

# Modelarea și reconstrucția tridimensională a structurilor arheologice realizate din seturi de date și imagini aeriene

Maria-Magdalena Ștefan, Dan Ștefan<sup>1</sup>

## Rezumat

Prima etapă de explorare aeriană a sectorului sudic al *Limes Transalutanus* a constituit prilejul experimentării noilor tehnologii fotogrametrice de modelare și reconstrucție tridimensională a terenului bazate pe tehnica SfM (*Structure from Motion*). În articol sunt prezentate principiile generale ale acestei metode, instrumentele software utilizate și principalele rezultate obținute. În final sunt formulate, în baza experienței dobândite de autori, o serie de recomandări referitoare la aplicarea noilor metode fotogrametrice pentru generarea de date și modele spațiale utile în cercetarea arheologică.

**Cuvinte cheie:** Fotogrametrie, *Limes Transalutanus*, SfM, MVS, DSM, *dense point cloud*, SIFT, UAV

## Introducere

Fotogrametria nu reprezintă un sector distinct de cercetare în proiectul *Limes Transalutanus*; cu toate acestea, ea este parte a unei tehnologii vitale pentru reușita întreprinderii. Așa cum se explică pe larg în capitolul introductiv al acestui volum, sarcina fundamentală pe care ne-am asumat-o este o reprezentare topografică cât mai exactă a principalelor repere ale graniței romane din prima jumătate a secolului al III-lea. Din cauza lungimii acestui sector – cca 157 de km, între Dunăre și râul Argeș – ar fi fost imposibil să ne punem problema topografierii cu mijloace pe care, de acum, le putem considera „clasice”, respectiv cu stația totală. Instrumentele din zona *remote sensing* erau însă la îndemână; drona (respectiv aparatul de fotografiat pe care îl poartă) și fotogrametria sunt instrumentele complementare de care aveam nevoie<sup>2</sup>. Detașarea celor două, în cuprinsul acestui volum, drept două articole distincte, este una de interes mai degrabă pedagogic, fiindcă volumul acesta este adresat cititorului român – arheolog sau doar pasionat de arheologie.

Teledeteția – căci acest este numele românesc pentru *remote sensing* – are avantaje pe care, de aici încolo, arheologia nu-și va mai permite să nu le ia în considerare. Este vorba, în primul rând, de costuri. Nu vom face aici o complicată analiză de costuri, dar vom compara, drept exemplu, doar durata operațiunilor în câmp. Dacă o ridicare topografică pentru 50 de hectare, cu stația totală, ar dura – în funcție de gradul de detaliu – între trei zile și o săptămână, punerea unor ținte (5-7 „semne” plantate în peisaj), măsurarea lor (fie cu stația totală, fie cu un GPS performant), ridicarea dronei și strângerea țintelor durează, cel mult, trei ore.

Al doilea avantaj este nivelul de detaliere. În cazul stației totale, ea este rezultatul numărului de puncte măsurate; nu prea există ridicări topografice care să aibă mai mult de un punct la metru pătrat (în medie), dar știm că majoritatea nu au un punct la 10 m<sup>2</sup>. Ei bine, în cazul tehnologiei aeropurtate, rezoluția se alege funcție de echipamentul folosit și de parametrii de zbor. Nu există limite ale rezoluției, aceasta putând fi

---

<sup>1</sup> În ordine: Institutul de Arheologie ”Vasile Pârvan” București ([m\\_magdalena.stefan@yahoo.com](mailto:m_magdalena.stefan@yahoo.com)); Vector Studio SRL București ([danstefan00@gmail.com](mailto:danstefan00@gmail.com));

<sup>2</sup> LiDAR și *terrestrial laser scanner* sunt tehnologii mult costisitoare pentru nivelul uzual al finanțării cercetării arheologice din România.

de 1 mm, dacă se dorește acest lucru<sup>3</sup>. Rămâne de stabilit, totuși, care este necesarul, în fiecare caz, fiindcă între rezoluție și costuri există o relație de proporționalitate. Așa cum vom vedea, datele achiziționate, ce urmează a fi prelucrate prin tehnici fotogrametrice, sunt tridimensionale, deci progresia este cubică, cel puțin la nivelul producției (și stocării datelor și produselor de etapă); între rezoluția de 1 cm și cea de 10 cm diferența nu este 10 x, ci 1000 x.

În cazul acestui proiect de cercetare, datorită dimensiunii terenului în care cercetările aveau loc, a existat tot timpul – și există permanent – o dezbatere și o alegere dificilă între „cantitate” și „calitate”, pentru că, oricare ar fi opțiunea noastră, resursele umane și financiare sunt aceleași, adică limitate. De aceea a trebuit să căutăm un „optim”, care să ofere produse suficient de bune încât să favorizeze noutatea informațională, dar suficient de ieftine pentru a fi aplicabile pe suprafețe mari. Pentru scopurile declarate ale acestui proiect, o rezoluție de 10 cm pentru ortofotografie și una de 20 cm pentru modele teren, au fost considerate optime; optim care, desigur, se stabilește pentru fiecare temă de cercetare în parte.

Vom vedea, mai departe, ce a însemnat obținerea acestor produse din seturi de imagini și date aeriene, care este tehnologia care ne permite accesul pe *the next level*.

### Structuri calculate din imagini, prin analiza mișcării

În fotogrametria tradițională, pornind de la corespondențe stabilite între imagini bidimensionale, se pot obține informații 3D despre scene sau structuri surprinse în imaginile analizate<sup>4</sup>. Pentru aceasta, este necesară cunoașterea poziției în spațiu a camerei. Dacă această informație lipsește, estimarea punctelor de stație ale camerei este posibilă prin corelarea unor repere vizuale (puncte de control aflate în câmpul fotogramei) cu poziții cunoscute în spațiu, distribuite pe suprafața subiectului fotografiat. O altă etapă obligatorie este determinarea sau calcularea parametrilor interni ai ansamblului format din camera foto și sistemul optic al acesteia (dimensiune senzor, distanță focală, numeroși alți parametri care descriu distorsiunile liniare și neliniare ale sistemului optic). Procesul complex prin care sunt determinate pozițiile în spațiu ale punctelor de stație și ale parametrilor interni ai camerei este denumit calibrare<sup>5</sup>. După parcurgerea etapei de calibrare, este posibilă calcularea unui model tridimensional al unei scene prin tehnici trigonometrice simple<sup>6</sup>.

În practică, sunt multe cazuri în care punctele de stație și/sau datele intrinseci ale camerei nu sunt cunoscute și nici nu este posibilă ori, mai ales, nu este convenabilă (din punct de vedere practic) calcularea acestor date. În acest caz, este necesară o abordare conceptuală și algoritmică diferită pentru reconstrucția structurilor din lumea reală. De fapt, reprezentarea scenelor tridimensionale prin proiecții bidimensionale (imagini fotografice, în cazul nostru) este supusă unor constrângeri geometrice bine cunoscute. Aceste constrângeri oferă un set suficient de informații pentru a reconstrui atât scena proiectată cât și parametrii intrinseci și extrinseci ai camerei. Acest lucru este ușor de înțeles pornind de la observații practice. Omul și alte organisme biologice înzestrate cu organe senzoriale vizuale pot reconstrui cu ușurință structuri din lumea reală prin analiza unei secvențe de observații (imagini) percepute în timpul mișcării în jurul structurii analizate. Tot în acest fel, în grafica computerizată sunt calculate și reprezentate modele virtuale, prin

<sup>3</sup> Așa cum am văzut într-o conferință organizată la MNIR, în data de 13 iunie 2016, referitoare la cercetările de la Sultana-Malul Roșu, organizată de Cătălin Lazăr. Prezentarea a fost susținută de ing. Adrian Trifan, de la SC Total Survey. Eroarea medie a unui astfel de produs este tot în jur de 1 mm. Dincolo de demonstrația de precizie (care este remarcabilă), rămâne să ne întrebăm la ce folosește, realmente, o asemenea rezoluție, fiindcă nici o astfel de performanță nu trebuie separată de costuri, de la cele de fabricație, la cele de arhivare și uz (fișierul este atât de mare, încât doar stația grafică necesară deschiderii lui va fi cât bugetul unui șantier arheologic pe un an).

<sup>4</sup> Cu toate că este posibilă estimarea unui model de adâncime pornind de la o singură imagine (vezi, de exemplu Saxena et al 2008, precum și proiectul online Make3d asociat), o reconstrucție precisă a unei scene date este posibilă doar atunci când sunt utilizate mai multe imagini ale respectivei scene. De exemplu, stereofotogrametria folosește perechi de imagini înregistrate cu camere stereoscopice, sistem care corespunde vederii binoculare umane. O descriere tridimensională completă a scenei impune utilizarea unei serii compuse dintr-un număr mult mai mare de imagini (MVS – *Multi-view Stereo*).

<sup>5</sup> Tsai 1987; Remondino, Fraser 2006.

<sup>6</sup> În acest caz se folosește triangulația.

inclusiunea cinematicii camerei în procesul de calcul. Procesul descris, denumit SfM (*structure from motion* – structură din mișcare), este implementat în ultima vreme de tot mai multe aplicații software<sup>7</sup>.

### Workflow SfM

Fluxul de prelucrare a datelor este inițiat printr-o procedură de identificare a punctelor comune (*tie points* – puncte de legătură) în cadrul unui set de fotografii ce descriu aceeași scenă. Pentru aceasta, pot fi folosite mai multe formule de calcul. Foarte popular este algoritmul *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT)<sup>8</sup> ce identifică acele elemente comune în mai multe fotografii care nu variază, indiferent de scara și unghiul de rotație ale imaginii și care sunt influențate doar parțial de iluminare și de poziția în spațiu a camerei<sup>9</sup>.

Pe baza perechilor de puncte de legătură poate fi calculată simultan geometria internă a camerei, geometria externă a acesteia (poziția punctelor de stație) și referințele tridimensionale ale întregii scene – extrase sub forma unui nor tridimensional rar de puncte (*sparse point cloud*). Procedura se numește *bundle adjustment*<sup>10</sup>.

Numărul de puncte de invarianță identificate este influențat de textura și rezoluția imaginii, de aceea scenele complexe, cu texturi neuniforme surprinse în imagini cu rezoluție mare permit obținerea celor mai bune rezultate. În cazul proiectului *Limes Transalutanus* una dintre probleme a fost uniformitatea texturilor înregistrate – câmpuri agricole de mari dimensiuni sau zone împădurite extinse, ambele situații caracterizându-se prin puține diferențe cromatice, texturale.

Odată stabilite reperele de bază ale camerei și ale scenei, urmează un proces de densificare (de tip MVS – *Multi View Stereo* sau *stereo-matching*) prin care descriptorii tridimensionali de tip *sparse cloud* sunt transformați în *dense cloud*<sup>11</sup>. Norul de puncte, calculat prin alinierea imaginilor, nu aparține vreunui sistem absolut de coordonate, ci unuia relativ, nefiind așadar scalat sau orientat în spațiu. Transformarea norului de puncte în suprafețe (rețele neregulate triangulate – *mesh*), prin interpolare, se bazează pe alți algoritmi<sup>12</sup> (din domeniului *computer vision*).

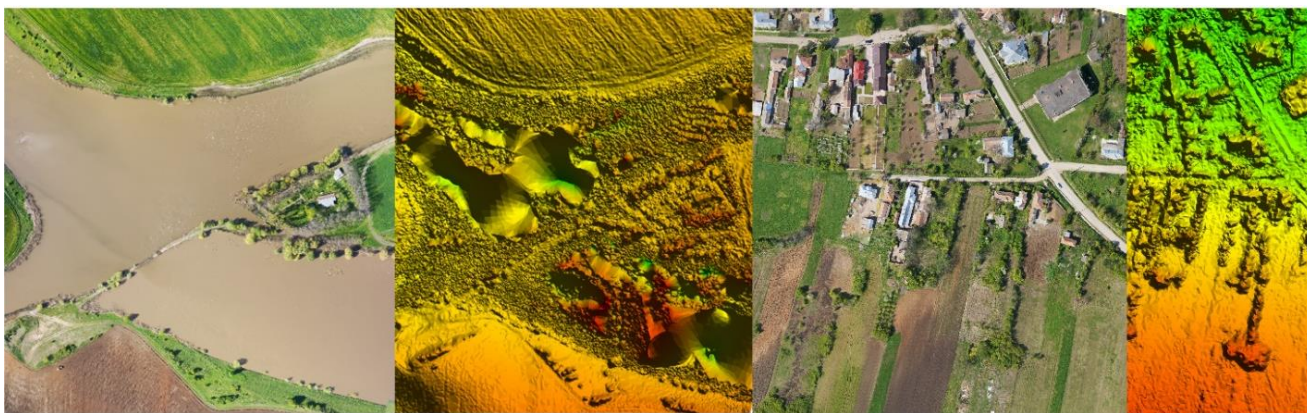


Figura 1 (de la stânga la dreapta): a – detaliu dintr-o fotografie a unei suprafețe reflectorizante (apă) căreia nu-i poate fi corect reconstituit modelul digital (b); c – detaliu dintr-o fotografie a unei zone cu case și vegetație surprins și în DSM (d)

<sup>7</sup> De exemplu: Agi Soft Photoscan, PhotoModeller, SFMToolkit, Photosynth, Bundler, PMVS2, PIX4D, VisualSfM, 123DCatch, Drone2Map for ArcGIS.

<sup>8</sup> Lowe 2004.

<sup>9</sup> Agisoft Photoscan aplică algoritmi similari creând descriptorii pentru fiecare punct de invarianță în parte pe baza unui calcul de asemănare de vecinătate – *local neighbourhood*.

<sup>10</sup> *Bundle* – fascicule de lumină ce sunt captate dinspre obiectul din spațiul tridimensional și converg în centrul optic al camerei. Triggs et alii 2000.

<sup>11</sup> Zhang et alii 2012; Spetsakis, Aloimonos 1990.

<sup>12</sup> Berger et alii 2014.



Norii de puncte se obțin nu doar în urma aplicării metodelor pasive de achiziție a datelor 3D așa cum este *Multi-View Stereo*, dar și în urma utilizării unor metode active, așa cum este LiDAR, laser scanner sau scanner cu lumină structurată ori lumină codată. Operarea concretă cu seturi de date atât de dense<sup>13</sup>, uneori cu milioane de puncte, s-a dovedit a reprezenta o mare dificultate pentru puterea de calcul a stațiilor de lucru, ori pentru plăcile grafice. În plus, dezvoltarea capacităților de a manipula norii denși de puncte direct în aplicațiile de tip GIS este încă, deși tot mai prezentă, o direcție pentru viitoare versiuni. De aceea, în multe situații, modelele tridimensionale interpolate se decimează<sup>14</sup>, se simplifică.

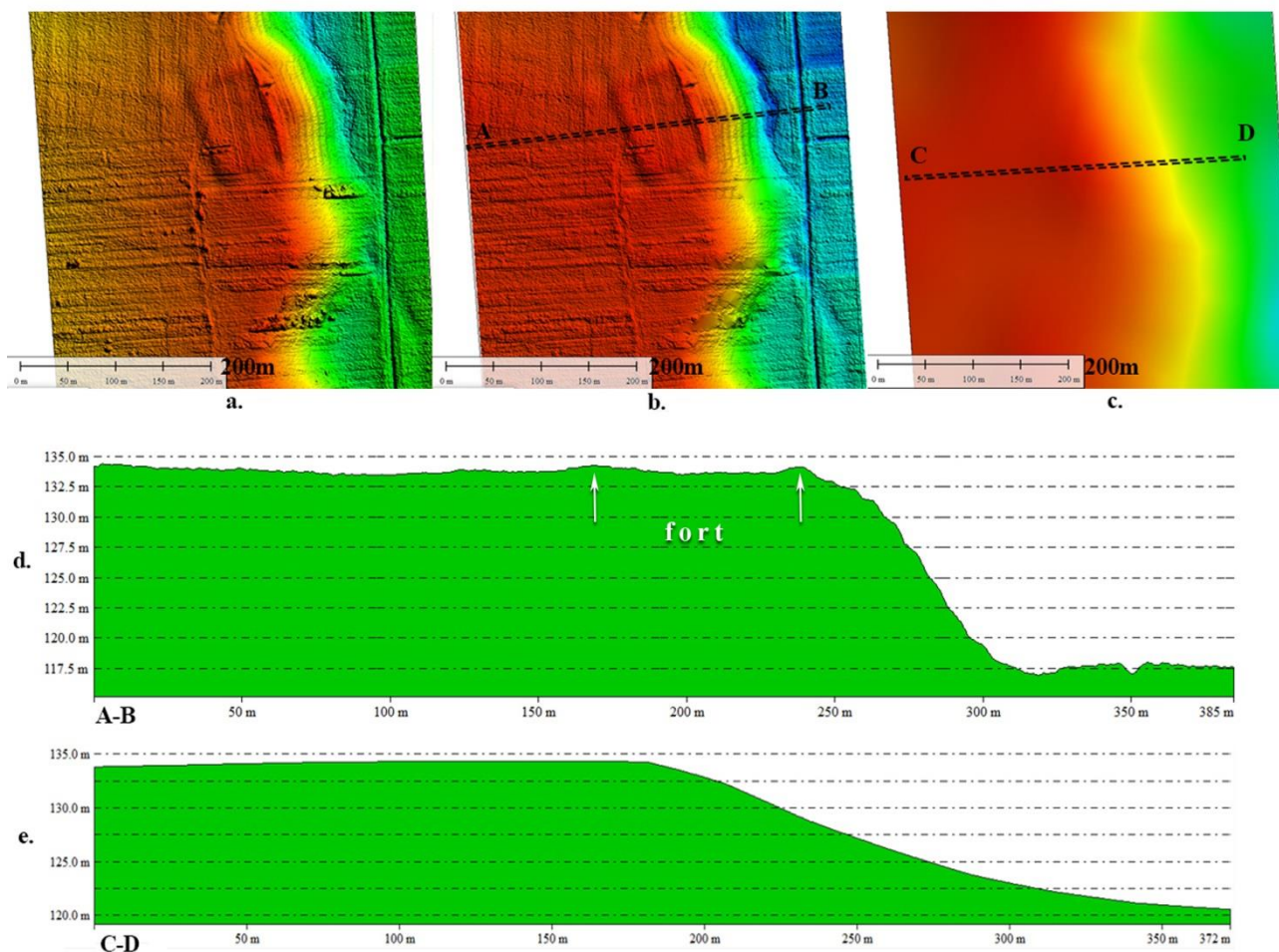


Figura 2. Comparație între calitatea modelelor digitale de teren: DEM Europa (rezoluție 30 m) și modelul digital al terenului obținut prin aplicarea algoritmilor specifici workflow-ului de tip SfM imaginilor achiziționate cu drone (rezoluție 0.25 m). Studiu de caz: fortul de la Crâmpoia: a. – DSM obținut în proiect; b. – un model de teren de tip bare-earth, obținut prin filtrarea vegetației din DSM; c. – DEM Europa; d. – profil altimetric AB în zona fortificației calculat pe modelul de teren obținut din dronă; e. – aceeași secțiune pe DEM Europa.

La fel ca în cazul rezultatelor obținute cu tehnologia LiDAR, modelele de teren obținute prin workflow de tip SfM sunt în primul rând de tip DSM (*digital surface model*), adică descriu suprafața terenului încorporând și nivelul vegetației și al clădirilor (Fig. 1.c și d)<sup>15</sup>. Norii de puncte pot fi codificați, filtrați, în funcție de diferiți

<sup>13</sup> Experiența autorilor arată că utilizarea unei calități medii pentru calculul norului dens de puncte este suficient de precisă pentru atingerea obiectivelor de rezoluție necesară în cercetarea arheologică. Deși densitatea finală a unui nor de puncte la calitate maximă ar fi de 4 ori mai mare decât cea la calitate medie, timpii foarte mari de prelucrare nu au justificat, în cazul dat, această opțiune.

<sup>14</sup> Este noțiune tehnică (decimare, presupunând însă o scădere consistentă a numărului de obiecte), nu vreo metaforă a autorilor (nota editorului).

<sup>15</sup> Cu toate acestea, penetrarea vegetației cu ajutorul LiDAR este mult mai eficientă decât în modelarea pe bază de imagini.

parametrii, astfel încât în anumite condiții se pot obține modele digitale de teren de tip *bare-earth* (fără vegetație) (Fig. 2.b). De exemplu, unul dintre parametrii care sunt evaluați pentru a clasifica norul de puncte este înclinația între puncte (diferența de altitudine) raportată la variația acesteia într-un spațiu dat.

O problemă distinctă o reprezintă procesul de georeferențiere. Așa cum am arătat, informațiile extrase din imagini sunt suficiente pentru a recompune tridimensional scena, dar produsul rezultat este reprezentat într-un sistem de coordonate arbitrar. Pentru a poziționa corect scena reconstruită este necesară adăugarea unor informații spațiale suplimentare. Există mai multe abordări posibile. De exemplu, atunci când camera foto este prevăzută cu receptor GPS, așa cum este cazul unora dintre camerele comerciale (de ex. Canon SX 260 sau Canon S100), poziția camerei este memorată în fișierul EXIF asociat fiecărei imagini. În cazul fotografiilor aeriene, este de preferat, pentru o precizie mult mai bună, ca în EXIF să fie injectate pozițiile GPS furnizate de sistemul senzorial al dronelor<sup>16</sup>. Prin aceasta, întregul proces primește o referință spațială aproximativă<sup>17</sup> care permite, în primul rând, scurtarea timpului de calcul a geometriei stațiilor de cameră.

O altă abordare presupune amplasarea unor repere fotogrametrice la sol (numite obișnuit „ținte”) și măsurarea precisă a coordonatelor acestora folosind receptoare GPS cu corecție dinamică (RTK cu ROMPOS) sau stații totale. Aceste informații urmează a fi încorporate în fluxul de lucru general. Aceasta este metoda cea mai precisă și, totodată, cea mai laborioasă.

Atunci când nu este posibilă amplasarea și măsurarea precisă a poziției unor repere fotogrametrice, poate fi folosită și metoda identificării de puncte comune între imagini aeriene și alte materiale cartografice (planuri, hărți, ortofotoplanuri Google Earth etc.). Pentru acest din urmă caz, precizia generală a referinței spațiale și chiar fidelitatea geometrică a modelului tridimensional vor fi mult mai reduse.

Implementarea practică a fluxului de lucru, de la stadiul defnirii temei și până la obținerea modelelor virtuale și a produselor asociate, necesită parcurgerea succesivă a unei serii de etape: alegerea și operarea platformei aeriene radiocomandate, alegerea și configurarea camerei și a subsistemului optic, stabilirea celei mai potrivite strategii de zbor și a modelelor de acoperire a terenului, alegerea soluției software. Prima etapă din acest flux, referitoare la utilizarea aeronavele fără pilot la bord în acest domeniu, a fost discutată pe larg în articolul precedent din prezentul volum. Celelalte etape fac urmează a fi discutate în cele ce urmează.

## Echipamentele foto testate

Documentarea fotografică a siturilor arheologice și înregistrarea de serii de imagini verticale și oblice în scopul prelucrării fotogrametrice constituie o componentă a procesului de explorare aeriană. Din acest motiv, alegerea echipamentelor foto, în special a senzorului și a sub-sistemului optic al acestora, este o etapă decisivă. Această selecție trebuie făcută nu doar în funcție de dimensiunea senzorului sau de calitatea lentilei, dar și de greutate – toate acestea raportate la rândul lor la obiectivul arheologic ce trebuie documentat aerian (formă, dimensiuni, acoperire cu vegetație). Alegerea soluției foto se bazează pe stabilirea celui mai bun compromis între: dimensiunea senzorului - rezoluție - lentilă (putere de separare, distorsiuni, diafragmă maximă) și greutatea ansamblului - raportată desigur la autonomia de zbor a platformei, condiționată la rândul ei de sarcina utilă maximă disponibilă. Altitudinea de zbor, dimensiunea și forma zonei de survol sunt alte ingrediente ale acestei opțiuni.

În condiții ideale, ar trebui utilizate obiective optice fixe, de tip normal sau *wide* (unde va în domeniul 35 – 50mm), cu distorsiuni lineare și, mai ales, nelinere cât mai bine controlate, necorectate electronic. În practică, utilizarea aeronavelor fără pilot la bord impune alegerea unei soluții optice diferite. În primul rând, altitudinea de la care sunt realizate imaginile aeriene trebuie redusă. Zborul la altitudine mare începe să fie

<sup>16</sup> Precizia receptoarelor GPS care asigură navigarea dronelor este mult mai bună (ultima generație de chip-uri GPS, filtre *low-noise* suplimentare, antene *micro-strip* cu suprafață mult mai mare, dispuse în poziții neobținute etc.). În plus, poziția furnizată de GPS este corectată de sistemul de calcul și control al zborului și navigației cu ajutorul datelor inerțiale furnizate de către celelalte componente ale sistemului senzorial intern: accelerometre, giroscop-triaxial, barometru, compas electronic.

<sup>17</sup> Precizia referinței spațiale inițiale este limitată la clasa de precizie GPS (3÷6 m pentru poziționarea în plan orizontal și 3÷15 m pentru elevații) și este sensibil mai bună atunci când sunt utilizate date din jurnalul de zbor al dronelor (0.5÷2 m pentru poziționarea în plan orizontal și 0.3÷1 m pentru elevații). O îmbunătățire majoră, respectiv precizie centimetrică, este așteptată prin utilizarea sistemelor GPS RTK (cu corecții ROMPOS) la bordul dronelor.

din ce în ce mai sever limitat prin norme legale și necesită un consum de energie suplimentar. O altitudine mai mică determină, în schimb reducerea suprafeței acoperite de o singură imagine sub limita optimă și, din acest motiv, este necesară utilizarea obiectivelor de tip *ultra-wide* (de exemplu, în domeniul distanțelor focale 20÷28mm). Din aceasta derivă două dezavantaje majore: erorile de perspectivă (vezi, de exemplu Fig. 4.a) și greutatea mare a acestor obiective (de exemplu obiectivul Zeiss Milvus 21mm f/2.8 ZF.2, în montură Canon sau Nikon, are o greutate de 755 gr!). Fiindcă erorile de perspectivă nu pot fi compensate în etapa de post-procesare, singura soluție este de a mări altitudinea de zbor deasupra suprafețelor împădurite sau a zonelor cu clădiri și structuri antropice înalte. Greutatea poate fi, însă, redusă (uneori considerabil) pe seama diminuării calității optice. Sunt posibile mai multe compromisuri. În primul rând este redusă dimensiunea senzorului camerei foto. În acest fel cercul imaginii este diminuat și greutatea subsistemului optic poate fi la rândul ei micșorată<sup>18</sup>. Un alt posibil compromis impune reducerea diafragmei maxime a obiectivului. În acest fel obiectivul este mai ușor (benefic), câmpul de profunzime este crescut (benefic), însă cantitatea de lumină care ajunge la senzor este diminuată (negativ). În final, sunt afectate puternic caracteristicile optice ale lentilei: cantitatea de lumină este redusă la periferia obiectivului (vignetare), rezoluția și puterea de separare sunt menținute doar în centrul lentilei (vezi, de exemplu Fig. 4.b și c) iar distorsiunile geometrice sunt considerabil crescute. Dar reducerea de greutate obținută prin aplicarea combinată a acestor măsuri este semnificativă. De exemplu, obiectivul Sony 16mm f/2.8 *pancake* pentru camere în format APSC are doar 70 g, în timp ce obiectivele pentru camere cu format mult mai mic (de exemplu formatul 1/2.3 inch) au doar câteva grame. Efectul advers al acestei abordări este calitatea slabă a ansamblului cameră + optică. Senzorii de dimensiuni mici sunt caracterizați de o sensibilitate scăzută (limitează utilizarea dimineața devreme sau în amurg, precum și în condiții cu plafon dens și jos de nori), adâncime de culoare scăzută (acuratețea cromatică este alterată) și dinamică redusă (limitează utilizarea în condiții de iluminare puternică). Distorsiunile lineare și nelineare sunt corectate (de fapt, mascate) electronic în majoritatea camerelor comerciale de ultimă generație, ceea ce introduce un nivel suplimentar de deformare geometrică care trebuie la rândul lui (re)compensat în timpul procesării fotogrametrice<sup>19</sup>.

Tabel 1. Comparație între caracteristicile principale ale camerelor foto testate

Camere foto <i>Mirrorless</i>		
Camera	Sony-NEX-5T	
Senzor:	24.3 mm x 15.6 mm, 16 Mpx	
Greutate	276 g	
Obiectiv	zoom, Sony: 24 mm (echiv. FF)	Fix, Sigma 28.5 mm (echiv. FF)
Greutate	116 g	140 g
Camere foto din clasa Compact		
Camera:	Canon PowerShot SX260HS	FC300S
Obiectiv	integrat: zoom: 25 mm (echiv. FF)	fix 20 mm (echiv. FF),
Senzor	6.17 mm x 4.55 mm, 12 Mpx	6.17 mm x 4.55 mm), 12 Mpx
Greutate	231 g	100 g

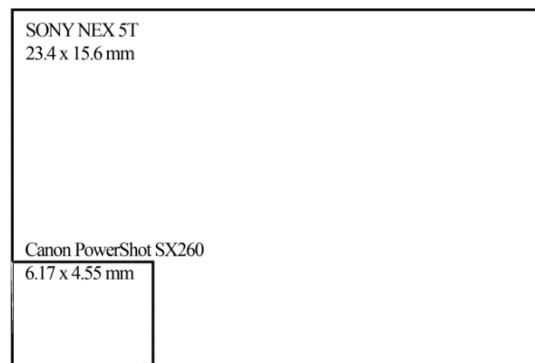


Figura 3. Comparație între dimensiunile senzorilor camerelor foto discutate.

<sup>18</sup> În acest caz trebuie ținut cont de factorul de micșorare a senzorului utilizat în raport cu un senzor standard *full frame*: 36 x 24 mm. De exemplu un senzor în format APSC (24 x 18 mm), are suprafața de 1.5 ori mai mică față de un senzor *full frame* (*crop factor* = 1.5). Din acest motiv, utilizarea unei lentile cu distanța focală  $f = 16$  mm pe o cameră cu senzor APSC are același efect optic ca o lentilă  $f = 24$  mm pe o cameră cu senzor *full frame* ( $16 \text{ mm} \times 1.5 = 24 \text{ mm}$ ).

<sup>19</sup> Contrar recomandărilor din manualele aplicațiilor integrate, tehnica SfM + MVS este, de fapt, foarte robustă, acceptând imagini caracterizate de un înalt grad de imprecizie optică. Cu toate acestea, există o masă critică de compromisuri pe care sistemul o poate gestiona. Dincolo de acest punct, modelele nu mai pot fi calculate sau au erori prea mari.



În proiectul *Limes Transalutanus* am testat mai multe camere foto, cu obiective fixe sau interschimbabile (Tabelul 1 și Fig. 3.). În final, pentru realizarea studiilor de caz, am ales trei camere foto. Două dintre acestea sunt din clasa compactă<sup>20</sup>, cu senzor mic (diagonala 1/2.3 inch, dimensiuni 6.17 x 4.55 mm). Acestea sunt Canon PowerShot SX260, respectiv, camera FC300S cu care vine echipată drona DJI Phantom seria 3. Ce-a de a treia cameră este de tip *mirrorless*<sup>21</sup>, de tip Sony NEX-5T, cu un senzor de 23.4 x 15.6 mm. Aceasta din urmă a fost folosită împreună cu două lentile: un obiectiv zoom Sony (16÷50 mm, f/3.5-5.6) folosit doar la  $f = 16$  mm (echivalent cu  $f = 24$  mm în format FF) și o lentilă fixă Sigma 19 mm, f/2.8 (echivalent  $f = 28.5$  mm FF). În proiect nu am folosit camere de tip DSLR, datorită greutății suplimentare pe care o presupune existența vizorului optic cu penta-prismă sau cu oglindă, facilitate care nu are nici o utilizare pentru fotografia aeriană.

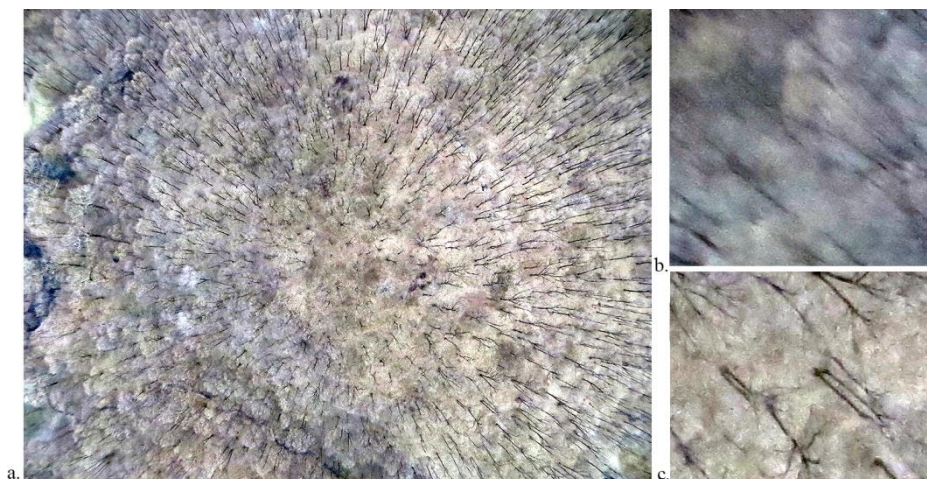


Figura 4.a. Exemplu de imagine verticală înregistrată cu camera Canon PowerShot SX260. Tiparul de distribuție al copacilor pune în evidență distorsiunile de perspectivă specifice obiectivelor ultra-wide. Detaliile, culorile, puterea de rezoluție sunt considerabil diminuate pe margini (b), față de centru (c).

Camera Sony Nex 5T s-a dovedit o soluție foarte bună, având un senzor relativ mare (de tip APS-C, *crop factor* 1.5) cu gamă dinamică mare, la cele 276 g pentru body fiind, practic, una dintre cele mai ușoare camere *mirrorless*, și considerabil mai ușoară față de o cameră DSLR cu același tip de senzor.

O comparație a modelelor geometrice determinate automat<sup>22</sup> în timpul procedurii de identificare a punctelor comune din fotografii, pentru lentilele folosite, ilustrează atât tipul de distorsiuni, dar și gradul de corecție aplicat electronic (Fig. 5). Dintre distorsiunile apărute în aceste fotografii, cele mai relevante sunt cele radiale, dar și pierderea rezoluției, puterii de separare ori culorilor în zonele marginale (de exemplu în colțurile fotografiilor, respectiv comparația imaginilor de la Fig. 4.b și c). Calitatea și cantitatea informației din imagini se reflectă, desigur, în calitatea finală a secvenței de imagini aeriene (mozaic de imagini/ortofotoplan. Pentru a obține rezultate bune este necesară asigurarea unui grad suficient de acoperire/suprapunere între fotografiile, pentru ca informația relevantă în descrierea zonei de interes să nu fie extrasă din extremitățile imaginilor.

### Strategii de organizare a misiunilor aeriene

În proiectul *Limes Transalutanus*, caracterul liniar și dimensiunile mari ale sitului au impus o atenție sporită în partea de planificare a zborului. Prima etapă a stabilirii strategiei de zbor constă în selectarea punctelor de decolare în funcție de accesul pe sit. Au fost căutate acele puncte care au permis accesul cu mașini de teren, situate cât mai aproape de centrul zonei de survol; în cazul obiectivelor de tip coridor, au fost preferate puncte din care, teoretic, se pot executa misiuni în două direcții diferite, în lungul graniței romane, pentru a lărgi suprafețele documentate. Accesul pe sit, în mijlocul zonelor agricole, în special în timpul sezonelor

<sup>20</sup> Camerele din clasa compactă au obiectivul integrat, nefiind posibilă schimbarea acestuia.

<sup>21</sup> Camerele din clasa *mirrorless* au obiective interschimbabile, dar nu au vizor optic, fiind, din acest motiv, mai ușoare.

<sup>22</sup> Realizată în aceste cazuri cu aplicația Agisoft Photoscan. Aceste modele variază pentru aceeași soluție tehnică în funcție de numărul și tipul imaginilor folosite pentru identificarea punctelor comune. Ele se pot salva și refolosi în proiecte ulterioare.

umede, a fost, nu de puține ori, foarte dificil, iar aceasta pentru că sezonul cel mai bun pentru colectarea imaginilor este martie, cu un nivel foarte scăzut de vegetație și fără frunze în copaci, însă în aceeași lună terenul este încă îmbibat de precipitațiile de peste iarnă.

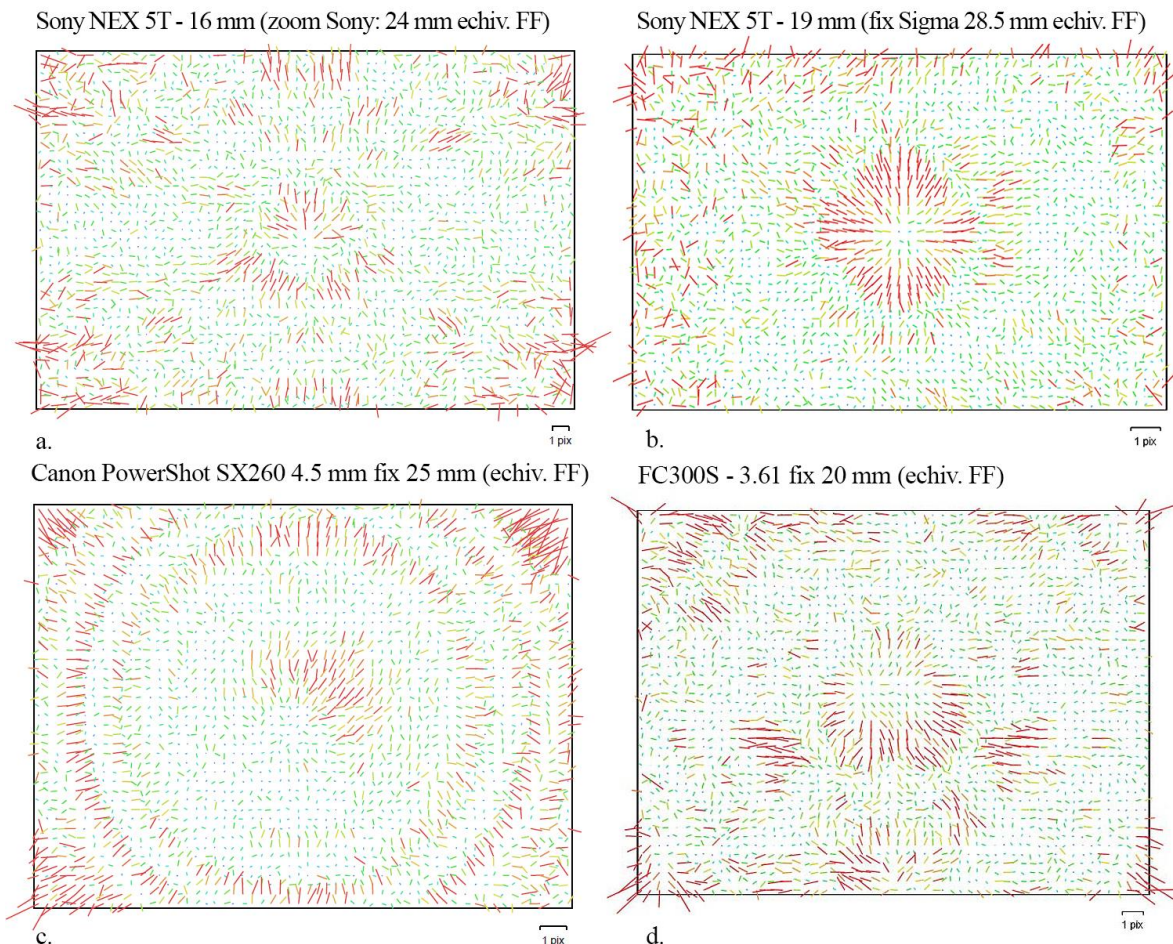


Figura 5. Exemple de reconstrucții de modele geometrice interne și de evidențiere a distorsiunilor lentilelor folosite în proiect, calculate automat prin workflow de tip SfM cu ajutorul Agisoft Photoscan

Alegerea tipului de zbor (programat, liber sau secondat de navigator) a fost stabilită în funcție de forma obiectivului de survolat (linear sau punctual), de tipul de relief, dar și de gradul de cunoaștere a terenului și de vizibilitate a țințelor. Primele experimente au evidențiat legătura strânsă dintre strategia de organizare a zborului și rezultatele finale, obținute după etapa de prelucrare fotogrametrică. Astfel, este nevoie să se asigure un anumit grad de suprapunere între fotografii. În plus, secvența de fotografii verticale trebuie completată cu fotografii oblice de tipul *low-oblique*, pentru a îmbunătăți precizia modelului calculat, dar și de fotografii *high-oblique*, pentru detectarea directă a structurilor de interes arheologic. Fotografiile oblice pot fi realizate în timpul aceleiași misiuni (oprind drona și reorientând camera) sau în misiuni diferite, succesive. Sarcina utilă maximă a echipamentelor de zbor, greutatea camerei foto folosite, distanța focală a lentilei, condiționează, de asemenea, organizarea misiunii, toate afectând, într-un fel sau altul, altitudinea necesară de captare a imaginii și autonomia de zbor.

Cu toate că, într-o etapă de debut, am însoțit experimente de explorare aeriană cu măsurători cu stația totală ale unor elemente topografice vizibile în fotografii (mai ales pentru a înregistra corect variațiile destul de mici de altitudine din zonele de câmpie), am observat că metoda nu este eficientă. Dificultățile pătrunderii efective în teren, cu pasul și cu echipamente grele, scad înzecit randamentul în raport cu viteza de acoperire aeriană. În plus, aceasta ar fi cu adevărat utilă dacă punctele măsurate ar fi distribuite uniform pe toată suprafața survolată, nu doar în centru, în jurul zonei de decolare. Același lucru este valabil, în mare măsură, și pentru achiziționarea reperelor cu receptoare GPS cu corecții dinamice prin rețeaua ROMPOS. Chiar dacă, în acest din urmă caz, viteza și flexibilitatea sunt mai ridicate, rămâne nerezolvată problema acoperirii reale a



terenului, în condiții de acces dificil. Pentru situri concentrate metoda georeferențierii modelelor prin reperi amplasate la sol, măsurate cu receptoare GPS cu RTK, rămâne cea mai bună și eficientă soluție. Pentru studiile de caz realizate în sectorul sudic al *Limes Transalutanus*, a fost considerată suficient de precisă metoda injectării datelor spațiale (furnizate de receptorul GPS și sistemul senzorial al dronei) în EXIF-ul imaginilor și utilizarea acestor informații pentru georeferențierea modelelor și a ortofotografiilor.

În strânsă legătură cu planificarea misiunilor aeriene, trebuie menționată importanța alegerii anotimpului, atunci când este posibil. În cazul discutat, majoritatea misiunilor au fost realizate la începutul primăverii pentru a ușura filtrarea vegetației din modelele digitale ale terenului.

### Modele de parcurgere în zbor a terenului

Formula de maximă eficiență în zbor, în cazul misiunilor de tip coridor, este parcurgerea unui singur traseu dus-întors: o pereche de linii paralele cu valul roman sau cu alte cunoscute ori presupuse anomalii lineare. Lungimea optimă a acestui traseu linear a fost de 1.5 km (în medie), cu cele două traverse ce compun traseul distanțate la 200 m, parcurse la dus cu fața, la întors cu spatele, de la o altitudine în intervalul 200-300 m (cel mai uzual la 215 m). Valul/obiectivul principal al documentării este de preferat să se afle între cele două trasee. Înregistrarea fotografiei se face, în acest caz, automat, cu un grad de acoperire în lungul traseului de 80% și lateral de 60%. Pentru obținerea ortofotografiei, acest mod de zbor poate fi considerat minimal, dar suficient.

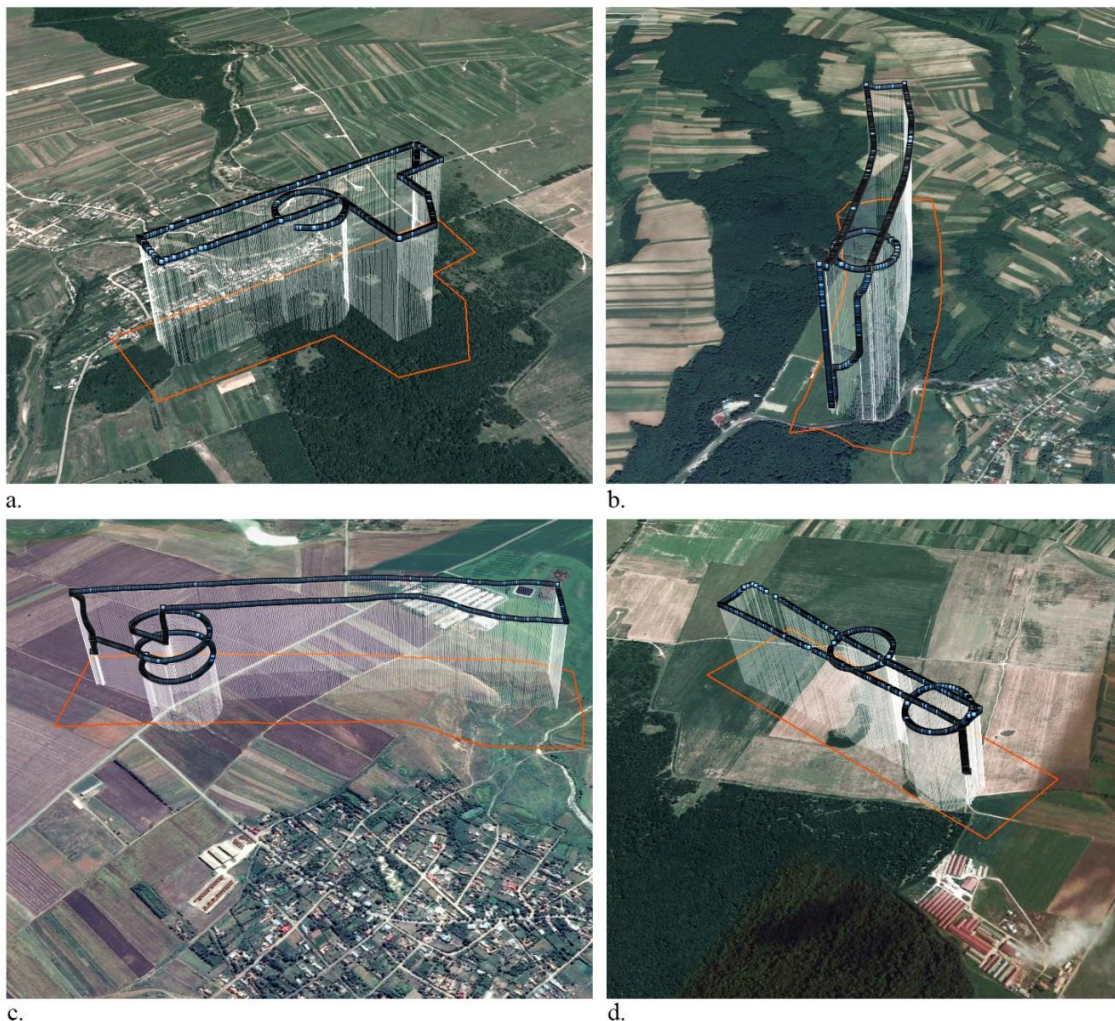


Figura 4. Exemple de modele de parcurgere a terenului în formula minimală bazată pe parcurgerea unui traseu dus-întors și executarea unui cerc (sau mai multe) pentru fotografii oblice.



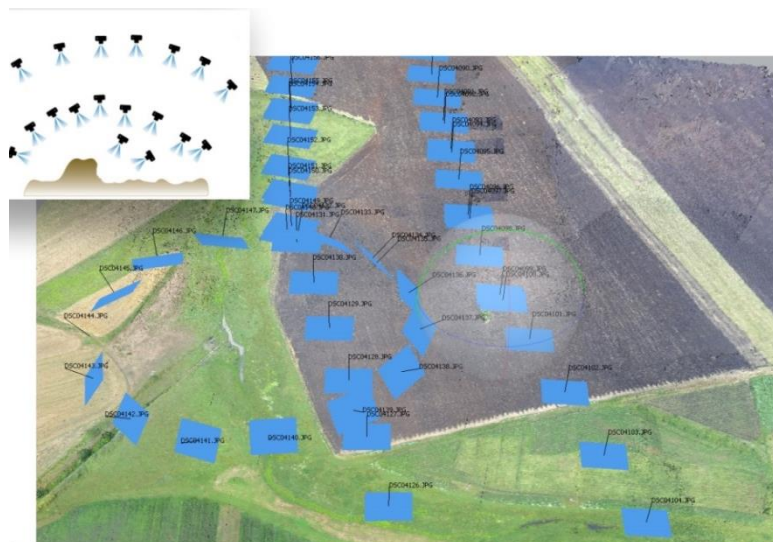


Figura 5. Cu cât se folosesc imagini înregistrate din mai multe unghiuri/poziții (surprinzând obiectul/terenul de la diferite distanțe, mai apropiate sau mai depărtate) cu atât rezultatele finale sunt mai corecte. În cazul aplicațiilor de arheologie aeriană, imaginile oblice cu unghi mic (în care nu se vede orizontul) au rolul de a îmbunătăți etapa de stabilire automată a parametrilor optici ai camerei și de a furniza detalii spațiale pentru suprafețe înclinate.

Pentru a obține rezultate mai coerente în modelul digital al terenului sunt necesare și imagini oblice (de tipul *low-oblique*). Soluția cea mai simplă constă în realizarea în capătul traseului de zbor (acolo unde se execută întoarcerea) a unui cerc de pe care să se înregistreze fotografiile oblice. Orientarea manuală a camerei va asigura în acel moment și achiziția de imagine oblică de tipul *high-oblique*, utilă pentru detectarea de structuri arheologice. Totuși, imaginile de tip *low-oblique* obținute doar de pe un singur cerc realizat chiar în capătul zonei fotografiate pot să nu fie întotdeauna suficient de relevante în calculul modelului digital al terenului, fiind nevoie de poze oblice intermediare și de pe parcursul liniar. Pentru achiziția de imagini oblice poate fi folosită și secvența de decolare (de exemplu, pentru *low-oblique*) și aterizare (*high-oblique*) (Fig. 4; Fig. 5).

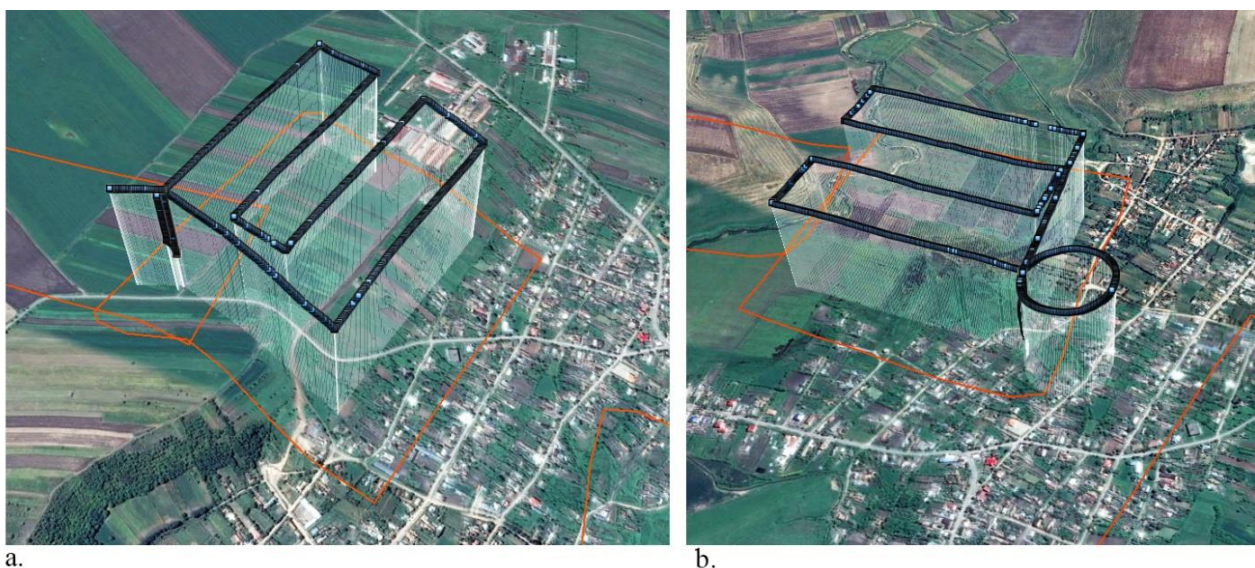


Figura 6. Rezultatele cele mai bune s-au obținut atunci când au existat 4 trasee paralele și cel puțin un set de imagini oblice.

Pentru a minimiza erorile de calcul ale modelelor digitale ale terenului, și în special, pentru a elimina efectul de tip dom (Fig. 8), este necesară asigurarea unei suprapuneri mai bune a imaginilor. Din acest motiv, chiar și pentru structuri de tip coridor, este recomandată utilizarea unui model de acoperire a terenului compus din patru traverse, două pe sensul de dus și două pe sensul de întoarcere (Fig. 6, Fig. 7)<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> E curios că, deși am acumulat foarte multă experiență practică, continuăm să exprimăm situații ideale. Este opțiunea autorilor, pe care editorul o respectă. Nu am însă cum să nu comentez că zborul în patru traverse ar fi înjumătățit zona de acoperire, chiar dacă ar fi îmbunătățit precizia modelului teren, contrazicând astfel obiectivele primei faze de

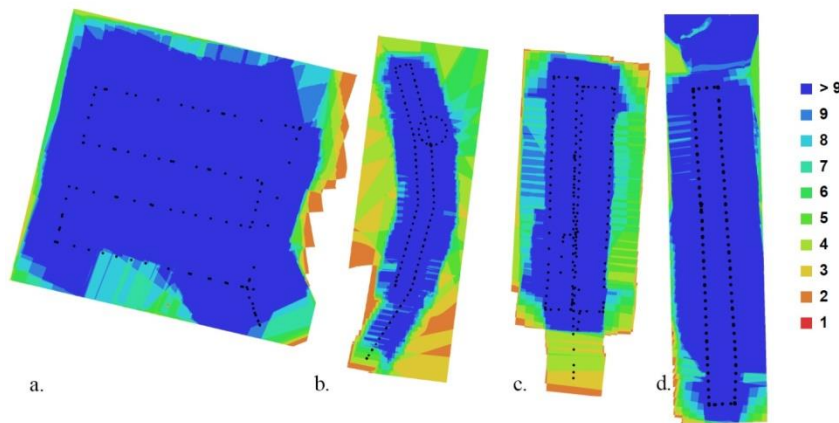


Figura 7. Gradul de suprapunere între fotografii: a. rezultate foarte bune, inclusiv pe margini, atunci când se execută patru trasee paralele pe distanțe scurte; b. interpolarea datelor pe un traseu ușor curb poate produce distorsiuni considerabile pe exteriorul traseului principal; c. rezultate suficient de bune, inclusiv pe margini la zborul pe 4 trasee paralele; d. misiunea „liniară tipică”, cu două trasee paralele.

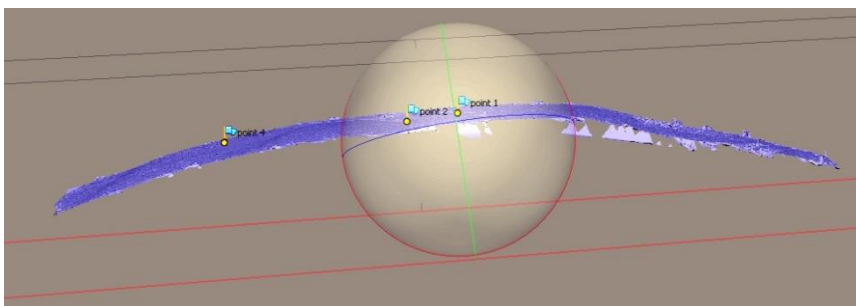


Figura 8. O suprafață interpolată de tip mesh vizualizată în perspectivă pentru punerea în evidență a efectului de dom - curbarea spre margini a suprafețelor, efect des întâlnit mai ales în cazul unor situri de tip coridor, cu variații mici ale elevațiilor.

## Implementări și soluții software

Dezvoltarea recentă a soluțiilor de modelare și reconstrucție virtuală a structurilor pe baza imaginilor a fost realizată de numeroși cercetători, prin lucrări independente, dedicate, cel mai adesea, definirii și optimizării unor etape punctuale și, mult mai rar, ansamblului. Din acest motiv, primele soluții practice au fost posibile prin utilizarea a numeroase module și mici aplicații software individuale, care trebuiau parametrizate separat și, în final, făcute să funcționeze împreună. Mai comodă pentru utilizatori fără cunoștințe tehnice avansate este utilizarea unor platforme software care grupează la un loc doar unele sau chiar toate componente din fluxul de prelucrare.

Pentru prelucrarea imaginilor aeriene, în proiectul *Limes Transalutanus* au fost folosite două soluții informatice. Prima dintre acestea, denumită VisualSfM<sup>24</sup>, automatizează toată partea de început a procesului: detectarea punctelor de legătură pe baza invarianței (metoda SIFT) și calcularea norului rar de puncte (metoda *bundle adjustment*). Pentru calculul norului dens de puncte (*dense cloud*), utilizatorul trebuie să încorporeze, în procesul de *set-up*, un modul separat de calcul (prin metoda MVS). Pentru aceasta, autorii au folosit aplicația software CMVS/PMVS2<sup>25</sup> dezvoltată de către Yasutaka Furukawa. În final norul dens de puncte trebuie transformat în suprafață și texturat. Pentru aceasta, autorii au folosit cu succes MeshLab<sup>26</sup>, SURE<sup>27</sup> sau chiar GlobalMapper.

execuție a proiectului. Pentru situații în care nu explorarea, ci precizia este scopul fundamental al misiunii, nu am nici un dubiu asupra faptului că autorii au dreptate (nota editorului).

<sup>24</sup> Această aplicație software a fost dezvoltată de către Changchang Wu și este gratuită pentru uzul personal, non-profit și academic.

<sup>25</sup> CMVS – Cluster Multi View Stereo; PMVS – Patch-based Multi-View Stereo

<sup>26</sup> Aplicație software *open source* foarte populară pentru generarea și editarea suprafețelor 3D.

<sup>27</sup> SURE - Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. Vezi Rothermel et al. 2012.



Ce-a de a doua soluție informatică utilizată a fost suita Agisoft Photoscan. Aceasta este o aplicație software comercială ce integrează tot fluxul de prelucrare a datelor, pornind de la seturile de imagini și până la exportarea modelelor digitale și a texturilor în diverse formate. Parcurgerea fluxului de prelucrare poate fi făcută, în Agisoft Photoscan, pas cu pas sau, pe baza unui script complet automatizat (*batch processing*)<sup>28</sup>.

O comparație între cele două soluții de procesare a imaginilor arată că o aplicație integrată, așa cum este Agisoft Photoscan oferă, în primul rând, comoditate în utilizare. Capacitatea de gestionare a proiectelor mari și viteza de prelucrare a datelor sunt foarte bune, dar calitatea platformei hardware este esențială. Aplicația folosește intens nu doar procesul și memoria, dar și procesul/procesoarele grafice. Din acest motiv, este recomandată utilizarea celor mai puternice stații grafice disponibile. Pentru reducerea costurilor, poate fi luată în calcul utilizarea unor platforme proiectate pentru jocuri (*gaming*). Flexibilitatea și posibilitățile de parametrizare pot fi considerate bune, acoperind cele mai multe dintre necesitățile de bază și numeroase alte opțiuni exotice. De exemplu, suprafețele generate pot fi optimizate prin reducerea („decimarea”) și, în final, egalizarea numărului de noduri și de fețe. Chiar mai mult, este posibil exportul suprafețelor pentru a fi finisate și retușate suplimentar în alte aplicații de grafică computerizată, Agisoft Photoscan acceptând reimportul suprafețelor corectate și utilizarea acestora ca bază pentru texturare (și generare ortofotografie). Există totuși o limită a flexibilității disponibilă în AgiSoft Photoscan, de exemplu, o importantă limitare o constituie lipsa controlului total în procesul de texturare, aplicația alegând automat zonele din imagini care urmează a fi asamblate în textura (sau ortofotografia) finală. Pentru aplicații speciale, aflate în avangarda cercetării<sup>29</sup>, sau pentru prelucrarea imaginilor înregistrate în condiții dificile (sau alterate ulterior înregistrării), utilizarea unei soluții total integrate ar putea să nu mai constituie o cale de recomandat.

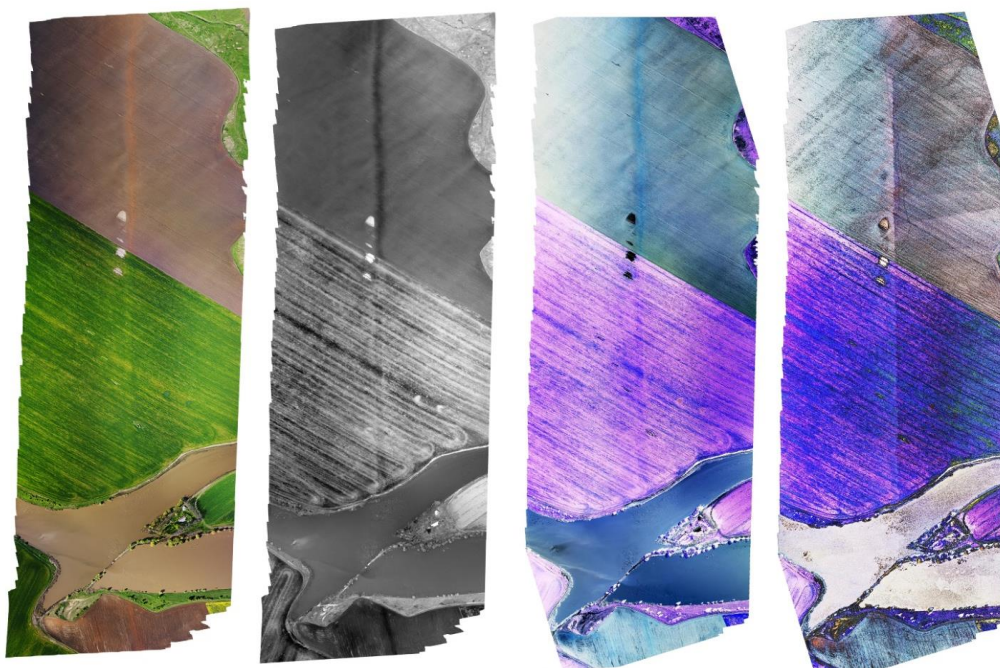


Figura 9. Exemple de prelucrări standard pentru ortofotografii: a. contrast sporit; b – black & whites; c – spectru cromatic inversat; d - line enhancement.

<sup>28</sup> Pentru a rămâne în spiritul căutării eficienței, numărul de fotografii (grupate într-un *batch*/grup) folosite la rularea unei operațiuni (un singur proiect poate suporta utilizarea mai multor astfel de grupuri) nu este recomandat să fie foarte extins, consistența soluției atingându-se și cu un set minim care în cazul nostru s-a dovedit a fi între 90 și 120 de imagini pentru un segment de 1,5 km x 450 m, survolat într-o singură misiune, prin două trasee paralele. Imaginile mari ori foarte complexe lungesc timpurile de procesare, care și așa sunt de ordinul orelor (2-4 ore pentru un proiect bazat pe 90-200 imagini rezultat din una sau două misiuni alăturate). Zborurile la altitudini mai joase și gradul crescut de suprapunere între imagini (un *base-line* strâns) sunt condițiile de bază pentru asigurarea rezoluției necesare.

<sup>29</sup> Un astfel de caz poate fi considerat proiectul desfășurat cu câțiva ani în urmă, prim metode fotogrametrice clasice, în peștera de la Nuciu (Ștefan M., Ștefan D., 2012). Pentru a pune în evidență totalitatea reprezentărilor preistorice gravate pe pereții peșterii, a fost nevoie de utilizarea în paralel a mai multor texturi ale aceleiași scene achiziționate în condiții de iluminare diferită

Utilizarea unei soluții modulare, sau parțial modulare, așa cum este ansamblul format din VisualSfM și PMVS2, are avantajul costurilor reduse și accesului la codul sursă prin licențe *open source*, pentru unele dintre module, mai important fiind cel al flexibilității necesare pentru aplicații speciale și/sau dificile. De exemplu, așa cum a fost deja arătat, o problemă specifică modelării zonelor împădurite și, mai ales, terenurilor agricole, o constituie monotonia detaliilor. O soluție modulară poate încorpora mult mai ușor module noi, dezvoltate de către cercetători independenți, care pot corecta sau elimina probleme particulare. De exemplu, pentru cazul specificat, poate fi utilizat un modul ce implementează un algoritm de dezambiguizare<sup>30</sup>. Dezavantajul principal al acestei abordări este dat de dificultatea de configurare inițială și de nivelul înalt de pregătire tehnică necesar pentru utilizare.

Modelele digitale și ortofotografiile realizate prin modelare fotogrametrică urmează a fi utilizate ca suport informațional spațial pentru numeroase analize specifice, mai ales, domeniului arheologiei peisajului. De multe ori, este necesară prelucrarea suplimentară a acestor produse, cu ajutorul a numeroase alte aplicații informatice din domeniul graficii computerizate și GIS (Fig. 9).

### Concluzii și recomandări generale

Noua generație de abordări fotogrametrice și soluții software reunite sub conceptele SfM și MVS constituie metode suficient de precise, robuste și ușor de aplicat pentru modelarea și reconstrucția tridimensională a structurilor arheologice. Avantajele generale ale acestei metodologii sunt cu atât mai evidente atunci când datele și imaginile utilizate sunt înregistrate cu ajutorul noii generații de aeronave portabile fără pilot la bord. Este de așteptat ca efectele aplicării combinate de noi concepte teoretice, platforme aeriene, și aplicații software puternice și ușor de utilizat să genereze o nouă revoluție în practica cercetării, protejării și valorificării patrimoniului arheologic.

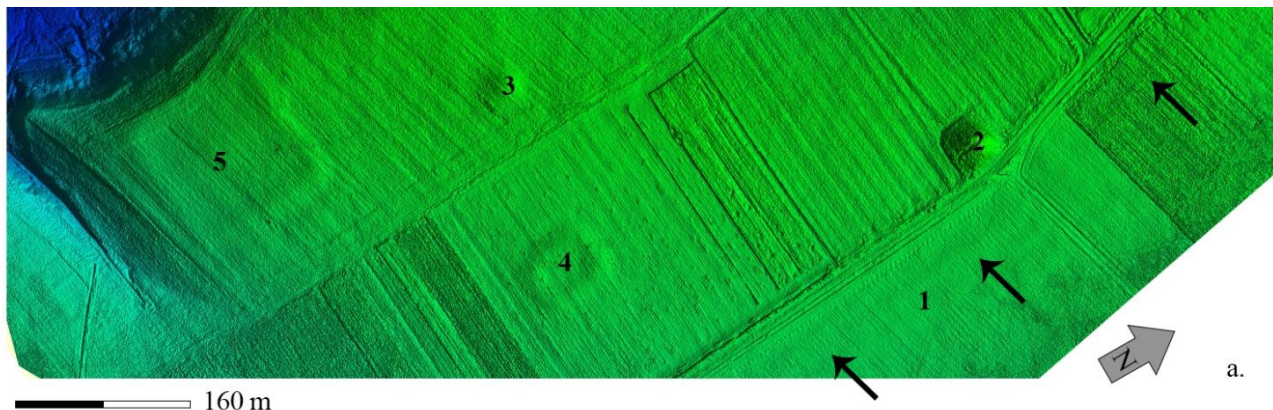


Figura 10. Exemplu de peisaj arheologic complex documentat printr-un DSM de mare rezoluție.  
Studiu de caz Băneasa, jud. Teleorman: 1 – traseul valului; 2 – tumul (Movila Băneasa),  
3 – tumul, 4 – fortul mic, 5 – fortul mare.

Pentru situl arheologic cercetat, respectiv sectorul sudic al *Limes Transalutanus*, modelarea și reconstrucția tridimensională a structurilor arheologice a reprezentat, alături de explorarea geofizică de mare randament, o etapă esențială pentru definirea și integrarea în peisaj a sitului, atât la nivel macro, cât și la nivelul componentelor sale majore (trasee fortificate, drumuri, forturi, turnuri, alte amenajări – vezi, de exemplu, peisajul arheologic din zona Băneasa, jud. Teleorman, la Fig. 10).

Având în vedere strânsa legătură dintre componentele hardware (echipamente aeriene, camere foto etc.) și software, considerăm că o evaluare generală nu poate fi realizată separat, fiind mai utilă o analiză a ansamblului. În prezent, nu este disponibil încă un flux de lucru optimizat și integrat. Din acest motiv, etapele procesului de lucru sunt distincte și trebuie alese și reglate separat. Echipamentele de zbor utilizate profesional sunt, în general, optimizate pentru filmări aeriene și, din acest motiv, sunt grele, ineficiente și periculoase. Pe de altă parte, dronele pentru publicul larg sunt portabile și ușor de folosit, dar nu au facilități

<sup>30</sup> Wilson, Snavely 2013.

suficient de avansate de executare a misiunilor autonome la distanțe suficient de mari, în timp ce camerele foto integrate ori posibil a fi atașate pe acestea sunt caracterizate de prea multe compromisuri ce afectează calitatea imaginilor înregistrate. Cele mai potrivite echipamente disponibile comercial sunt cele – relativ puține la număr – proiectate pentru activități topo-cadastrale. Cu toate acestea, clasa de precizie, prea ridicată față de necesarul celor mai multe aplicații pentru arheologie, încadrează echipamentele pentru aplicații topo-cadastrale în clasa sistemelor (din nou) grele și scumpe. Soluția cea mai potrivită rămâne, pentru moment<sup>31</sup>, proiectarea și construcția, în regim propriu, a unor sisteme multicopter, adaptate pentru fiecare clasă de proiecte arheologice în parte. O altă componentă care trebuie aleasă cu multă grijă este camera foto și subsistemul optic al acesteia. Așa cum a fost arătat în secțiunea dedicată acestui subiect, legile opticii determină necesitatea unui compromis dificil, între calitate și greutatea echipamentului. Utilizarea camerelor și opticii fotogrametrice, așa cum sunt cele utilizate pentru aplicațiile profesionale de teledetecție din aeronave cu pilot, este exclusă în domeniul aeronavelor fără pilot. Din acest motiv, se folosesc camere foto comerciale. O analiză dificilă urmează să stabilească cel mai potrivit compromis care încă asigură calitatea necesară tipului particular de aplicație arheologică, în condițiile celei mai reduse greutate și a ansamblului cameră foto + obiectiv. Un impact special asupra calității rezultatelor finale este dat de strategia de zbor. Există mai multe modelele de acoperire a terenului, în special prin misiuni autonome. Optimizarea acestora este în strânsă legătură, pe de o parte, cu suprafața și forma suprafeței explorate aerian și, pe de altă parte, cu rezoluția necesară a modelelor finale. Odată înregistrate și disponibile individual, sau sub formă de serii (mozaic), imaginile aeriene verticale și oblice urmează să fi prelucrate în vederea obținerii de modele tridimensionale și texturi ale terenului explorat și a structurilor arheologice, reliefate ca (micro)anomalii în cadrul acestor modele. În acest domeniu asistăm la o revoluție, prin elaborarea și perfecționarea algoritmilor SfM și MVS, dezvoltarea conceptelor și formelor de implementare în domeniul patrimoniului arheologic a metodei de calculare a *structurilor din mișcare* fiind expuse în prezentul studiu. Cu toate acestea, procesul de prelucrare a datelor este unul complex, fiind, la rândul lui, compus din mai multe componente. Așa cum am văzut, aceste componente pot fi disponibile sub forma a numeroase aplicații software individuale (care trebuie parametrizate și făcute să funcționeze împreună), platforme care grupează la un loc doar unele dintre componente din fluxul de prelucrare (vezi de exemplu Visual SfM) sau soluții software cvasi-complete (cele mai cunoscute dintre acestea fiind AGI Photoscan și Pix4D). Și în acest caz, alegerea este condiționată de tipul de cercetare ori de aplicație din domeniul arheologiei avută în vedere. Pentru cercetări în care este necesar un volum mare de date și modele spațiale, acestea având un caracter unitar și repetitiv, este preferată utilizarea unei soluții integrate. Pentru investigații complexe, acolo unde atât datele și modelele spațiale cât și metoda de obținere a acestora constituie provocări distincte, este de preferat o abordare modulară, în care posibilitatea de parametrizare este maximă iar accesul la codul sursă este garantat (în cadrul licențelor de tip *open source*).

Având în vedere evoluția foarte rapidă și interesul special asupra acestui domeniu, este posibil ca numeroase soluții unitare, ușor de utilizat și cu costuri scăzute, să fie disponibile într-un timp foarte scurt. Rămâne de văzut cât de aproape vor fi aceste potențiale noi soluții de necesitățile particulare, specifice cercetării, protejării și valorificării patrimoniului arheologic.

## Referințe

- Berger, M., Tagliasacchi, A., Seversky L., Alliez P., Levine J., Sharf A., Silva C., 2014 – State of the Art in Surface Reconstruction from Point Clouds, *Eurographics - State of the Art Reports*, 2014, Strasbourg, France, 1 (1), 161-185 .
- Lowe, David G. 2004 – Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2), 91-110.
- Remondino, F., Fraser, C. 2006 – Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, 36(5), 266-272.
- Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Mena, F., Nex, F., 2014 – State of the art in high density image matching, *The Photogrammetric Record*, 2014, 29, 144–166.
- Rothermel, M., Wenzel, K., Fritsch, D., Haala, N. 2012 – SURE: Photogrammetric surface reconstruction from imagery, *Proceedings LC3D Workshop*, Berlin (Vol. 8).

<sup>31</sup> Așa cum a fost arătat în studiul din capitoul anterior, în prezentul volum.



- Saxena, A., Sun, M., Ng, A.Y., 2008 - Make3D: Learning 3D Scene Structure from a Single Still Image, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, no. 5, 824-840
- Spetsakis, M.E., Aloimonos, J., 1990 – Structure from motion using line correspondences, *International Journal of Computer Vision*, 1990, 4 (3), 171-183.
- Ștefan, M.M., Ștefan, D. 2012 - The Digital Survey of the „Fundu Peșterii” Rock Art Monument. A Challenge, în V. Sîrbu, S. Matei (ed.), *Un monument din Carpații Orientali cu reprezentări din Preistorie și Evul Mediu – Nucul “Fundu Peșterii”*, Județul Buzău, Ed. Istros, Brăila-Buzău, 2012, 19-43.
- Triggs, B., McLauchlan, P.F., Hartley, R.I., Fitzgibbon A.W., 2000 – Bundle Adjustment - A Modern Synthesis, *Vision algorithms: theory and practice*. Springer Berlin Heidelberg, 298-372.
- Tsai, Roger Y. 1992 – A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, în L. B. Wolff, S. A. Shafer, and G. Healey, (eds.), *Radiometry, Inc.*, Jones and Bartlett Publishers, 221–244.
- Wilson, K., Snavley, N., 2013 – Network Principles for SfM: Disambiguating Repeated Structures with Local Context, in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision* (link verificat la 4 iulie 2016: [http://www.cs.cornell.edu/projects/disambig/files/disambig\\_iccv2013.pdf](http://www.cs.cornell.edu/projects/disambig/files/disambig_iccv2013.pdf)).
- Zhang, S., Qu, X., Ma, S., Yang, Z., Kong, L., 2012 – A Dense Stereo Matching Algorithm based on Triangulation, *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(1), 283-292.



*Valea Mocanului, vedere oblică spre sud.*