Hong, Y. (2016). Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 533, 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.008>
- Tang, X., Li, H., Qin, G., Huang, Y., & Qi, Y. (2023). Evaluation of Satellite-Based Precipitation Products over Complex Topography in Mountainous Southwestern China. *Remote Sensing*, 15(2), 473. <https://doi.org/10.3390/rs15020473>
- Tao, W.-K., Wu, D., Lang, S., Chern, J.-D., Peters-Lidard, C., Fridlind, A., & Matsui, T. (2016). High-resolution NU-WRF simulations of a deep convective-precipitation system during MC3E: Further improvements and comparisons between Goddard microphysics schemes and observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3), 1278–1305. <https://doi.org/10.1002/2015JD023986>
- Torre, E. M. de la, Trinidad, J. G., Ramírez, E. G., Capetillo, C. F. B., Ferreira, H. E. J., Almaraz, H. B., & Recendez, M. I. R. (2024). Estimation of Rainfall via IMERG-FR and Its Relationship with the Records of a Rain Gauge Network with Spatio-Temporal Variation, Case of Study: Mexican Semi-Arid Region. *Remote Sensing*, 16(2), 273. <https://doi.org/10.3390/rs16020273>
- Wang, H., Yuan, Y., Zeng, S., Li, W., & Tang, X. (2021). Evaluation of satellite-based precipitation products from GPM IMERG and GSMaP over the three-river headwaters region, China. *Hydrology Research*, 52(6), 1328–1343. <https://doi.org/10.2166/NH.2021.029>
- Wong, J. S., Razavi, S., Bonsal, B. R., Wheeler, H. S., & Asong, Z. E. (2017). Inter-comparison of daily precipitation products for large-scale hydro-climatic applications over Canada. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4), 2163–2185. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2163-2017>
- Xu, R., Tian, F., Yang, L., Hu, H., Lu, H., & Hou, A. (2017). Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan plateau based on a high-density rain gauge network. *Journal of Geophysical Research*, 122(2), 910–924. <https://doi.org/10.1002/2016JD025418>
- Yamamoto, M. K., & Shige, S. (2015). Implementation of an orographic/nonorographic rainfall classification scheme in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *Atmospheric Research*, 163, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.024>
- Yuda, I. W. A., Prasetya, R., As-Syakur, A. R., Osawa, T., & Nagai, M. (2020). An assessment of IMERG rainfall products over Bali at multiple time scale. *E3S Web of Conferences*, 153, 1–12. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015302001>
- Zhu, Y., Lin, Z., Wang, J., Zhao, Y., & He, F. (2016). Impacts of Climate Changes on Water Resources in Yellow River Basin, China. *Procedia Engineering*, 154, 687–695. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.570>