

KAJIAN JUMLAH DAN SEBARAN TITIK KONTROL TANAH MENGUNAKAN ANALISIS DIAGRAM VORONOI UNTUK GEOREKTIFIKASI CITRA ORTHOMOSAIK SPOT 6/7 DALAM RANGKA PEMUTAKHIRAN PETA DASAR 1:25.000

Studi Kasus di DKI Jakarta dan Daerah Istimewa Yogyakarta

(Study on the Number and Distribution of Ground Control Points using Voronoi Diagram Analyses to Georectify the SPOT 6/7 Orthomosaic Image for 1:25.000 Base Map Updating, Case Study DKI Jakarta and Special Region of Yogyakarta)

Elyta Widyaningrum, Ratna Mayasari, Andita Putri Damayanti, Diaz Cahya Kusuma Yuwana, Eli Juniati

Badan Informasi Geospasial
Jalan Raya Jakarta-Bogor KM. 46 Cibinong
E-mail: elyta.widyaningrum@big.go.id

Diterima: 4 April 2022; Direvisi: 27 April 2022; Disetujui untuk dipublikasikan: 17 Mei 2022

ABSTRAK

Peta dasar merupakan salah satu komponen penting untuk perencanaan, pelaksanaan dan pengawasan pembangunan. Ketersediaan citra orthomosaik sistematis SPOT 6/7 per tahun yang mencakup wilayah daratan Indonesia yang disediakan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) dapat dimanfaatkan sebagai data geospasial dasar masukan untuk pemutakhiran peta dasar. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas jumlah dan sebaran titik kontrol tanah (TKT) berdasarkan analisis diagram Voronoi untuk georektifikasi citra orthomosaik SPOT 6/7 dalam rangka memenuhi spesifikasi pemutakhiran peta dasar skala menengah. Jaringan jalan yang terdapat pada peta dasar 1:25.000 tersedia digunakan sebagai referensi dalam georektifikasi. Area penelitian mencakup dua provinsi yang memiliki jaringan jalan cukup merata, yaitu DKI Jakarta dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Sebaran TKT berdasarkan analisis diagram Voronoi akan diperbandingkan dengan sebaran TKT secara manual, masing-masing sebaran menggunakan 7, 20 dan 30 TKT. Kajian komprehensif terhadap enam skenario TKT tersebut dilakukan dengan menggunakan beberapa metode analisis spasial yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), autokorelasi spasial Indeks Moran dan geostatistik *Kriging*. Berdasarkan uji akurasi, penambahan jumlah TKT tidak meningkatkan ketelitian horizontal secara signifikan sebagaimana distribusi TKT. Secara umum, penggunaan sejumlah 30 TKT menghasilkan akurasi tertinggi pada kedua area penelitian. Selain itu, terlepas dari jumlah TKT, sebaran TKT berdasarkan analisis diagram Voronoi menghasilkan ketelitian horizontal yang lebih tinggi dibandingkan hasil georektifikasi dengan sebaran manual.

Kata kunci: citra orthomosaik, diagram Voronoi, georektifikasi, pemutakhiran peta dasar, titik kontrol tanah

ABSTRACT

Basic geospatial information or base map is an important component for development planning, process, and monitoring. The availability of yearly SPOT 6/7 orthomosaic systematic image by the National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) covers the Indonesian inland territory, can be used as a basic geospatial data input for updating the base map. This study aims to examine the effectiveness of the number and distribution of Ground Control Points (GCPs) based on Voronoi diagram analysis for SPOT 6/7 orthomosaic georectification which meets the medium scale base map specifications. The research area includes two provinces that have evenly distributed road networks, namely DKI Jakarta and the Special Region of Yogyakarta. Road networks from the existing 1:25.000 base map are used as reference for georectification. GCPs are obtained from the intersections of existing road networks on the base map. The GCPs distribution based on Voronoi diagram analysis will be compared to the manually distributed GCPs by using 7, 20 and 30 GCPs. A comprehensive study of six GCPs scenarios is carried out using several methods of spatial analysis based on Root Mean Square Error (RMSE), Moran Index spatial autocorrelation, and Kriging geostatistics. The results show that adding more GCPs are not significantly increase the horizontal accuracy as the GCPs distribution does. In general, the use of 30 GCPs results in the highest horizontal accuracy for both study areas. Moreover, regardless the number of GCPs, distributions based on Voronoi diagram analysis provide higher geometric accuracy results than any manual GCPs distribution.

Keywords: base map updating, georectification, ground control point, orthomosaic image, Voronoi diagram

PENDAHULUAN

Pemutakhiran peta dasar merupakan aspek penting untuk menjamin proses pengambilan keputusan yang tepat, khususnya untuk perencanaan dan pengawasan pembangunan. PP 21 Tahun 2021 (RI, 2021a) menyatakan kebutuhan peta dasar yang mutakhir pada skala menengah (yaitu skala 1:25.000 dan 1:50.000) untuk penyusunan rencana tata ruang wilayah kota/kabupaten dan kawasan strategis nasional. PP 23 Tahun 2021 (RI, 2021b) juga menyebutkan kebutuhan kemutakhiran unsur penutup lahan pada peta dasar setiap tahun demi mendukung ketersediaan Informasi Geospasial Tematik Potensi. Oleh sebab itu, penyediaan peta dasar skala menengah termutakhir di seluruh wilayah Indonesia menjadi suatu hal yang sangat penting untuk mendukung target nasional.

Citra satelit penginderaan jauh merupakan salah satu data yang dapat diolah menjadi data geospasial dasar. Citra satelit mampu menyediakan data termutakhir dengan cakupan wilayah luas dalam waktu yang relatif cepat (Danoedoro, 2012).

Ketersediaan data citra orthomosaik sistematis SPOT-6 dan SPOT-7 hasil pengolahan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), yang dapat diakses dan diunduh secara gratis melalui laman Spacemap (LAPAN, ND). Spacemap merupakan salah satu alternatif penyediaan data geospasial dasar berbasis citra satelit dan dapat digunakan untuk pemutakhiran peta dasar di seluruh wilayah Indonesia. Citra orthomosaik SPOT 6/7 tersebut merupakan hasil ortho-sistematis dan *masking* awan yang disajikan per wilayah provinsi dan merupakan gabungan perekaman dalam kurun waktu tertentu (yaitu antara 6-12 bulan pada tahun yang sama). Proses SPOT Level 2A dilakukan untuk memberikan koreksi geometrik terhadap citra menggunakan parameter orbit satelit untuk menghilangkan kesalahan yang disebabkan oleh posisi, kecepatan, orientasi, waktu dan bidang pandang satelit, serta menggunakan DEM untuk menghilangkan kesalahan karena relief permukaan bumi (Airbus, 2013; Widyaningrum et al., 2016; Gisda et al., 2019).

Bagaimanapun juga, citra satelit tersebut tidak dapat langsung digunakan sebagai data dasar untuk pemutakhiran peta dasar tanpa adanya informasi akurasi geometrik dan keselarasan dengan peta dasar eksisting (Toutin, 2004). Data dan informasi geospasial yang dilengkapi dengan metadata, salah satunya tentang informasi ketelitian atau akurasi geometrik, merupakan bentuk penjaminan kualitas atas data dan informasi geospasial dasar yang disebarluaskan (BIG, 2020). Dengan demikian, harus dilakukan uji kualitas geometrik dengan menggunakan titik uji independen (*Independent Check Point/ICP*) terhadap data geospasial dasar yang akan digunakan sebagai masukan pembuatan peta dasar. Sementara itu, dalam upaya untuk

membentuk keselarasan dengan peta dasar eksisting, dibutuhkan satu prosedur penting untuk dapat menggunakan citra satelit tersedia, yaitu dengan melakukan koreksi geometrik atau georektifikasi dengan menggunakan peta dasar eksisting sebagai referensi.

Georektifikasi adalah proses pemindahan lokasi piksel pada citra untuk menghilangkan atau mengurangi distorsi geometrik yang diakibatkan oleh kondisi topografi, pengambilan sudut saat perekaman, dan kesalahan sensor (Lippitt, 2020). Georektifikasi dilakukan untuk meningkatkan akurasi serta menyelaraskan data geospasial secara geometri dengan menggunakan titik kontrol tanah (TKT) atau *Ground Control Point (GCP)* (Hughes et al., 2006; Baboo & Devi, 2011). Dalam hal ini, TKT merupakan data primer yang digunakan untuk mengoreksi dalam rangka menghasilkan citra yang akurat sebagai input pemetaan (Kumar et al., 2013). Koreksi geometrik dapat dilakukan tanpa menggunakan TKT, dengan hanya menggunakan DEM, namun penggunaan TKT dapat meningkatkan akurasi georektifikasi dari citra satelit (Mutluoğlu et al., 2015).

Beberapa penelitian sebelumnya yang mengindikasikan pengaruh jumlah, presisi dan konfigurasi sebaran TKT terhadap citra satelit terkoreksi (Orti, 1981; Wang, et al., 2012; Ying et al., 2007). Orti, (1981) adalah salah satu peneliti awal yang secara eksplisit melakukan penyelidikan kuantitatif pada hubungan antara distribusi TKT dan kesalahan koreksi geometrik pada citra Landsat. Dalam eksperimennya, distribusi probabilitas kesalahan lokasi pada titik kontrol identik dan independen dan distribusi spasial dari TKT relatif seimbang.

Disimpulkan juga bahwa akurasi posisi pada keempat sudut area penelitian dan beberapa daerah di tepi hanya bergantung sedikit pada jumlah TKT. Ying et al. (2007) mengusulkan penggunaan diagram Voronoi untuk memilih TKT dan membangun hubungan antara distribusi TKT dengan jumlah titik. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa menggunakan diagram Voronoi untuk mengontrol distribusi TKT adalah metode yang efektif untuk meningkatkan presisi koreksi geometrik. Wang et al. (2012) mengusulkan metode seleksi TKT baru dengan menggunakan Kriging universal dan melakukan perbandingan dengan metode distribusi lain yaitu distribusi random dan distribusi berdasarkan Voronoi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi menggunakan Kriging universal menghasilkan koreksi paling akurat.

El-Manadili & Novak, (1996) menggunakan metode *Direct Linear Transform (DLT)* untuk menganalisis kesalahan koordinat tanah pada citra SPOT hasil georektifikasi yang meningkat karena pengaruh perbedaan *terrain*. Penambahan TKT dari jumlah minimum (enam titik kontrol) tidak meningkatkan akurasi. Distribusi dan kualitas titik kontrol merupakan kriteria yang lebih mempengaruhi

akurasi posisi. Smith & Atkinson (2001) melakukan rektifikasi menggunakan 26 TKT yang diperoleh dari hasil digitasi peta topografi, pengukuran GNSS *handheld*, *post processing* dan *real-time*. Dalam kajiannya disimpulkan bahwa kriteria penting dalam memilih metode pengumpulan TKT untuk georektifikasi adalah kesesuaian resolusi citra dengan akurasi sumber TKT.

Beberapa penelitian sebelumnya menyampaikan mengenai pentingnya menentukan jumlah TKT yang tepat untuk meningkatkan akurasi citra yang dihasilkan. Sejauh ini tidak ada ketentuan umum mengenai jumlah TKT yang dibutuhkan untuk georektifikasi yang baik (Aber et al., 2020). Rudianto, (2011) melakukan analisis pengaruh sebaran TKT pada citra Ikonos dan Quickbird dengan menggunakan variasi jumlah TKT dan menyimpulkan bahwa jumlah TKT sangat berpengaruh terhadap RMSE citra satelit yang telah dikoreksi geometrik, disamping pengaruh akibat metode orthorektifikasi yang dipilih. Namun penggunaan TKT setelah lebih dari 13 titik tidak lagi memperbaiki RMSE secara signifikan.

Dalam penelitiannya juga disampaikan bahwa pola sebaran TKT yang optimal menggunakan 13 titik pada Ikonos dan 9 titik pada Quickbird. Hal serupa juga ditemukan oleh Mutluoğlu et al. (2015) yang mendapati bahwa 11 TKT adalah yang paling optimal untuk citra satelit resolusi sangat tinggi dengan mempertimbangkan waktu, biaya dan target akurasi yang menjadi faktor penting dalam produksi peta.

Menindaklanjuti dari penelitian-penelitian sebelumnya, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengeksplorasi pengaruh jumlah dan distribusi spasial/sebaran TKT terhadap akurasi geometrik hasil georektifikasi citra satelit yang sebelumnya sudah dilakukan orthorektifikasi dan mosaik (orthomosaik), utamanya untuk citra SPOT 6/7 dari LAPAN yang banyak digunakan sebagai sumber data dalam pemutakhiran peta dasar pada skala menengah. Kontribusi dari penelitian ini adalah perbandingan dan perhitungan signifikansi dua faktor utama georektifikasi, yaitu sebaran dan jumlah TKT, terhadap peningkatan ketelitian citra SPOT 6/7 secara lebih komprehensif.

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi terhadap efektifitas penyediaan TKT dalam menghasilkan sumber data pemetaan yang akurat sebagai sumber data pemutakhiran peta dasar skala menengah. Terdapat dua skenario sebaran TKT yang diperbandingkan, yaitu penempatan secara manual dan penempatan berdasarkan Thiessen/diagram Voronoi. Hal ini penting dilakukan karena sudah banyak pemangku kepentingan, baik dari pihak pemerintah maupun non-pemerintah, yang telah menggunakan citra orthomosaik SPOT 6/7 untuk berbagai kebutuhan pemetaan dan analisis geospasial.

Konsep Dasar

Georektifikasi

Berdasarkan studi literatur (Müller et al., 2002; Cavegn et al., 2015; Soleh et al., 2015; Barbioux, 2018), georektifikasi atau koreksi geometrik data geospasial dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan, antara lain dengan pelengkungan citra (*image warping*), georeferensi secara langsung (*direct georeferencing*) dan perataan blok (*block adjustment*). *Image warping* bekerja dengan menghubungkan lokasi relatif piksel pada citra dan direferensikan ke peta atau data geospasial lainnya yang sudah memiliki sistem referensi koordinat (Glasbey & Mardia, 1998). Adapun syarat utama untuk *image warping* adalah terdapatnya obyek unik yang sama dan dapat diidentifikasi baik di data referensi maupun data yang akan ditransformasi, yaitu TKT. Keakuratan hasil georeferensi menggunakan teknik *warping* pada dasarnya dibatasi oleh akurasi geometri dari data referensi yang digunakan (Lippitt, 2020). Dengan demikian, untuk dapat menggunakan teknik *warping* dengan benar, harus dipilih data referensi yang sesuai dengan tujuan pengolahan citra serta akurasi skala yang diharapkan.

Terdapat beberapa model untuk melakukan georektifikasi dengan pendekatan *image warping*, antara lain polinomial, *rubber-sheeting* dan fungsi *spline* (Thierry, 2004). *Warping* menggunakan model polinomial merupakan pendekatan georektifikasi empiris yang paling populer karena efisiensi komputasi dan ketahanannya terhadap *outlier* (Yang, 1997; Hughes et al., 2006). Polinomial orde pertama (*linear*), kedua dan ketiga memungkinkan untuk meningkatkan fleksibilitas model. Semakin tinggi orde polinomial, semakin banyak TKT yang diperlukan untuk mengkalibrasi model. Secara matematis, polinomial orde pertama membutuhkan minimal 3 titik, orde kedua membutuhkan 6 titik dan orde ketiga membutuhkan minimal 9 titik TKT. Dalam praktiknya, jumlah titik minimum yang direkomendasikan setidaknya dua kali jumlah tersebut karena hanya TKT di luar jumlah minimum yang memungkinkan evaluasi kecocokan model, yang biasanya diukur dengan *Root Mean Square Error*/RMSE antara lokasi titik TKT input terhadap lokasi titik yang diperkirakan oleh model (Lippitt, 2020).

Untuk melakukan georektifikasi, penelitian ini menggunakan pendekatan *warping* dengan model yang paling banyak digunakan, yaitu polinomial orde kedua (*quadratic polynomial*). Jika koordinat pada data referensi adalah (x, y) dan koordinat pada citra belum terkoreksi adalah (u, v) , maka fungsi matematika untuk mendapatkan (u, v) dapat dituliskan pada **Persamaan 1** dan **Persamaan 2** (Wang et al., 2012).

$$u = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j + \varepsilon_u \dots\dots\dots (1)$$

$$v = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} x^i y^j + \varepsilon_v \dots\dots\dots (2)$$

dimana, a_{ij} dan b_{ij} adalah koefisien regresi dan ε_u dan ε_v adalah residu atau distorsi pada citra. Polinomial orde kedua memiliki 12 parameter yang memungkinkan untuk melakukan koreksi terhadap translasi, penskalaan, kecembungan pada kedua sumbu koordinat serta rotasi, transformasi miring dan koreksi torsi (Pohl & Van Genderen, 2016). Dengan demikian, persamaan matematikanya dapat dituliskan pada **Persamaan 3** dan **Persamaan 4**.

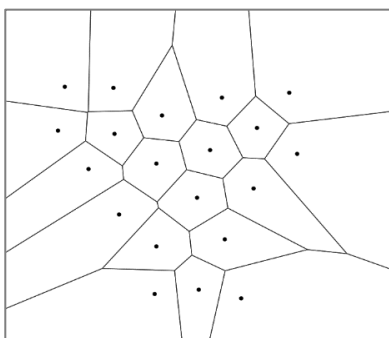
$$u = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + \varepsilon_u \dots\dots\dots(3)$$

$$y = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{11}xy + b_{20}x^2 + b_{02}y^2 + \varepsilon_y \dots\dots\dots(4)$$

Karena satu TKT hanya menghasilkan dua observasi (x dan y), maka untuk polinomial orde kedua yang membutuhkan 12 koefisien akan membutuhkan setidaknya 6 TKT.

Diagram Voronoi/Poligon Thiessen

Diagram Voronoi atau dikenal juga sebagai poligon Thiessen atau *tesselasi* Dirichlet merupakan algoritma untuk menghasilkan area segmen yang dibentuk berdasarkan satu set titik berbasis jarak terdekat pada suatu bidang datar (Brassel & Reif, 1979). Pada intinya, diagram Voronoi membagi suatu area menjadi beberapa area lebih kecil, yang disebut sebagai sel (*cell*), berdasarkan prinsip ketetanggaan terdekat (lihat **Gambar 1**). Dengan demikian, masing-masing sel berisi satu titik lokasi yang disebut sebagai *site*. Setiap titik dalam sel memiliki jarak Euclidean lebih dekat ke *site* yang berada di dalam sel dibanding dengan *site* lainnya (De Berg et al., 2008; Tiede & Strobl, 2006).



Gambar 1. Diagram Voronoi membagi bidang datar menjadi 20 sel berdasarkan *site*-nya.

Diberikan suatu himpunan S dengan yang terdiri atas n titik pada bidang datar, maka Voronoi akan mengasosiasikan tiap *site* s suatu sel dengan semua titik p di dalam sel tersebut yang lebih dekat ke s daripada *site* lainnya s' pada himpunan S . Dengan demikian, sel Voronoi untuk *site* s dapat didefinisikan dengan persamaan 5 berikut (De Berg et al., 2008):

$$Vor(s) = \{p: \text{jarak}(s,p) \leq \text{jarak}(s',p), \forall s' \in S\} \dots(5)$$

dimana $Vor(s)$ adalah sel Voronoi untuk *site* s .

Analisis Akurasi dan Korelasi Spasial

RMSE

Ketelitian posisi horizontal merupakan salah satu bentuk penilaian akurasi geometrik dalam 2 dimensi yang dihitung berdasarkan *RMSE (Root Mean Square Error)* dari pengamatan titik uji independen/ICP yang tersebar secara merata pada seluruh cakupan. Akar kuadrat dari residu jarak antara titik pada citra referensi dengan titik pada citra yang dikoreksi digunakan untuk menghitung *RMSE*. Matriks kesalahan tersebut merupakan matriks yang paling sering digunakan (Maune et al., 2007; Brovelli et al., 2008; Widyaningrum et al., 2018). Setelah georektifikasi, koordinat (u, v) pada citra keluaran (*output image*) diperbandingkan dengan koordinat referensi (x, y) dan dihitung residu atau beda jarak dengan rumus sebagaimana **Persamaan 6**.

$$RMSE_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{ui}^2 + \varepsilon_{vi}^2) \dots\dots\dots(6)$$

dimana n adalah jumlah titik uji atau ICP, ε_{ui} dan ε_{vi} merupakan residu jarak pada komponen koordinat citra u dan v terhadap koordinat referensi x dan y .

Pada umumnya, ketelitian posisi horizontal untuk pemetaan dapat menggunakan tingkat kepercayaan 90% *Circular Error* (US Bureau of the Budget, 1947; BIG, 2018) maupun tingkat kepercayaan 95% (FGDC, 1998). Kedua ketelitian horizontal dapat diekspresikan dengan rumus pada **Persamaan 7** dan **Persamaan 8**.

$$90\% \text{ Akurasi} = 1,5175 \times RMSE_r \dots\dots\dots (7)$$

$$95\% \text{ Akurasi} = 1,7308 \times RMSE_r \dots\dots\dots (8)$$

Index Moran I

Indeks Moran digunakan untuk mengukur autokorelasi spasial yang menggunakan lokasi dan nilai atribut secara bersamaan. Autokorelasi spasial merupakan teknik analisis spasial untuk mengukur kemiripan nilai atribut suatu objek di dalam suatu ruang jarak, waktu dan area (Lembo, 2006). Dengan demikian, apabila terdapat pola sistematis dalam penyebaran suatu nilai atribut/variabel, maka terdapat autokorelasi spasial. Adanya autokorelasi spasial mengindikasikan bahwa nilai atribut pada area tertentu terkait oleh nilai atribut yang sama pada area lain yang berdekatan/bertetangga. Ketetanggaan tersebut dapat mencerminkan derajat ketergantungan spasial area yang lebih tinggi dibandingkan dengan area lain yang letaknya jauh.

Autokorelasi spasial dapat diukur melalui dua indeks yaitu indeks global dan lokal. Indeks Moran adalah indeks global tertua dan paling sering digunakan untuk membandingkan nilai atribut suatu

area dengan area lainnya. Indeks Moran I memiliki rentang nilai $-1 < I < 1$. Nilai $-1 \leq I < 0$ berarti autokorelasi spasial negatif, sedangkan $0 < I \leq 1$ menunjukkan autokorelasi positif. Nilai Indeks Moran $I = 0$ berarti pola acak atau tidak berkelompok (*disperse*). Indeks Moran I seperti disajikan pada **Persamaan 9**.

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (9)$$

dimana, I adalah Indeks Moran, n adalah banyak lokasi yang diukur, W_{ij} adalah matriks pembobotan antara lokasi i dan j , x_i adalah nilai pada lokasi pengamatan ke- i , x_j adalah nilai pada lokasi pengamatan ke- j , dan \bar{x} adalah rata-rata seluruh objek.

Analisis Geostatistik (Kriging)

Analisis geostatistik diterapkan untuk mengevaluasi heterogenitas atau autokorelasi spasial dari variabel (kesalahan sepanjang sumbu Kartesian) melalui analisis struktural (variogram) dan menghasilkan peta prediksi spasial Kriging. Variogram merupakan grafik variansi terhadap jarak (*lag*). Secara umum terdapat dua macam variogram, yaitu variogram isotropik (hanya bergantung pada jarak d) dan anisotropik (bergantung pada jarak d dan arah). Beberapa parameter yang digunakan untuk mendeskripsikan variogram adalah Nugget (C_0) yaitu pendekatan nilai variogram pada jarak 0, *Sill* (C) yaitu nilai variansi data atau nilai variogram pada saat terjadi peningkatan yang signifikan, serta Range (α) yaitu jarak d masih memiliki korelasi antar data. Hubungan antar masing-masing parameter diilustrasikan sebagaimana **Gambar 2**. Variogram didefinisikan dengan **Persamaan 10**.

$$\gamma(h) = 0,5E[(\Delta z(x + d) - \Delta z(x))^2] \dots\dots\dots (10)$$

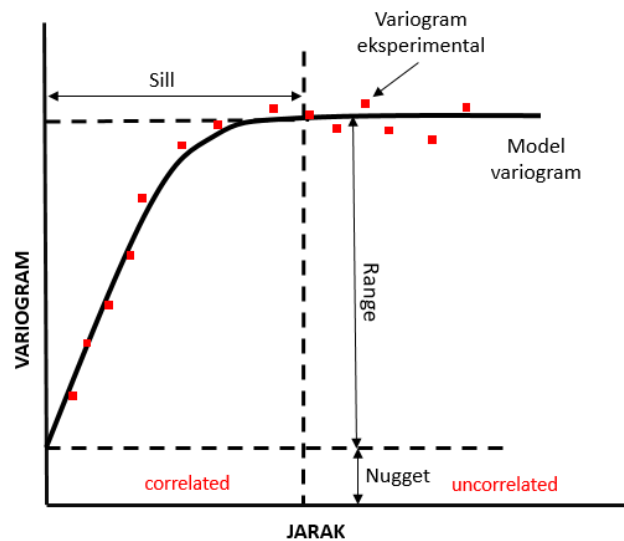
dimana, $\gamma(h)$ adalah variogram, Δz adalah beda nilai pengamatan, d adalah jarak, serta x adalah lokasi titik sampel.

Metode interpolasi *Kriging* mengasumsikan bahwa variasi spasial yang diamati dapat dimodelkan secara acak berdasarkan autokorelasi spasial. Teknik Kriging dapat digunakan untuk menggambarkan dan memodelkan pola spasial, memprediksi nilai pada lokasi yang tidak terukur, sekaligus menilai ketidakpastian nilai prediksinya. Salah satu metode interpolasi yang populer adalah *Ordinary Kriging*, yang menggunakan model semivariogram yang merepresentasikan perbedaan spasial dan nilai di antara semua pasangan sampel data. Semivariogram menunjukkan bobot (*weight*) yang digunakan dalam

interpolasi *Kriging*. Semivariogram digunakan untuk menentukan jarak dimana nilai-nilai data pengamatan menjadi saling tidak tergantung dan meminimalkan kesalahan nilai prediksi (Datu-Dacula et al., 2018). Semivariogram dihitung berdasarkan sampel dengan jarak d , beda nilai Z serta jumlah sampel data n , lihat **Persamaan 11**. Jenis Kriging yang bisa dilakukan adalah dengan cara *linear*, *spherical*, *circular*, *exponential*, dan *gaussian* (Oliver & Webster, 1990).

$$Z = \sum_{i=1}^n \omega_i z_i \dots\dots\dots (11)$$

dimana, Z adalah nilai prediksi, z_i adalah nilai terukur pada lokasi pengamatan ke- i , dan ω_i adalah bobot pada lokasi ke- i .



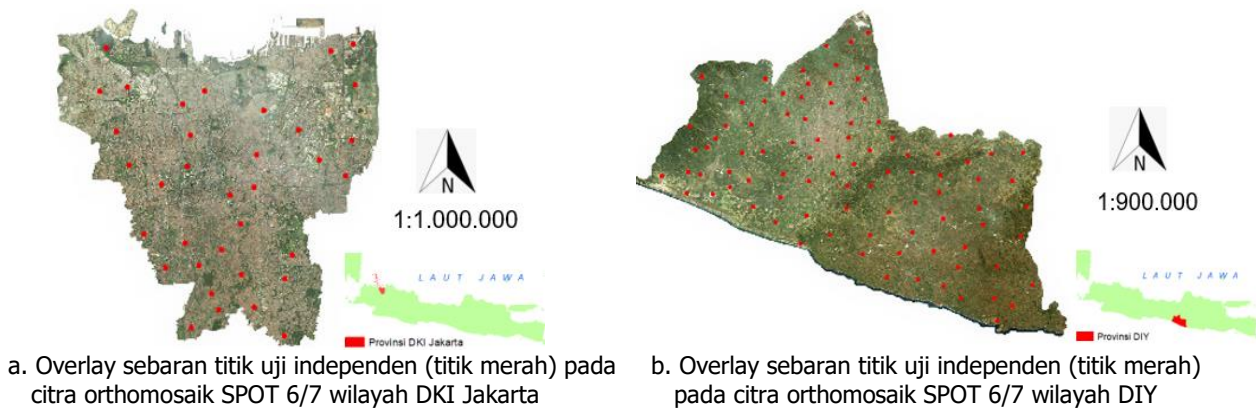
Sumber: Barca et al., (2017)

Gambar 2. Grafik variogram model *Sill* (C) merupakan jumlah dari efek *Nugget* dan *Sill* sebagian jumlah dari efek *Nugget* dan *Sill* sebagian (tingkat variabilitas maksimum proses), *Range* (α) dapat ditafsirkan sebagai jarak di mana korelasi spasial menjadi dapat diabaikan.

METODE

Data dan Area Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua area penelitian yaitu Provinsi Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta dan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) sebagaimana **Gambar 3**. DKI Jakarta digunakan untuk mewakili karakter metropolitan dengan topografi yang relatif datar, sedangkan DIY mewakili wilayah dengan topografi yang lebih bervariasi. Kedua area tersebut dipilih berdasarkan ketersediaan jaringan jalan yang cukup merata pada RBI skala 1:25.000 sehingga memungkinkan untuk dilakukan analisis pengaruh distribusi dan jumlah TKT terhadap akurasi hasil georektifikasi.



Gambar 3. Cakupan area penelitian dan sebaran titik uji independen (ICP).

Berdasarkan karakteristik wilayah, kedua area penelitian memiliki perbedaan yang cukup signifikan. DKI Jakarta memiliki luas 664,01 km² (BPS, 2020) yang didominasi oleh permukiman padat dan gedung tinggi dengan topografi yang relatif datar. Sedangkan DIY memiliki luas 3.133,15 km² (Bappeda Prov. DIY, 2022) yang memiliki penutup lahan dan topografi yang lebih bervariasi.

Adapun data yang digunakan untuk penelitian ini antara lain: citra satelit mosaik SPOT 6/7 tahun 2019 dalam format *Enhanced Compression Wavelet (.ecw)* yang telah dilakukan *pansharpening (Red-Green-Blue-Intensity)* dengan resolusi spasial 1,5 m; data batas administrasi provinsi tahun 2021 dalam format *shapefile (.shp)*; dan data jaringan jalan dari peta dasar Rupa Bumi Indonesia skala 1:25.000 versi penetapan Kebijakan Satu Peta (KSP) Tahun 2018 dan sesuai dengan Keputusan Kepala BIG Nomor 26.4 Tahun 2021 (BIG, 2021).

Metodologi Pelaksanaan

Untuk kebutuhan penyediaan data geospasial dasar untuk pemutakhiran peta, data jaringan jalan dari Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1:25.000 digunakan sebagai data referensi untuk georektifikasi. TKT dan titik uji independen (ICP) diekstraksi dari persimpangan jalan yang dianggap tidak berubah dan dapat diidentifikasi pada citra satelit. Secara umum, metodologi penelitian ini mencakup 4 langkah utama, yaitu: (1) persiapan, (2) pembuatan desain sebaran TKT dengan sebaran manual dan analisis diagram Voronoi, (3) georektifikasi, dan (4) evaluasi.

Persiapan

Pada tahap ini dilakukan penyiapan data dan informasi geospasial yang dibutuhkan untuk penelitian dan uji akurasi awal untuk mengetahui ketelitian posisi horizontal citra orthomosaik sistematis SPOT 6/7 yang diperoleh dari LAPAN. Pada tahap ini, dilakukan pemilihan dan penempatan titik uji independen/ICP yang dipilih acak dan tersebar merata pada seluruh wilayah citra. Jumlah minimal

ICP yang digunakan untuk uji akurasi ditetapkan berdasar luasan wilayah masing-masing provinsi yang ditambahkan sesuai kebutuhan dengan mempertimbangkan kerapatan dan ketersediaan obyek sebagai titik uji sebagaimana **Tabel 1**. Adapun jumlah ICP yang digunakan dalam penelitian adalah 35 titik untuk DKI Jakarta dan 93 titik untuk DIY.

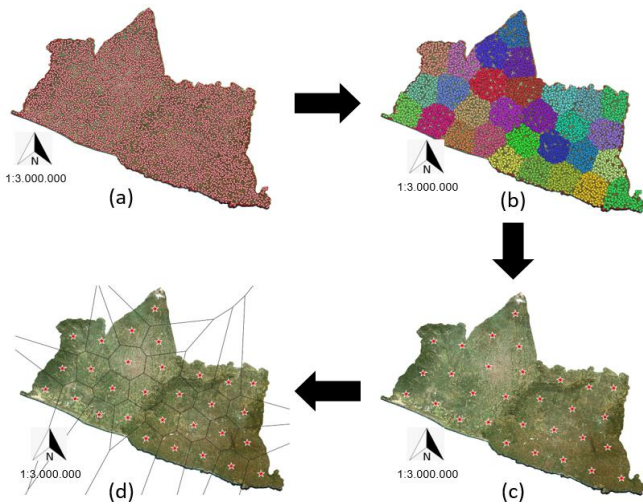
Tabel 1. Jumlah titik uji (ICP) berdasarkan luasan.

Luasan (km ²)	Jumlah Titik Uji
≤ 250	12
251-500	20
501-750	25
751-1.000	30
1.011-1.250	35
1.251-1.500	40
1.501-1750	45
1.751-2.000	50
2.001-2.250	55
2.251-2.500	60

Sumber: BSN (2019)

Pembuatan Desain Sebaran TKT dengan Sebaran Manual dan Analisis Diagram Voronoi

Pembuatan desain sebaran TKT dilakukan dengan dua metode, yaitu sebaran manual dan sebaran berdasarkan analisis diagram Voronoi. Distribusi spasial TKT secara manual dilakukan dengan menempatkan titik pada perimeter yang kemudian disebar secara merata ke bagian tengah citra. Sedangkan pada perencanaan distribusi TKT menggunakan analisis Voronoi, TKT diposisikan (reposisi) sesuai dengan area sel Voronoi dan ketersediaan jaringan jalan. Semakin dekat dengan *site* atau *centroid* semakin ideal. Dalam penelitian ini, metode pembuatan sebaran TKT berdasarkan analisis diagram Voronoi menggunakan pendekatan berbasis sampel acak (*random sampling*), sebagaimana diilustrasikan pada **Gambar 4**.



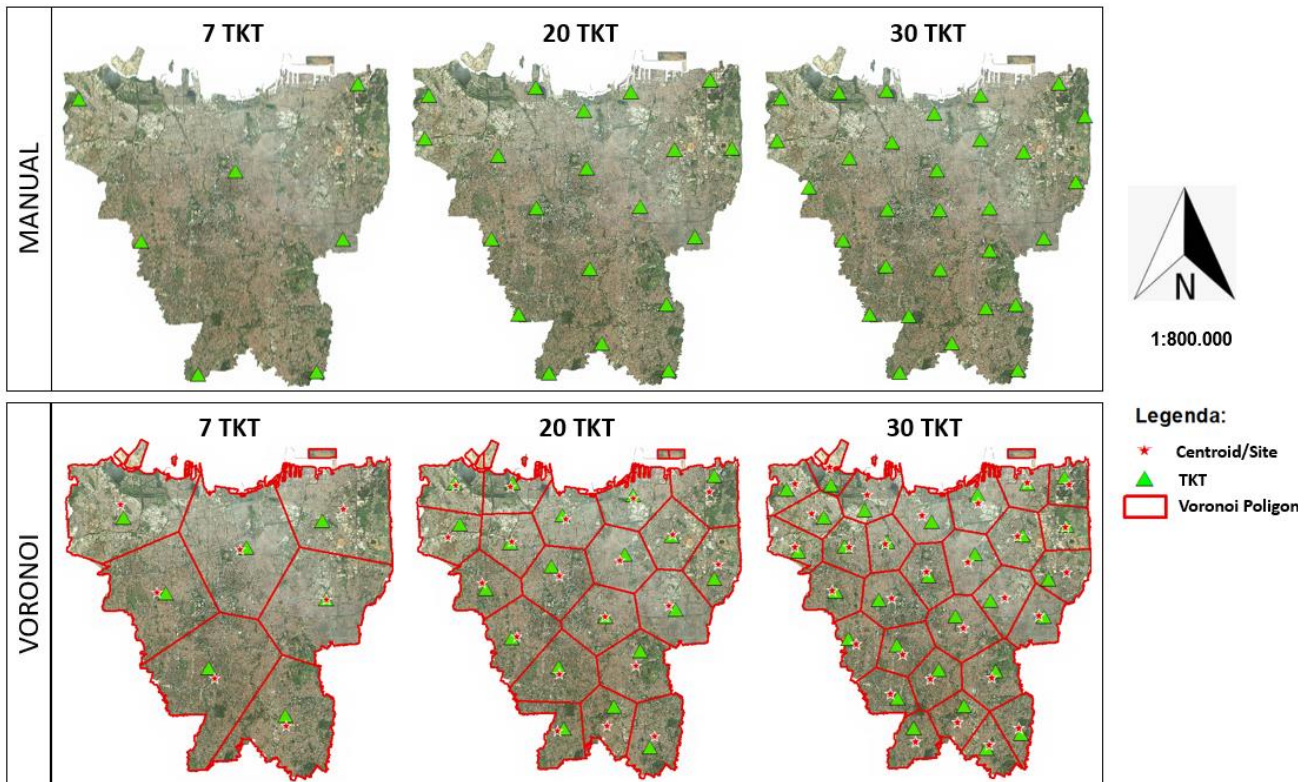
Gambar 4. Skema ekstraksi *centroid* dan diagram Voronoi untuk wilayah DIY dengan target 30 titik TKT berbasis *random sampling*: a) pembentukan 1.000 titik acak; b) *K-means clustering* dengan pengelompokan menyesuaikan jumlah TKT; c) perhitungan *centroid/site*; dan d) pembentukan diagram Voronoi.

Sebagai langkah awal, dilakukan ekstraksi titik-titik (dalam hal ini 1.000 titik) yang ditempatkan secara acak pada seluruh cakupan area penelitian. Jumlah titik acak tersebut dianggap sudah cukup mewakili cakupan wilayah penelitian. Selanjutnya, *K-means clustering* digunakan untuk mengelompokkan titik acak tersebut menjadi beberapa *cluster* sesuai

dengan jumlah TKT yang diinginkan (dalam hal ini 7, 20, dan 30). Setelah *cluster* terbentuk, dilakukan pengukuran *centroid*, yang kemudian difungsikan sebagai *site*, berdasarkan jarak *Euclidean* rata-rata dari seluruh titik yang terletak pada *cluster* yang sama. Selanjutnya, diagram Voronoi dibangun berdasarkan *site* tersebut.

Untuk menganalisis pengaruh jumlah TKT, masing-masing metode sebaran disiapkan sejumlah 7, 20 dan 30 TKT. Berdasarkan kombinasi antara sebaran dan jumlah TKT, maka pada setiap area penelitian memiliki 6 skenario atau kombinasi. Tiga set jumlah TKT yang berbeda tersebut digunakan untuk mewakili konfigurasi kerapatan sebaran titik, yaitu jarang (7 titik), sedang (20 titik), dan padat (30 titik). Adapun contoh tampilan konfigurasi spasial penempatan TKT untuk enam kombinasi berbeda pada wilayah DKI Jakarta sebagaimana disajikan pada **Gambar 5**.

Menggunakan jaringan jalan tersedia dari peta dasar sebagai referensi, maka TKT kemudian diposisikan (reposisi) tepat pada titik persimpangan jalan yang dapat diidentifikasi secara akurat di citra. Karena data jaringan jalan tersedia merupakan hasil pemetaan lebih dari 20 tahun lalu, maka harus juga dipastikan bahwa lokasi persimpangan jalan yang digunakan sebagai TKT pada citra satelit tidak berubah. **Gambar 6** mengilustrasikan penempatan TKT untuk rektifikasi pada persimpangan jalan yang dapat diidentifikasi secara baik pada data referensi maupun pada citra.



Gambar 5. Perbandingan konfigurasi dua metode sebaran TKT dengan 7, 20, dan 30 titik di wilayah DKI Jakarta. Atas: sebaran TKT secara manual, Bawah: sebaran TKT menggunakan analisis diagram Voronoi.



a. Penempatan TKT pada image b. Penempatan TKT berdasar referensi

Gambar 6. Contoh penempatan TKT pada citra orthomosaik sistematis SPOT 6/7 dengan referensi jaringan jalan dari peta RBI skala 1:25.000.

Georektifikasi

Proses georektifikasi dilakukan dengan menggunakan model polinomial orde kedua. Georektifikasi diikuti oleh proses *resampling*, yaitu proses ekstrapolasi dan realokasi nilai piksel pada citra yang baru dari nilai piksel citra aslinya. Hal ini dilakukan karena posisi piksel pada citra output tidak sama dengan posisi piksel input, sehingga piksel-piksel penyusun grid citra baru harus dilakukan *resampling* kembali. Proses *resampling* yang digunakan pada penelitian ini adalah interpolasi *Nearest Neighbor*.

Evaluasi

Untuk kebutuhan evaluasi, penelitian ini menggunakan sistem koordinat *World Mercator WGS 84* (EPSG: 3395). Evaluasi terhadap efektivitas jumlah dan sebaran TKT untuk peningkatan kualitas dan ketelitian posisi horizontal citra hasil georektifikasi dihitung berdasarkan RMSE dengan standar *circular error* 90% dari seluruh ICP yang tersebar secara merata pada cakupan area penelitian. Hal ini berarti 90% dari titik yang diuji harus berada dalam toleransi yang ditentukan. Uji akurasi horizontal dilakukan terhadap citra sebelum dan sesudah dilakukan georektifikasi. Target akurasi citra hasil georektifikasi diadopsi dari Peraturan BIG No. 6/2018 tentang Ketelitian Peta Dasar (BIG, 2018), yaitu sebesar 11,25 m pada skala 1:25.000 yang diperoleh dari ketelitian horizontal CE90 dengan **Persamaan 12.**

$$CE90 = \frac{1}{2} \times [0,9 \text{ mm} \times \text{bilangan skala peta}] \dots(12)$$

Selain perhitungan ketelitian horizontal berdasarkan RMSE, penelitian ini juga menggunakan geostatistik dan Indeks Moran untuk mengetahui autokorelasi spasial antar seluruh titik di area

penelitian. Analisis geostatistik dilakukan dengan menggunakan variogram untuk menyajikan korelasi variabilitas spasial, yaitu antara residu jarak terhadap semivarian dari sumbu -x dan sumbu -y. Selanjutnya, pembuatan peta raster *Kriging* (yaitu *Ordinary Kriging*) dilakukan untuk memperkirakan area kesalahan terpengaruh dari penyebaran TKT berdasarkan fungsi residu jarak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil uji akurasi, citra awal (sebelum proses georektifikasi) pada kedua area penelitian memiliki ketelitian horizontal melebihi 11,25 m. Dengan demikian, tanpa dilakukan koreksi geometrik, maka citra tersebut tidak memenuhi syarat untuk digunakan sebagai data masukan untuk pemutakhiran peta dasar skala 1:25.000. Hasil uji akurasi terhadap titik uji menggunakan 6 skenario sebaran TKT berbeda pada dua area penelitian DKI Jakarta dan DI Yogyakarta disajikan pada **Tabel 2** dan **Tabel 3.**

Tabel 2. Ketelitian horizontal terhadap 35 ICP di wilayah DKI Jakarta berdasarkan nilai RMSE.

Metode Sebaran	7 TKT (m)	20 TKT (m)	30 TKT (m)
Manual	14,64	10,82	9,51
Voronoi	7,41	7,37	5,99
Citra tanpa georektifikasi	17,06		

Tabel 3. Ketelitian horizontal terhadap 95 ICP di wilayah DIY berdasarkan nilai RMSE.

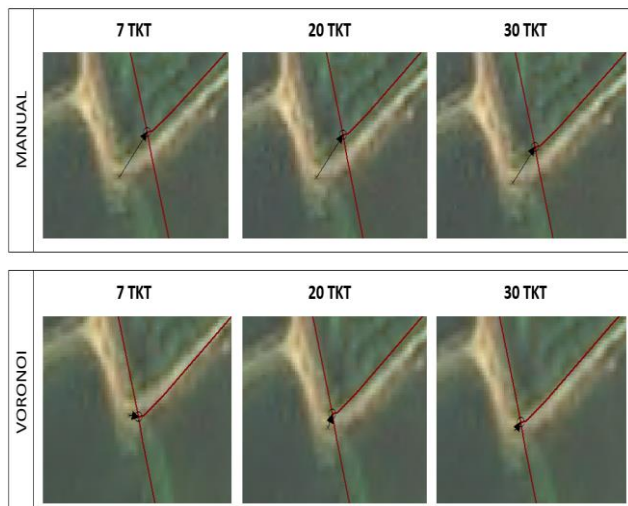
Metode Sebaran	7 TKT (m)	20 TKT (m)	30 TKT (m)
Manual	8,52	8,06	6,58
Voronoi	7,10	6,57	5,91
Citra tanpa georektifikasi	18,06		

Penggunaan sejumlah 7 TKT yang tersebar merata berdasarkan analisis Voronoi pada kedua area penelitian, mampu meningkatkan akurasi citra yang tinggi yaitu menjadi 7,41 m (DKI Jakarta) dan 7,10 m (DIY) dibandingkan citra tanpa georektifikasi, sehingga dapat memenuhi kebutuhan akurasi horizontal 11,25 m untuk skala 1:25.000. Sedangkan penggunaan sejumlah 7 TKT dengan sebaran manual pada dua area penelitian menghasilkan nilai yang cukup, yaitu peningkatan akurasi hingga 8,52 m di DIY dan 14,64 m di wilayah DKI Jakarta.

Pada kedua area penelitian, sebaran secara manual dengan 7 TKT menghasilkan ketelitian horizontal paling kecil sedangkan sebaran menggunakan analisis Voronoi dengan 30 TKT menghasilkan akurasi paling tinggi. Akurasi citra hasil

georektifikasi dengan 20 TKT sebaran manual (10,82 m untuk DKI Jakarta dan 8,06 m untuk DIY) lebih rendah daripada akurasi citra hasil georektifikasi dengan 7 TKT dengan sebaran Voronoi 7 TKT (7,37 m untuk DKI Jakarta dan 6,57 m untuk DIY). Sebagaimana diindikasikan oleh **Tabel 2** dan **Tabel 3**, penambahan jumlah TKT dengan sebaran manual di wilayah DKI Jakarta mampu meningkatkan ketelitian secara signifikan sampai dengan 5,14 m. Sedangkan untuk wilayah DIY, penambahan TKT pada sebaran manual mampu meningkatkan akurasi geometrik hingga 1,94 m. Penambahan jumlah TKT dengan sebaran Voronoi tidak meningkatkan akurasi secara signifikan. Hal ini dibuktikan dengan ketelitian horizontal DKI Jakarta yang hanya meningkat hingga 1,42 m dan kurang dari 1,12 m untuk DIY. Dengan demikian, jumlah TKT untuk kebutuhan georektifikasi dapat dikurangi apabila sebarannya menggunakan analisis diagram Voronoi.

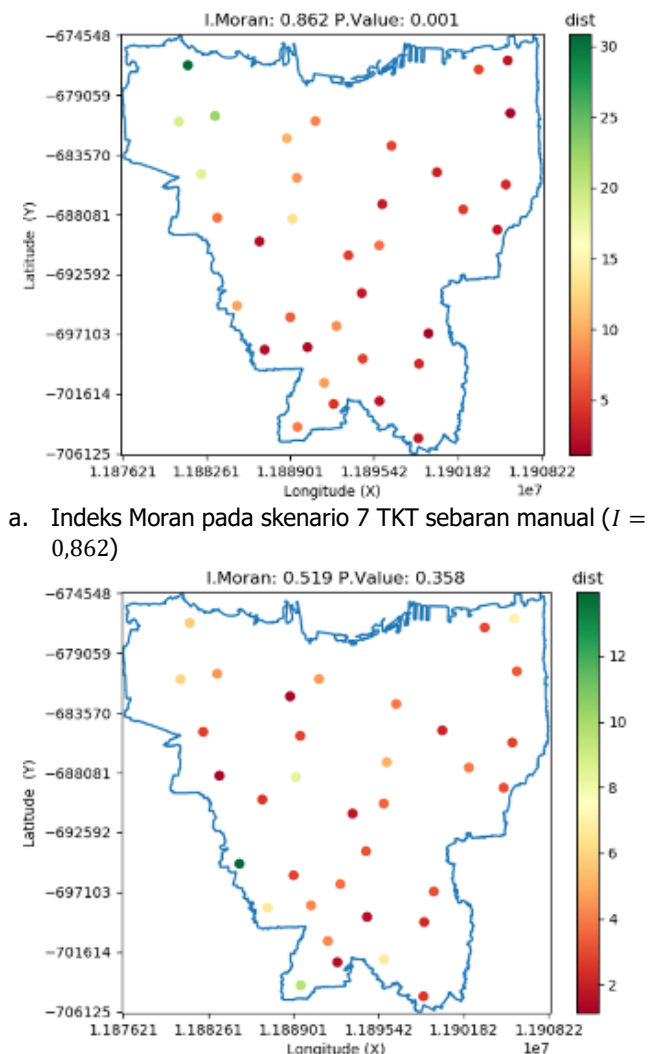
Gambar 7 menampilkan perbandingan residu jarak dan arah pergeseran dari 6 kombinasi berbeda pada salah satu titik ICP di wilayah DKI Jakarta. Residu pada titik ICP tersebut hampir semuanya memiliki arah yang sama dengan besaran nilai (*magnitude*) yang berbeda, baik pada sebaran manual maupun Voronoi. Pada hasil rektifikasi dengan menggunakan 7, 20 atau 30 titik, besaran nilai distorsi yang dihasilkan relatif sama pada sebaran manual, begitu pula pada sebaran Voronoi. Hal ini memperlihatkan bahwa penggunaan sebaran Voronoi jauh lebih efektif untuk memberikan koreksi geometrik dibandingkan dengan sebaran manual, pada kondisi penggunaan jumlah TKT yang sama.



Gambar 7. Perbandingan besaran/*magnitude* dan arah residu jarak (anak panah hitam) dari salah satu ICP terhadap vektor referensi jaringan jalan (garis merah) di DKI Jakarta untuk 6 kombinasi berbeda (ditampilkan pada skala 1:800).

Indeks Moran menghitung koefisien korelasi berdasarkan lokasi terhadap tetangga dan nilai atribut yang sama. Berdasarkan atribut residu jarak,

sebaran manual (**Gambar 8.a**) memiliki variasi atribut lebih tinggi, yaitu antara 0-30 m, dibandingkan dengan sebaran Voronoi (**Gambar 8.b**) yang berkisar antara 0-12 m. Hal ini mengindikasikan bahwa sebaran TKT berdasarkan analisis diagram Voronoi lebih konsisten. Hasil perhitungan Indeks Moran untuk 6 skenario sebaran TKT ditampilkan pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**. Indeks Moran terbesar dimiliki oleh sebaran manual 7 TKT di DKI Jakarta, yaitu 0,862 yang berarti bahwa antar TKT masih memiliki korelasi atau ketergantungan secara spasial yang cukup tinggi. Dengan demikian, pergeseran satu titik akan cukup signifikan mempengaruhi residu jarak di lokasi titik di sekitarnya. Lain halnya dengan sebaran Voronoi 30 TKT yang memiliki indeks lebih kecil (semakin mendekati nilai 0), dimana hal ini berarti bahwa antar titik sudah lebih independen. Sebaran TKT yang memiliki independensi akan menghasilkan akurasi yang lebih stabil, terutama terhadap adanya perubahan atau pergeseran TKT lain.



a. Indeks Moran pada skenario 7 TKT sebaran manual ($I = 0,862$)

b. Indeks Moran pada skenario 7 TKT sebaran Voronoi ($I = 0,519$)

Gambar 8. Contoh hasil perhitungan Indeks Moran I terhadap fungsi distorsi jarak dari citra hasil georektifikasi wilayah DKI Jakarta.

Tabel 4. Perbandingan Indeks Moran untuk 6 skenario jumlah dan sebaran TKT di DKI Jakarta.

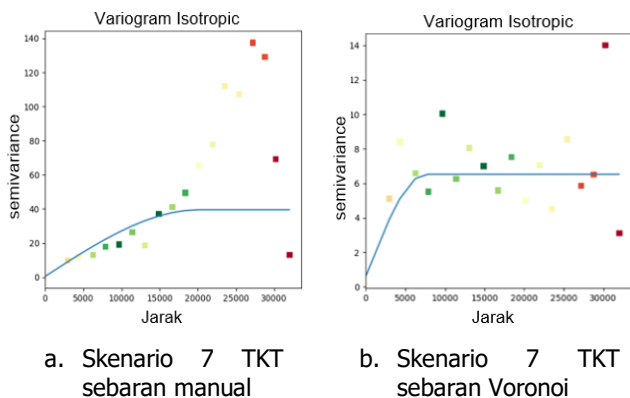
	7 TKT	20 TKT	30 TKT
Manual	0,862	0,707	0,599
Voronoi	0,519	0,553	0,451

Tabel 5. Perbandingan Indeks Moran untuk 6 skenario jumlah dan sebaran TKT di DIY.

	7 TKT	20 TKT	30 TKT
Manual	0,613	0,554	0,384
Voronoi	0,522	0,360	0,368

Untuk dapat menganalisis perambatan kesalahan yang mencakup seluruh wilayah penelitian, maka dilakukan interpolasi residu jarak dari tiap titik ICP yang ditetapkan untuk menghasilkan peta kesalahan (*error map*) dalam format raster. Berdasarkan variogram yang dibentuk dari perhitungan semivarian terhadap residu jarak pada masing-masing ICP, peta kesalahan dapat dibentuk menggunakan metode *Kriging*.

Contoh dua variogram yang dihasilkan sebagai *input* untuk proses interpolasi dengan *Kriging* di wilayah DKI Jakarta menggunakan 7 TKT dengan sebaran manual dan sebaran Voronoi ditampilkan pada **Gambar 9**. Model variogram yang *fit* terhadap variogram eksperimental (dalam hal ini *semivariance* hasil pengamatan) akan menghasilkan prediksi *Kriging* yang lebih akurat. Dari kedua contoh variogram tersebut, **Gambar 9.b** menunjukkan bahwa sebaran TKT menggunakan Voronoi mampu menghasilkan nilai varian jarak lebih seragam (0-14) dan lebih *fit* terhadap grafik model variogram dengan korelasi minimum dibandingkan dengan sebaran TKT manual (0-140) sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 9.a**. Dengan demikian, variogram sebaran Voronoi lebih baik dalam hal menghasilkan titik-titik dengan korelasi minimum serta dapat menyediakan model variogram yang sesuai dengan data.

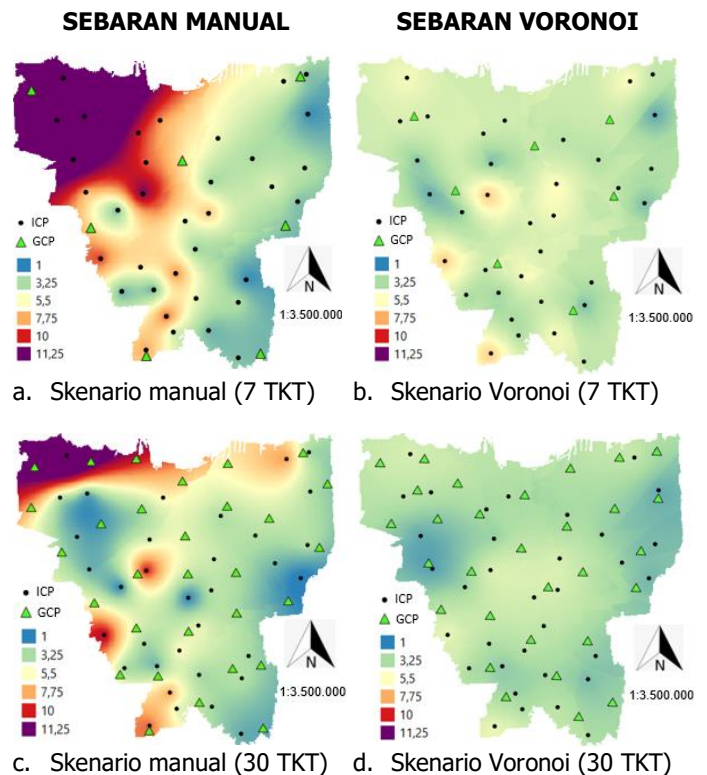


Gambar 9. Variogram berdasar semivarian dan jarak untuk dua skenario penyebaran menggunakan 7 TKT di wilayah DKI Jakarta. Warna titik berbeda menunjukkan *point id* yang berbeda.

Gambar 10 menampilkan peta kesalahan hasil interpolasi *Kriging* yang mewakili beberapa bahasan terpenting terkait analisis jumlah dan sebaran TKT

untuk georektifikasi. Peta kesalahan dari sebaran manual dengan 7 TKT (**Gambar 10.a**) memiliki perubahan kesalahan yang paling signifikan dibanding skenario sebaran yang lain. Skenario tersebut menghasilkan suatu area dengan residu jarak yang melebihi toleransi yang diperbolehkan, yaitu lebih dari 11,25 m (warna ungu) pada bagian barat laut wilayah DKI Jakarta. Penambahan titik menjadi 30 TKT dengan sebaran secara manual (**Gambar 10.c**) mampu meminimalisasi luas area dengan residu jarak yang melebihi ketelitian horizontal yang diharapkan sehingga kemudian mampu meningkatkan akurasi geometrik secara keseluruhan. Dengan adanya area dengan residu jarak melebihi toleransi yang dideteksi baik pada penggunaan 7 dan 30 TKT juga mengindikasikan kemungkinan penempatan TKT yang kurang akurat di citra. Terlebih lagi, TKT tersebut diposisikan pada tepi atau sudut area penelitian.

Jika jumlah TKT pada sebaran manual cukup mempengaruhi distorsi jarak pada citra hasil georektifikasi, maka sebaran TKT berdasarkan analisis Voronoi (**Gambar 10.b** dan **Gambar 10.d**) tidak banyak terpengaruh oleh penambahan jumlah TKT yang digunakan. Pada kedua peta kesalahan tersebut tidak tampak adanya area dengan residu jarak melebihi 11,25 m. Hal ini mengindikasikan, sebaran berdasarkan analisis diagram Voronoi mampu menghasilkan akurasi geometrik yang lebih merata dan stabil pada wilayah penelitian.



Gambar 10. Peta kesalahan hasil interpolasi *Kriging* berdasarkan residu jarak ICP pada hasil georektifikasi di wilayah DKI Jakarta.

KESIMPULAN

Kajian terhadap jumlah dan sebaran TKT terhadap akurasi hasil georektifikasi dalam rangka menyediakan data geospasial dasar untuk pemutakhiran peta dasar telah dijelaskan. Diketahui juga bahwa akurasi dari citra mosaik SPOT 6/7 hasil orthorektifikasi dengan hanya menggunakan data DEM secara sistematis masih dapat ditingkatkan akurasi relatif terhadap peta dasar Rupa Bumi Indonesia skala 1:25.000. Dengan demikian, data citra mosaik SPOT 6/7 hasil georektifikasi ini selanjutnya dapat digunakan sebagai data masukan utama untuk pemutakhiran peta dasar.

Georektifikasi mampu meningkatkan akurasi geometrik citra orthomosaik SPOT 6/7 secara signifikan, yaitu dari 17,06 m menjadi 5,99 m untuk wilayah DKI Jakarta dan dari 18,06 m menjadi 5,91 m untuk wilayah DIY.

Berdasarkan nilai ketelitian horizontal dapat disimpulkan bahwa penggunaan TKT dengan sebaran berdasarkan analisis diagram Voronoi lebih meningkatkan akurasi geometrik secara signifikan dibandingkan dengan hanya menambah jumlah TKT secara manual. Citra hasil georektifikasi dengan 7 TKT yang didistribusikan menggunakan analisis diagram Voronoi memiliki ketelitian lebih tinggi dari hasil georektifikasi menggunakan sejumlah 30 TKT yang disebar secara manual. Meskipun tidak signifikan, penambahan jumlah TKT tetap dapat meningkatkan akurasi hasil georektifikasi citra.

Selain itu, berdasarkan analisis autokorelasi spasial dan geostatistik, penggunaan sebaran berbasis Voronoi mampu melokalisasi perambatan kesalahan dan menghasilkan konfigurasi TKT yang lebih stabil. Dengan demikian, direkomendasikan penggunaan diagram Voronoi untuk membantu penempatan TKT secara merata meskipun pada akhirnya akan juga tergantung pada kesediaan jaringan jalan dan visibilitas wilayah yang bersangkutan.

Walaupun ketelitian hasil georektifikasi sangat tergantung dengan ketelitian data referensi, namun penggunaan jaringan jalan dari peta dasar sebagai referensi georektifikasi dalam rangka kegiatan pemutakhiran peta dasar dapat mengakomodasi keselarasan citra satelit terhadap peta dasar tersedia serta meningkatkan ketelitian horizontal citra SPOT 6/7 orthomosaik sistematis. Ke depan, penelitian mengenai sebaran TKT pada wilayah dengan ketersediaan, akses, dan visibilitas obyek yang terbatas pada suatu wilayah perlu untuk dilakukan, terutama dalam kaitannya dengan implementasi diagram Voronoi pada wilayah yang bersangkutan. Analisis menggunakan beberapa parameter yang belum dipertimbangkan dalam penelitian ini, seperti perambatan kesalahan dari data jaringan jalan peta dasar dan pengaruh pergeseran pada citra juga patut untuk dikaji lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Badan Informasi Geospasial atas dukungan seluruh data yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aber, J.S., Marzoff, I. & Ries, J. (2010). *Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications*. Elsevier Science. 268 pp.
- Airbus. (2013). *SPOT Imagery User Guide*. Diakses dari <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SPOT-6-7-imagery-user-guide.pdf>. [24 Maret 2022].
- Baboo, S.S., & Devi, M.R. (2011). Geometric correction in recent high resolution satellite imagery: a case study in Coimbatore, Tamil Nadu. *International Journal of Computer Applications*, 14(1), 32-37. DOI: <https://doi.org/10.5120/1808-2324>.
- Bappeda Prov. DIY (Badan Perencanaan Pembangunan Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta). (2022). *Data Luas Wilayah*. Diakses dari http://bappeda.jogjapro.go.id/dataku/data_dasar/cetak/422-luas-wilayah?id_skpd=50. [21 Maret 2022].
- Barbieux, K. (2018). Pushbroom hyperspectral data orientation by combining feature-based and area-based co-registration techniques. *Remote Sensing*, 10(4), 645, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040645>.
- Barca, E., Porcu, E., Bruno, D. & Pasarella, G. (2017). An automated decision support system for aided assessment of variogram models. *Environmental Modelling & Software*, 87, 72-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.004>.
- BIG (Badan Informasi Geospasial). (2018). Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 tentang Perubahan Atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Badan Informasi Geospasial. Bogor.
- BIG (Badan Informasi Geospasial). (2020). Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 2 Tahun 2020 tentang Manajemen Kualitas Informasi Geospasial pada Badan Informasi Geospasial. Badan Informasi Geospasial. Bogor.
- BIG (Badan Informasi Geospasial). (2021). Keputusan Kepala BIG Nomor 26.4 Tahun 2021 tentang Penetapan Peta Dasar Edisi Tahun 1999-2020. Badan Informasi Geospasial. Bogor.
- BPS (Badan Pusat Statistik). (2020). *Luas Daerah Menurut Kabupaten Kota*. Diakses dari <https://jakarta.bps.go.id/indicator/153/38/1/luas-daerah-menurut-kabupaten-kota.html>. [21 Maret 2022].
- Brassel, K.E., & Reif, D. (1979). A Procedure to Generate Thiessen Polygons. *Geographical Analysis*, 11(3), 289-303. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00695.x>.
- Brovelli, M.A., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Giannone, F. & Realini, E. (2008). Accuracy assessment of high resolution satellite imagery orientation by leave-one-out method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(4), 427-440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.01.006>.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional). (2019). Standar Nasional Indonesia (SNI) 8202:2015 tentang

- Ketelitian Peta Dasar (2015). Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Cavegn, S., Haala, N., Nebiker, S., Rothermel, M., & Zw'lfner, T. (2015). Evaluation of matching strategies for image-based mobile mapping. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2, 361-368. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W5-361-2015>.
- Danoedoro, P. (2012). *Pengantar Penginderaan Jauh Digital*. xxvi, 398 hlm. Penerbit Andi. Yogyakarta.
- Datu-Dacula, A.H., Laurente, M.P., & Macoy, J.B. (2018). The relation of variogram to kriging. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics*, 6(2), 64-67.
- de Berg, M.T., Cheong, O., van Kreveld, M. & Overmars, M. (2008). *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. (Third Edit). 386 pp. Springer Science & Business Media.
- El-Manadili, Y., & Novak, K. (1996). Precision rectification of SPOT imagery using the Direct Linear Transformation model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(1), 67-72.
- FGDC (Federal Geographic Data Committee). (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3. Diakses dari <https://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>. [22 Maret 2022].
- Gisda, A.P., Purnawan, B. & Sukmayadi, D. (2019). Pengkajian proses citra tegak (ortho) satelit resolusi sangat tinggi secara orthosistematis dan orthorektifikasi primer studi kasus wilayah bangka. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik Geodesi*, 1(1), 1-9.
- Glasbey, C.A., & Mardia, K.V. (1998). A review of image-warping methods. *Journal of Applied Statistics*, 25(2), 155-171. DOI: <https://doi.org/10.1080/02664769823151>.
- Hughes, M.L., McDowell, P.F. & Marcus, W.A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74(1-4), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.001>.
- Kumar, V.G., Reddy, K.V. & Pratap, D. (2013). Updation of cadastral maps using high resolution remotely sensed data. *Int. J. Eng. Adv. Technol (IJEAT)*, 2(4), 50-54.
- LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa). ND. Spacemap. Diakses dari <https://spacemap.lapan.go.id/>. [15 Januari 2022].
- Lembo, A.J. (2006). *Spatial autocorrelation*. Cornell University.
- Lippitt, C.D. (2020). *Georeferencing and Georectification*. In J.P. Wilson (Ed.), *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowled*. (3rd Quarter 2020 Edition). UCGIS. DOI: <https://doi.org/10.22224/gistbok/2020.3.3>.
- Maune, D., Maitra, J. & McKay, E. (2007). *Accuracy Standards & Guidelines*. In D. Maune (Ed.), *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual* (2nd ed.), 65-97). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda. USA.
- Mutluoğlu, Ö., Yakar, M. & Yilmaz, H.M. (2015). Investigation of effect of the number of ground control points and distribution on adjustment at WorldView-2 Stereo images. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computer*, 3(1), 37-41. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.1158.2244>.
- Müller, R., Lehner, M., Müller, R., Reinartz, P., Schroeder, M. & Vollmer, B. (2002). A program for direct georeferencing of airborne and spaceborne line scanner images. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(1), 148-153.
- Oliver, M.A. & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 4(3), 313-332. DOI: <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>.
- Orti, F. (1981). Optimal distribution of control points to minimize landsat image registration errors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(1), 101-110.
- Pohl, C. & Van Genderen, J. (2016). *Remote sensing image fusion: A practical guide*. 288 pp. Crc Press.
- Rudianto, B. (2011). Analisis pengaruh sebaran ground control point terhadap ketelitian objek pada peta citra hasil ortorektifikasi. *Jurnal Rekayasa Teknologi Institut Teknologi Nasional*, 15(1), 11-18.
- Smith, D.P. & Atkinson, S.F. (2001). Accuracy of rectification using topographic map versus GPS ground control points. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(5), 565-570.
- Tiede, D. & Strobl, J. (2006). Polygon-based Regionalisation in a GIS Environment. Diakses dari: <https://www.researchgate.net/publication/252121443>.
- Toutin, T. (2004). Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10), 1893-1924. DOI: <https://doi.org/10.1080/0143116031000101611>.
- US Bureau of the Budget. (1947). *United States National Map Accuracy Standards*. Bureau of the Budget. Washington, D.C.
- Wang, J., Ge, Y., Heuvelink, G.B.M., Zhou, C. & Brus, D. (2012). Effect of the sampling design of ground control points on the geometric correction of remotely sensed imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 91-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.01.001>.
- Widyaningrum, E., Fajari, M. & Octariady, J. (2016). Accuracy comparison of VHR systematic-ortho satellite imageries against VHR orthorectified imageries using GCP. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives*, 2016, 305-309). DOI: <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-305-2016>.
- Widyaningrum, E., Lindenbergh, R.C., Gorte, B.G.H. & Zhou, K. (2018). Extraction of building roof edges from LiDAR data to optimize the digital surface model for true orthophoto generation. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2), 1199-1205. DOI: <http://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-1199-2018>.
- Yang, X. (1997). *Georeferencing CAMS Data: Polynomial rectification and beyond*. University of South Carolina. USA.
- Ying, Z., Dong, Z., Yan, G. & Fei, T. (2007). Impact of GCP distribution on the rectification accuracy of Landsat TM imagery in a coastal zone. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(4), 14-22.