

Lis Termis Romanis e la Basiliche Patriarcjâl di Aquilee studiadis midiant lis modernis technichis di rilevament e di rappresentazion

DOMENICO VISINTINI*

Ristret. L'articul al trate dal studi des Termis Romanis e de Basiliche Patriarcjâl di Aquilee midiant lis modernis technichis di rilevament integrât laser scanning/fotogrametric e di rappresentazion.

Come *Introduzion* preliminar, e ven juste ricuadade in struc la grandiose storie di Aquilee, cussì come chê des Grandis Termis Romanis, che in di di vuê a son une largje aree di sgjâfs archeologjics, e de Basiliche Patriarcjâl, un dai plui impuartants monuments de architecture romaniche italiane.

Intal cjapitul daûr *Materiâl e metodis* si conte, dopo vê spiegât il funzionament dal laser scanning, des difarentis fasis operativis che a permetin di acuisî automaticamentri nûi independents di milions di ponts 3D, di trasformâ chescj intune sole superficie 3D vistude a colôrs e gjeo-referenziade, e di rapresentâle in maniere formidabile in tancj difarents vistîts digjitâls.

Intal cjapitul *Risultâts*, e ven mostrade la aplicazion pratiche di rilevament e di rappresentazion ai doi lûcs aquileiês, rimarcant la complete automazion de acuisizion dai dâts in cjamp e la impressionalitât des elaborazions dai dâts e des rappresentazions digjitâls fatis traviars software dedicâts.

Come *Discussion* finâl, e ven comentade e proietade la esperience provade pai câs di Aquilee, concentrant plui di dut la atenzion sul pont-clâf dal nivel di automazion puartât fûr intes elaborazions dai dâts, cence dismenteâsi che al è complet chel de acuisizion dai dâts stes.

Peraulis clâf. Patrimoni culturâl, laser scanning, fotogrametrie, rappresentazion, automazion.

¹ Dipartiment di Gjeorisorsis e Teritori, Universitât dal Friûl, Udin, Italie.
E-mail: domenico.visintini@uniud.it

1. Introduzion

1.1 La storie di Aquilee in struc. Aquilee e je inte plane dal Friûl no lontane de lagune di Grau, su la rive diestre dal flum Natisse, che forsit si clamave *Aquilis* e di chel al non de citât. La impuartance storiche, culturâl e religjose e no ultime la sô identitât simboliche come “Mari dal Friûl” e pues sedi dome riclamade in struc in chest articul.

La storie e comence intal 181 A.C. cuant che i Romans e faserin sù une citât-fuartece intune posizion geografiche strategjiche come un avampuest difensîf cuintri i atacs dai esercits forescj, une base operative par incursions cuintri i Gjai che a vivevin tes zonis alpinis e par atacs cuintri lis confinantis Ilirie, Dalmazie e Panonie. Tal imprin, sù par jù trê mil soldâts-colonos si stabilirin inte citât, zontâts dopo pôcs agns di altris cuatri mil. Il centri de Aquilee romane al stave su la atuâl Strade Statâl SR352 che e seguîs la vecje strade consolâr (viôt Figure 1). L’antîc *cardo maximum*, vuê Via Giulia Augusta, al taie par lunc di Nord a Sud la citât, traversât dal *decumanum maximum*, vuê Via Gemina, dulà che a son i rudinaçs dal *Forum* (viôt ③ inte Figure 1), par dî il vêr costruît dopo, tal II-III secul, in particolâr il puartin a Est che o podin viodi ancje in dî di vuê.

Intal 89 A.C. la colonie e diventà un *Municipium*. Dopo, sot il domini dal Imperadôr August e diventà la capitâl de X Regjon Romane “Venetia et Histria”: cun cheste impuartance al cresceve il numar di monuments e di palaçs publics. I artesans dal puest a jerin mestris tal lavorâ l’aur, il veri e la tiere cuete. La citât e ospite artiscj di grant estri che, lavorant il marmul e la pierre, a crein mosaics di straordenarie bielece.

Aquilee e patì purtrop i prins atacs di grups di invasôrs barbars ma, cuant che Dioclezian al diventà Imperadôr, e tornà al so antîc splendôr come une des plui grandis citâts dal Imperi Roman, la cuarte in Italie dopo Rome, Milan e Capua e la novesime in dut l’imperî. Une grande Comunitât Cristiane e nassè daûr l’insegnament dai Apuestui. Di culî e partì la conversion al Cristianisim de Istrie, dai Balcans, de Ongarie e dai teritoris di lunc il Danubi. La vaste entitât di tieris sot de sô influence e fasè di Aquilee un dai maiôrs lûcs cristians e la sô impuartance e cressè un grum cuant che il Vescul di Aquilee al fo invistît dal titul di Patriarce.

Cheste glorie e prosperitât e clamà gnûfs atacs. Atile, Re dai Uns, al rivà intal 452 e dopo un lunc assedi al batè lis difesis de citât e al sdrumà

“dut ce che al jere in face a lui”. La popolazion e scjampà a Grau e tes isulis ator pe lagune, dulà che al jere plui facil difindisi in câs di atac, slontanantsi fin a rivâ a fondâ la citât di Vignesie.

Cun la invasion langobarde tal VI secul e la fondazion di un gnûf domini, Forum Julii (Cividât in di di vuê) e diventà un ducât e Aquilee e pierdè part dal so tradizional podê politic e ministratîf su la Regjon e cusì e vignì bandonade dai Patriarcjîs.

Aquilee e sflorì ancjemò une volte in graziis di Carli il Grant che al fasè tornâ cul il Patriarcje Massenzi. Dai prins dal IX secul fin tal XI secul, Aquilee e tornà cussì al so splendôr originâl. Dal 1077, l'Imperadôr al invistì il Patriarcje dal podê feudâl, cul drit di bati monede.

Chest domini patriarcjâl al podè durâ par cualchi secul, fin cuant che il cressint podê de Republiche di Vignesie lu fasè finî tal 1420. A partî di chel an, Aquilee e scomençà un lente decjadence, fin a fâle diventâ un piçul paîs agricul.

Intal 1751, la diocesi e vignì abolide e i teritoris slambrâts e finirin sot dal Arcivescul di Udin, pes tieris sot di Vignesie, e di Gurize, pes tieris sot de Austrie.

Par finî cheste curte tratazion storiche e par sotliniâ ancjemò la impuartance di Aquilee, al baste visâsi che la Aree Archeologjiche e la Basiliche di Aquilee a son stâts iscrits te liste dal Patrimoni Culturâl Mondîal dal UNESCO, inte XXII riunion a Kyoto tal 1998, in graziis ai criteris III, IV e VI:

- Criteri III: Aquilee e je stade une des plui grandis e prosperosis citâts dal prin Imperi Roman.
- Criteri IV: Pal fat che la grande part de antiche Aquilee e sorevîf intate e no sgjavade, e je un dai plui complets esemplis di prime citât romane dal mont Mediterani.
- Criteri VI: Il complès de Basiliche Patriarcjâl al à vût une funzion decisiva par difondi il Cristianisim inte Europe centrâl te prime Ete di Mieç.

1.2 Lis Termis Romanis di Aquilee. La scuvierde des Grandis Termis Romanis, slargjadis suntune aree di forsit cuasi doi etars inte part occidentâl di Aquilee (viôt ① inte Figure 1), e je stade fate di Giovanni Brusino tai agns 1922-1923. Gnûfs sgjâfs a son stâts ripetûts di Luisa Bertacchi tal

1961 par fermâ la costruzion di un complès scuelastic inte zone archeologjiche, mentri Paola Lopreato e fasè indagjins plui sistematichis dal 1981 al 1987. Dal 2002, la part sud des termis e costituìs il cjamp estîf di sgjâfs archeologjics (viôt Figure 2 a çampe) de Universitât dal Friûl di Udin, pal cors di lauree in Conservazion dei Bens Culturâi (Fales et al. 2003).

Midiant di ducj chescj lavôrs di sgjâf, par altri une vore incomplets, e je stade metude in lûs une vaste aree di cirche 140 x 30 m orientade Nord-Sud, cun dentri une grande stanzie centrâl di 47 x 20 m pavimentâts di marmul intarsiât (*opus sectile*) e dôs stanziis simetrichis e retangulârs di 30 x 20 m finementri decoradis cun mosaics gjeometrics a plui colôrs, di stîl e di cualitât parele di chê dai miôr esemplis di altris regjons dal Imperi. Chestis stanziis cun vascjis ator, unidis midiant corredôrs, a fasevin part dal *Frigidarium*, viodût che no je nissune ombre di implant di riscjaldament de aghe.

La rafinatece dal pavement cun tessaris e tocuts di marmul, paste di veri, pieris preziosis come il porfit e il serpentin, e conferme la ecezionâl impuartance dal complès des termis di Aquilee, che al veve di sedi un dai plui grancj dal Imperi Roman. Tancj lavôrs di restauri dai mosaics a àn mostrât che la durade des Grandis Termis e à di sedi stade pluitost lungje, cun diviers periodis e modifichis, començant almancul dal tierç secul par continuâ intal cuart e, forsit, ancje dopo di chel timp.

Cualchidun dai bielissims mosaics des Grandis Termis al è stât tirât fûr dai sgjâfs originâi e al è conservât intal Museu Archeologjic di Aquilee (viôt ④ inte Figure 1).

1.3 La Basiliche Patriarcjâl di Aquilee. Inte part sudorientâl de citât romane (viôt ② inte Figure 1), lis liniis Romanichis-Gotichis de Basiliche Patriarcjâl si alcin fermis e cun grande solenitât; ma a dî il vêr, la sô storie e comence fin dal IV secul.

Secont la tradizion, San Marc al puartà il messaç dal Vanzeli in chestis tieris, mandât culi di San Pieri. In cualitât di Evangjelist, dilunc de sô mission a Aquilee, al incuintrà e al convertì Ermacure che al diventà il prin predi de piçule Comunitât Cristiane. Ermacure al fo martirizât insiemit cul so diacun Fortunât, e lôr doi a son, insiemit cun la Vergjine Marie, i Sants Patrons de Basiliche. La persecuzion e finì tal 313 come

risultât dal Edit di Costantin e di Licio. La Comunitât Cristiane di Aquilee, guviernade dal Arcivescul Teodoro, finalmentri e podê costruî la sô prime glesie. In mil agns di chê volte, sù par jù, a son stadis fatis tantis modifichis architetonichis, cambiant cussì la glesie Teodoriane inte Basiliche di vuê. La evoluzion cronologjiche de plante de Basiliche e je ripuartade in Visintini, Crosilla e Sepic (2006).

La prime glesie e jere fate sù cun dôs grandis aulis retangulârs: chestis a jerin parelis fra di lôr e colegadis midiant di une tierce aule, che pui tart e vignì zontade di stanziis plui piçulis.

La costruzion Teodoriane e vignì cambiade tal IV secul: la aule nord e vignì slargjate une vore, in mût di podê tignî un simpri plui grant numar di fedêi. Dopo di chê, ancje la aule Teodoriane nord e vignì trasformade intun spazi a trê navadis (aule Post-Teodoriane sud) cuntun gnûf grant batisteri devant de jentrade principâl.

Atile al sdrumà la aule Post-Teodoriane nord dilunc l'assedi dal 452 e cheste no vignì mai plui ricostruide.

Intal IX secul, il Patriarcje Massenzi al fasè un grant cambiament fasint sù il transet, creant cussì pe prime volte une plante a forme di crôs latine, e la cripte sot dal presbiteri. In plui, al sistemà la façade de glesie cuntun puartin che al colegave la Basiliche a chê che e vignive clamade la "Glesie dai Pagans".

Intal XI secul, il Patriarcje Popon al pensà di puartâ indevant altris restauris. Al tirà sù i mûrs dal perimetri, al costruì une gnove pavimentazion, e la abside principâl e vignì piturade cun frescs di grande monumentalitât e di ispirazion romane. Popon al tirà sù ancje il cjampanîl alt 73 m che al domine la plane dal Friûl. L'aspîet de Basiliche che in di di vuê si ufrîs al visitadôr (viôt Figure 2 a diestre) al è plui o mancûl chel che Popon al consacrà il 13 di Lui dal 1031.

Intal XII secul, il Patriarcje Voldoric di Treffen al impreziosì la cripte cuntune rie di frescs, une des plui impuartantis schiriis di pituris romanichis dal Nord Italie. Il Patriarcje Marquart di Randek al dè un rignuviment gotic dopo il taramot dal 1348, tirant sù i arcs ogjivâi inte navade e fasint il tet di len cun la forme di une carene di nâf a trê lobis.

Dopo di chel, de Ete di Mieç fin tal XIX secul, inte Basiliche a son stadis fatis dome zontis di pôc cont.

In fin il tesaur di art e di fede e il plui grant patrimoni de Basiliche: il

paviment mosaicât (p.e. Iacumin 1993; Marini 2003). Al è il plui grant e il plui antîc pavement dal mont cristian occidentâl, un magnific esempi di art costantiniane. Al è propri impressionant pensâ che cheste opare mestre e je stade discuvierete dome tal 1909 di un grup di archeolocs austriacs sot de pavimentazion fate fâ di Popon! Il mosaic al è fat di dîs tapêts separâts di strichis cun *girali* (coronis) di zermuei e di fueis di Acant. Al pues sedi intindût come un “catechisim midiant des pituris”, parcè che ogni disen al à la sô impuartance, energjie, imagjinazion e veretât di fede, chês veretâts che, intal 313, a podevin sedi finalmentri proclamadis in public.

2. Materiâi e metodis. Par studiâ in detai monuments cussì impuartants, amplis e complicâts come lis Grandis Termis e la Basiliche Patriarcjâl a si scugnarès doprâ lis miôr technichis modernis disponibilis in fat di rilevament e di rappresentazion. Un sisteme *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) integrât cuntune cjamare fotogrametriche al è di sigûr il *Stât-de-Art* des technichis di rilevament. La straordenarie cuantitât di dâts gjeometrics e fotografics acuisîts automaticamentri cun chestis aparecjaduris, dopo des dovudis fasis di elaborazion, e pues sedi rapresentade plui che ben in tantis modalitâts e in alte cualitât, graziis al disvilup cence fin intai setôrs de modelazion e visualizazion 3D, de realtât virtuâl e de computer vision.

Lis modernis technichis di “rilevament e di rappresentazion” a costiuisin i arguments di chest articul; par altri, stant che fâ un rilevament a alte cualitât e je une condizion necessarie (e in di di vuê anje suficiente) par otignî une rappresentazion di alte cualitât, o pontarìn la atenzion sui aspiets dal rilevament. In chest cjapitul *Materiâi e metodis*, i diviers paragrafs a laran dilunc cun la tecnologjie di rilevament doprade (“materîai”) cun i passaçs de elaborazion dai dâts (“metodis”), metint in chescj ultîns anje aspiets di rappresentazion.

2.1 Technichis di rilevament laser scanning e fotogrametric. Tant par clarî subit lis ideis, lis definizions che si somein “terrestrial laser scanner” e “terrestrial laser scanning”, dutis dôs a corispuindin a la abreviazion TLS, e a àn un significât diferent: il *scanner* al è il strument (“materîâl”) che al permet il rilevament par *scanning* (“metodi”), si ben che fevelant no tant par fin i concets a son une vore similârs.

I prins prototips di sisteme TLS a vignirin metûts sul marcjât mancul di dîs agns indaûr (viôt p.e. Boehler, Heinz e Marbs 2002). Tal inizi, a son stâts doprâts in aplicazions industriâls e di inzegnerie civîl, mentri che in di di vuê a son une vore doprâts ancje pal rilevament dai bens architetonics e archeologjics e dal patrimoni culturâl, dulà che la lôr irregolaritât gjeometriche e pues sedi misurade precisementri e cuntun grant level di detai (viôt p.e. Sacerdote e Tucci 2007).

La Figure 3 a çampe e mostre il principi di misurazione dal rilevament TLS. Il sisteme di riferiment des coordenadis X^S , Y^S , Z^S al à origjin intal centri dal sisteme TLS e al è definît come “Scanner’ Own Coordinate System” (SOCS). La direzion dal as Z^S e pues no sedi precisementri verticâl o e podarès sedi inclinade a pueste, come inte Figure 3, par scansî superficiis cuasit orizontâls come che e je chê di une aree di sgjâfs archeologjics. Un SOCS alore al è un sisteme locâl e arbitrari di riferiment e chest al domande lis computazions che a saran dopo descritis intal paragraf 2.3.

In ogni câs, considerin di emeti un rai laser intune cierte direzion spazial: lis trê coordenadis dal pont colpît P a son calcoladis aplicant lis ecuazions:

$$\begin{aligned} X^S &= D \sin \varphi \sin \vartheta \\ Y^S &= D \sin \varphi \cos \vartheta \\ Z^S &= D \cos \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

indulà che:

- D e je la distance dal strument TLS al pont P: e je calcolade, come par un EDM (Electronic Distance Meter) topografic, midiant i metodels dal *timp-di-svual* o de *diference di fase* che a disfrutin la forme cognossude de onde emetude-tornade;
- φ al è l’angul “verticâl” de direzion dal rai: al è cognossût parcè che al è imponût de rotazion di un spielî ator dal as “orizontâl”;
- ϑ al è l’angul “orizontâl” de direzion dal rai: ancje chest al è cognossût parcè che al è imponût de rotazion di un spielî ator dal as Z^S “verticâl”.

Dal pont di viste matematic, lis ecuazions (1) a esprimin lis trasformazions (biunivochis) di coordenadis sferichis D , φ , ϑ a coordenadis cartesianis X^S , Y^S , Z^S .

Tornant al rilevament TLS, l’efiet *scanning* si realize mandant a gran-

de frecuece (fin a 50.000 voltis par secont!) il rai laser in diferentis direzions cambiant la deflection dal spieli di piçui increments. Par ogni pont, il valôr di D al è misurât, mentri chei di φ e ϑ a son imponûts: aplicant continuementri lis ecuazions (1), lis corrisponentis coordenadis X^S , Y^S , Z^S a son alore automaticamentri calcoladis cuasi in *timp reâl*. E je une vore impuartante une grande precision intal misurâ i valôrs angolârs, parcè che cheste e zuie su la precision des coordenadis X^S , Y^S , Z^S otignudis pal pont: in gjenerâl, l'erôr intal posizionament 3D dal pont al è ristret in pôcs milimetris.

In plui, e ven acuiside ancje la intensitât I dal segnâl laser tornât indaûr, mapant cussì i diviers materiâi de superficie, che a puedin sedi rapresentâts intune scjale di grîs come inte Figure 3 a diestre.

Cualchi strument TLS al pues ancje misurâ la intensitât tornade inte bande spetrâl dai colôrs fundamentâi RGB (Red, Green and Blue), cussì di furnî diretamentri un *nûl colorât di ponts*, ven a stâi dant fûr siet valôrs X^S , Y^S , Z^S , I , R , G , B par ogni pont.

La grande part dai sistemis TLS no lavorin però tal spettri dai colôrs, ma a puedin sedi integrâts cuntune cjamare fotogrametriche a alte risoluzion, metint ben ferme cheste cjamare parsore dal cjâf dal TLS (viôt Figure 3 a çampe). Il sisteme al devente alore un “sisteme laser scanner e fotogrametric integrât” che al furnîs nûi X^S , Y^S , Z^S , I di ponts e imagjinis digjitâls metrichis come chês ripuartadis inte Figure 2.

Doprant une cjamare fotogrametriche, il so centri di prese al definîs un gnûf sisteme di riferiment di coordenadis, clamât “Camera Coordinate System” (CMCS), ma cuntune rotazion e une traslazion de origjin SOCS che a son cognossudis, parcè che la cjamare e je rigidementri montade sul sisteme TLS: chest al permet une integrazion dal dut automatiche fra i dâts laser scanning e lis imagjins, come che al vignarà spiegât intal paragraf 2.6.

2.2 Acuisizion dai dâts laser scanning e fotogrametrics. La uniche operazion manuâl di fâ intal cjamp di rilevament e je il posizionament di oportuns segnâi rifletints cilindrics o plats adesîfs, che a fasin la funzion di “ponts di leam” analitic vint ce fâ cun diferentis scansions e di consequence cun diferents SOCS, come che al sarà descrit tal paragraf 2.3.

La acuisizion dai dâts e je completamentri automatiche e e ven fate

metint il sisteme integrât parsore di un trepîts in oportunis posizions fis-sis (stazions), come che si fâs cuntun EDM topografic. In contrari di che-st, grant part dai TLS no an ni la pussibilitât di meti precisementri ver-ticâl l'as principâl, ni un eficient mecanisim di centradure: la posizion dal centri strumentâl e chê dal as principâl a restinalore indefinidis. Une volte fissâts i increments angolârs par φ e ϑ , e eventualmentri sielts i valôrs minims e massims di φ e ϑ dentri dal cjamp operatîf strumentâl di scansion, in ogni stazion la acuisizion e je fate automatichelementri in pôcs minûts, anje par scansions panoramichis, vâl a dî cuant che ϑ al va di 0° a 360° .

Fevelant dai segnâi rifletints, a son automatichelementri ricognossûts intal nûl di ponts za *in-situ* graziis a la lôr rifletivitât une vore grande: par ognidun, si pues anje fâ di corse une scansion fine di cirche 10.000 rais laser, in maniere di misurâ precisementri la posizion dal lôr baricentri.

Po dopo a vegnin acuisidis lis imagjins digjitâls zirant la cjamare foto-grametriche ator dal as Z^S di un oportun pas in ϑ , cussî di otignî un cjamp di viodude “orizontâl” che al cuvierç il cjamp di scansion “ori-zontâl”. La soreposizion “verticâl” des imagjins su la scansion e je di cirche dal 90% cun obietîfs grandangolârs, mancûl cun lints di lungjece focâl normâl. Il numar di imagjins che a coventin par cuvierzi 360° al dipent dal angul dal obietîf doprât e dal valôr percentuâl ($10\div 40\%$) di une soreposi-zion angolâr di sigurece: cuntun obietîf di 20 mm e cul 40% di soreposi-zion, a coventin cutuardis imagjins par cuvierzi une scansion panoramiche.

Par ogni imagjin fate, la posizion e la direzion de origjine dal riferi-ment CMCS rispiet a chel SOCS si calcolin facilmentri dal valôr dal an-gul ϑ impostât pe prese.

2.3 Registrazion dai dâts laser scanning. Come che za al è stât dit, la acui-sizion di dâts TLS di diferents ponts di scansion, vâl a dî di diferents SOCS, e puarte al probleme di fondi insiemit chescj nûi independents di ponts. Chest probleme fundamentâl al è cognossût come “registrazion” des scansions.

Considerant la Figure 4 a çampe, il probleme al è che, aplicant lis ecua-zions (1) pal stes pont P, lis coordenadis X^{S1} , Y^{S1} , Z^{S1} rispiet al $SOCS_1$ a son clarementri diferentis di chês X^{S2} , Y^{S2} , Z^{S2} rispiet al $SOCS_2$; chest fat al è ancjemò pui noiôs se o lavorin cun altris ulteriôrs scansions (SOCSs).

Par cheste reson, il probleme de registrazion al domande prin di dut la definizion e la assunzion di un altri sisteme di riferiment des coordenadis, unic par dutis lis scansions, clamât “Project Coordinate System” (PRCS), p.e. un sisteme baricentric di coordenadis za esistent cuntun as Z^P perfetementri verticâl.

Considerìn inmò la Figure 4 a çampe par un motif di semplicitât, si ben che il PRCS al podarès no corispuindi ni al SOCS_1 ni al SOCS_2 : il probleme analitic al è descrit de ecuazion vetoriâl:

$$\begin{bmatrix} X^{S1} \\ Y^{S1} \\ Z^{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{S2}^{S1} \\ Y_{S2}^{S1} \\ Z_{S2}^{S1} \end{bmatrix} + R(\Omega, \Phi, K) \begin{bmatrix} X^{S2} \\ Y^{S2} \\ Z^{S2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

indulà che:

- X^{S1}, Y^{S1}, Z^{S1} a son, in veretât, lis coordenadis di P rispjet al PRCS (X^P, Y^P, Z^P);
- $X_{S2}^{S1}, Y_{S2}^{S1}, Z_{S2}^{S1}$ a son lis coordenadis incognitis de origine dal SOCS_2 rispjet al SOCS_1 , in veretât rispjet al PRCS ($X_{S2}^P, Y_{S2}^P, Z_{S2}^P$);
- R e je la matrîs de rotazion incognite dal SOCS_2 al SOCS_1 (in veretât al PRCS), definide di trê angui Ω, Φ, K di rotazion ator des trê direzions principâls, clamâts angui di Eulero (o i trê angui analics di Cardano).

Come che si fâs par solit intes siencis gjeodetichis, lis sîs incognitis a son calcoladis costruint un sisteme cuntun numar ridondant di ecuazions (2) cun lis stessis incognitis e fasint chê che si clame la “stime ai minimis cuadrâts”, ven a stâi une soluzion otimâl dal pont di viste statistic. Chest al ven fat disfrutand lis coordenadis “doplis” X^{S1}, Y^{S1}, Z^{S1} e X^{S2}, Y^{S2}, Z^{S2} di almancul doi ponts (p.e. pont A e pont B), vâl a dî il stes pont (p.e. A e B) intes dôs scansions, par chest motif clamâts “ponte doplis” o “ponte di leam”.

In teorie, inte zone di sovrapposizion fra doi nûi a son milions di ponts cuasi comuns, e alore a son in principi milions di ponts doplis par risolvî analiticamentri la registrazion, ma cul titanico probleme dal imbinament coret dal “stes” pont (il pont scandît nol è mai propri il stes intes diferentis scansions). Ducj chescj fastidis a puedin vignî completamentri saltâts disfrutand i segnâi rifletints come ponts di leam, considerant lis lôr

coordenadis SOCS baricentrichis, e cjatant automatichementri il coret imbinament dai ponts sielzint, fra dutis lis pussibilis combinazions, chê che e furnis il minim erôr (sume dal cuadrât dai residuis).

Seguint il stes metodi par ogni cubie di scansions e/o considerant i segnâi comuns fra plui di dôs scansions, trê parametris di traslazon e trê parametris di rotazion a son calculâts par ogni scansion. Aplicant chestis trasformazions a ogni pont di ogni nûl, i ponts si “movin” dal lôr sisteme SOCS al sisteme PRCS comun: di consequence, si oten ae fin un unic nûl di milions di ponts.

2.4 Ggeo-referenziazion dai dâts laser scanning. Dopo la registrazion, un altri probleme topografic al salte fûr: l’unic nûl di ponts PRCS a pene otignût al scugnarès sedi riferît a un “Global Coordinate System” (GLCS), p.e. un sisteme cartografic di riferiment, domandant alore chê che si clame la “ggeo-referenziazion” dai dâts laser scanning.

Il probleme di trasformâ lis coordenis X^P , Y^P , Z^P in coordenis X^G , Y^G , Z^G al pues sedi risolt analiticamentri midiant metodis *direts* o *indirets* di ggeo-referenziazion (p.e. Schuhmacher e Böhm 2005).

Intal prin câs, il sisteme TLS al è integrât cuntun ricevîdor GPS e/o cun cualchi aparecjature topografiche che a permetin di misurâ diretementi i parametris di trasformazion dai diferents SOCSs al sisteme GLCS, passant vie cussì la fase di registrazion.

Seguint invezit i metodis indirets, une soluzion interessant e je pussibile se e je disponibile une cartografie 3D a grande scjale de aree rilevade: vînt cjatât “ponts doplis”, si fâs alore une sorte di registrazion dal nûl di ponts su la cartografie digjitâl. Par altri, il metodi plui doprât al seguìs il tipic mût di fâ topografic: cualchi pont scandît (p.e. i stes segnâi riflettints) al costituìs un grup di “ponts di control” che al ven misurât midiant une stazion totâl EDM di diviers ponts di une rêt topografiche in cuadrade intun riferiment gjeodetic. In di di vuê, la novità di chest procediment e je la definizion dal *datum* gjeodetic de rêt diretementi midiant misuris GPS, invezit dal metodi indiret midiant classichis misuris topografichis viers ponts fiduciâi che a fasin part di cualchi rêt gjeodetiche/cartografiche.

Dal pont di viste analitic, il probleme al è descrit intune relazion une vore simil ae precedent (2):

$$\begin{bmatrix} X^G \\ Y^G \\ Z^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P^G \\ Y_P^G \\ Z_P^G \end{bmatrix} + R(\Theta) \begin{bmatrix} X^P \\ Y^P \\ Z^P \end{bmatrix} \quad (3)$$

indulà che:

- X_P^G, Y_P^G, Z_P^G a son lis coordenadis incognitis de origjine dal PRCS rispìet al GLCS;
- R e je la madrîs de rotazion incognite dal PRCS al GLCS, definide dome midiant un angul Θ di rotazion parcè che l'as Z^P e l'as Z^G a son ducj i doi verticâi.

Considerant la relazion (3), la stime ai minimis cuadrâts des incognitis e seguîs la stesse strategjie de precedente fase § 2.3 di regjistrazion, dulà che cumò i ponts doplis a son dàts dai ponts di control, cun coordenadis X^G, Y^G, Z^G misuradis topograficementri e cun coordenadis X^P, Y^P, Z^P regjistradis.

Riassumint, dal pont di viste analitic, la regjistrazion e la gjeo-referenziacion a rivuardin dutis dôs lis stimis dai parametris di traslazion e di rotazion: par cheste reson, a puedin sedi fatis anje tal stes moment. Par dî ancjemò alc, chescj aspjets dal TLS a son similârs ai classics problemis fotogrametrics dal *orientament relatif* fra dôs imagjins cun la creazion di un *model stereoscopic* (regjistrazion) e dal *orientament assolût* dal model stereoscopic cussì formât (gjeo-referenziacion).

2.5 Ricostruzion de superficie dai ponts laser scanning. Lis fasis di elaborazion seguitivis a rivuardin la rimozion dai ponts sbaliâts e inutili e, so redut, la conversion di un nûl di ponts 3D intune superficie 3D.

Pe prime finalitât, i software disponibii a furnissin diviers comants e struments, basâts su analisis statisticis e/o criteris geometrics, par tirâ vie i erôrs grubians, i valôrs *outliers*, i ponts isolâts, i ponts duplicâts, e vie indenant. In cheste maniere, al è pussibil “netâ” e “filtrâ” automaticamentri il nûl di ponts e ricampionâ la scansion midiant di une gridele angolâr a risoluzion minôr, se chest al ves di coventâ. In plui a son simpri disponibii i classics struments CAD par une selezion (e cancelazion) 3D manuâl.

Il secont fin al rivuarde inveizit la creazion (*modelazion*) de superficie passant pai ponts corets, clamade “Dense Digital Surface Model” (DD-

SM) pe sô gjenerâl risoluzion une vore alte. Dal pont di viste gjeometric, il DDSM e je une ricostruzion *ai elements finîts* midiant une funzion di superficie f_1 tâl che $S = f_1(X^P, Y^P, Z^P)$; cence pierdite di gjeneralitât, dât un ciert valôr “planimetric” X^P, Y^P, S e permet di calculâ il valôr di “elevazion” Z^P , vâl a dî che e esist une funzion f_2 tâl che $Z^P = f_2(X^P, Y^P)$.

In pratiche, il DDSM al è automaticamentri ricostruît midiant elements 3D TIN (Triangulated Irregular Network), miôr cognossûts come *Delaunay triangulations*, o midiant gridelis regolârs, ven a stâi une madrîs di celis cuadradis, ognidune formade di doi trianguî retanguî isossele. Po dopo, il DDSM otignût al è par norme sometût a une procedure di *smussament*, che e tire fûr une superficie medie cuant che si an piçulis iregolaritâts de stesse, e a une procedure di *decimazion*, che e ingrandîs i trianguî cuant che a son masse piçui (viôt pai details p.e. Visintini 2007).

2.6 Integrazion cun lis imagjins fotogrametrichis. Come che al è za stât dit, il sisteme TLS e fotogrametric al acuisîs imagjins digjitâls: par ognidune di chestis, la posizion e la direzion de origine dal CMCS rispjet a chês dal SOCS a son facilmentri calcolabilis dal corrisponent valôr angolâr ϑ imponût. I dâts laser scanning e chei fotografics a puedin sedî cussî integrâts in maniere imediade, cence la necessitât di interazion manuâl dal operadôr.

Considerant par une imagjin acuiside lis seguitivis “ecuazions di colinearitât”, fundamentâls in fotogrametrie, a difference di chel che al sucêt pai classics problemis fotogrametrics, dutis lis cuantitâts a diestre dal uguâl a son cognossudis:

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{R_{11}(X^S - X_C^S) + R_{12}(Y^S - Y_C^S) + R_{13}(Z^S - Z_C^S)}{R_{31}(X^S - X_C^S) + R_{32}(Y^S - Y_C^S) + R_{33}(Z^S - Z_C^S)} + x_0 \\ y &= -c \frac{R_{21}(X^S - X_C^S) + R_{22}(Y^S - Y_C^S) + R_{23}(Z^S - Z_C^S)}{R_{31}(X^S - X_C^S) + R_{32}(Y^S - Y_C^S) + R_{33}(Z^S - Z_C^S)} + y_0 \end{aligned} \quad (4)$$

indulà che:

- x, y coordenadis imagjin (pixel) dal gjeneric pont ritrat inte imagjin fotogrametriche digjitâl;
- c, x_0, y_0 parametris di orientament interni de cjamare, cognossûts in graziis di un procès di calibrazion fotogrametriche;

- X^S, Y^S, Z^S posizion dal stes generic pont, cognossude par vie dal calcul midiant des ecuazions (1) intal procès di scansion laser;
- $R_{11}, R_{12}, \dots, R_{33}$ coefficients de madrîs di rotazion R dal CMCS al SOCS, cognossûts parcè che la cjamare e je fissade rigjidementri parsore dal TLS e e zire di angui ϑ imponûts;
- X_S^C, Y_S^C, Z_S^C components de traslazion dal CMCS al SOCS, cognossûts parcè che la cjamare e je fissade rigjidementri parsore dal TLS.

In mût plui detaiât, i sîs parametris definint la rotazion iniziâl (ri-vuardante trê angui di Eulero) e la traslazion dal CMCS al SOCS clamâts “parametris di montaç” a son cognossûts dal procès di calibrazion dal sisteme TLS e fotogrametric integrât. Cuant che la cjamare e zire par cjapâ sù lis imagjins, e cambie dome la direzion angolâr ϑ di une prese a chê altre. La madrîs R di rotazion e il vetôr di traslazion X_S^C, Y_S^C, Z_S^C a son facilmentri calcolâts.

Par ogni pont, lis ecuazions (4) a esprimin la proiezion centrâl che e lee insiemit lis coordenadis 3D X^S, Y^S, Z^S SOCS cun lis corrisponentis coordenadis 2D (imagjin) x, y CMCS. I valôrs RGB relatîfs a chel pixel a son alore doprâts par “colorâ” il pont. Ripetint la stesse operazion par ducj i ponts ritrats intune imagjin, il nûl di ponts al divente un nûl colorât di ponts, come che si pues viodi inte Figure 4 a diestre.

La procedure di colorazion e ven alore puartade indevant par dutis lis imagjins cjapadis di ogni posizion di scansion: chest procès al cjape dome pôcs seconts e al pues vignî fat ancje dilunc des operazions intal cjamp. Come che si pues notâ, la integrazione 3D/2D e ven fate tal sisteme SOCS: par altri, midiant la regjistrazion e la gjeo-referenziazion des scansions, i nûi colorâts di ponts si “movin” dai sistemis SOCS al sisteme GLCS.

Cheste integrazione laser scanning e imagjins e permet ancje la vestizion (*wrapping*) a colôrs completamentri automatiche dal DDSM cui valôrs RGB: dal pont di viste analitic, par cheste proiezion, si aplichin lis ecuazions (4) considerant come valôrs X^S, Y^S, Z^S no plui lis coordenadis dal pont laser, ma lis coordenadis $X^P, Y^P, f_2(X^P, Y^P)$ de superficie.

La “ortofoto” al è l’ultin ma no il minôr prodot automatic, vâl a dî une imagjin gjeometricamentri corete (ortogonâl) disponude suntun plan di interès, p.e. orizontâl o verticâl. Chest al domade di cognossi sedi l’orientament de imagjin digjitâl che la superficie dal ogjet $S = f_1(X^P, Y^P, Z^P)$: ducj i doi a son pandûts intun rilevament laser scanning e foto-

grametric integrât. Par otignê une imagjin ortofoto, alore si doprin ancjemò lis ecuazions (4) par fâ il ricampionament digitâl necessari. Cualchi software al proiete il DDSM 3D vistût sul plan 2D di interès, mentri altris a proietin la imagjin 2D originâl sul plan 2D di interès, ti gnint in cont dai diviers valôrs $X^P = f_2(X^P, Y^P)$ dal DDSM.

2.7 Rappresentazions digitâls dal rilevament. Al ven cumò dislidrisât il concet di “rappresentazion”, partint de assunzion di disfrutâ inteligjementri lis straordenariis capacitâts dai software atuâi pes visualizazions realistischis, pe realtât virtuâl e pe computer vision. Une volte che al è stât otignût un detaiât model 3D vistût cui colôrs des imagjins come che o vin viodût inmò, la produzion di un numar infinît di diferentis “rappresentazions digitâls 2D” e ven fate automaticamentri adiriture in timp-reâl! L’operadôr al à pluitost di cjapâ une decision su “ce, cemût, e di dulà” rappresentâ! Esemplis di rappresentazions risultâts dal rilevament dai lûcs di Aquilee a son mostrâts e descrîts dilunc il cjapitul 3 (*Risultâts*).

Rispuindint in ordin inviers al tripli dilem, la domande “di dulà” e riuvarde il concet di base de geometrie proietive de posizion dal pont di viste: une distance finide dal ogjet di rappresentâ e da lûc a une viodude prospettiche (p.e. Figure 6 e Figure 13), mentri che une distance infinide e gjenera une viodude ortogonâl. Intal ultin câs, cuant che il plan di rappresentazion al è complanâr cun doi as dal PRCS o dal GLCS, lis viodudis a costituissin chês che si clamin lis “rappresentazions di Monge”, miôr cognossudis come *plante* (nadirâl) (di parsore) (p.e. Figure 8 e Figure 16), *plante zenitâl* (di sot), *prospet* frontâl, dorsâl, sinistri e diestri. Par otignê ognidune di chestis, l’operadôr al à semplicementri di “fracâ il boton” corispondent! Cuant che chestis rappresentazions di Monge a vegnin stampadis intune certe scjale convenzionâl, a corispuindin a lis classichis *taulis designadis* une vore dopradis pai lavôrs di inzegnerie civîl e di architecture.

Sclîçant suntun pont inte viodude, par solit cul boton di çampe dal mouse, e movint il stes mouse, si pues zirâ il plan di rappresentazion e la viodude prospettiche o ortogonâl corispondente e ven fate in timp-reâl! Come che ben si sa, considerant la intersezion dal DDSM cuntun plan verticâl che al à une certe direzion azimutâl, la corispondente sezion vectoriâl e ven otignude automaticamentri; par altri, sielzint une “striche”

di ponts fra doi plans vicins, si pues produci distès une “pseudo-sezion”. Par ultin, cuant che si considere il DDSM o ducj i ponts oltri un plan, si cree automaticamentri un unic prospet *raster* e sezion vetoriâl (p.e. Figure 7 e Figure 15).

La cuistion “cemût rapresentâ” e tire in bal il mût di rapresentâ un rilevament laser fotogrametric, viodût che un grum di struments grafics a son disponibii. Il nûl di ponts al pues vignî colorât, cun divierse dimension dal pont e cun o cence tecnichis di sfumadure inte visualizazion, a scjale di grîs secont il valôr I de intensitât (p.e. Figure 3 a diestre), o pûr a fals colôrs secont la distance dal PRCS o la elevazion Z^p , o cun colôrs RGB reâi. I elements dal DDSM a puedin sedi rapresentâts (p.e. Figure 6 e Figure 14) in forme trasparint cun vetôrs a *fil di fier*, o pûr in forme solide cun trianguî 3D a colôrs plens o sfumâts o vistûts cun lis imagjins RGB, e cun o cence il fil di fier in soreposizion. La rappresentazion plui foto-realistiche de superficie di un ogjet rilevât e je chê rigjavade midiant un DDSM a trianguî vistûts RGB cence soreposizions a fil di fier.

Par ultin, cun il tiermin “ce rapresentâ” si intint la utile oportunitât di sielzi, pe viodude di produci, dut o dome cualchi part dal ogjet rilevât, o pûr ancje altris dâts gjeo-referenziâts come cartografiis digjitâls 3D, ortofoto aerîs 2D e ancje mapis di cjarte dopo de lôr digitalizazion e oportune gjeo-referenziazion. Inmò, la geometrie dal ogjet intal passât, come ripuartât intes mapis storichis (p.e. Figure 18 a çampe) o ricostruide virtualmentri (p.e. Figure 9), intal presint e intal futûr, come che e je pensade intun proget di restauri, e pues sedi misturade insiemit intal stes model 3D. In struc, l’operadôr al à la pussibilitât di disfrutâ continuativementri come che lui al pense miôr i dâts gjeometrics 3D acuisîts e disponibii, pe plui complete analisi dal ogjet di interès.

Concludint il discors su la straordenarie potenzialitât des rappresentazions digjitâls di cumò, doi ultins rimarcs a rivuardin lis rappresentazions dinamicis e il colegament cun bancjis di dâts tematics. Il prin obietîf al è garantî cun ambients virtuâi imbombâts, p.e. il spazi VRML (Virtual Reality Modeling Language) o chel di Google Earth, midiant moviments interatîfs (esplorazions) o dilunc percors pre-definîts (navigazions) come files video AVI cun pussibii efiets multimediâi. Pal secont obietîf, cuant che i dâts gjeometrics a son stâts oportunementri colegâts cui dâts descrittîfs par mieç di un software DBMS (Database Management System),

ogni sengl ogjet al pues sedi interrogât dome cuntun scliçament parso-re, come intune domande semplificade di un Sisteme Informatîf Gjeografic (GIS). Tant par dî, dutis dôs chestis pussibilitâts a son stadis realizadis pal model 3D di Place de Vitorie a Gurize otignût di un rilevament aeri e terrestri laser scanning e fotogrametric (pai details viôt Visin-tini, Spangher e Fico 2007).

3. Risultâts. Pal rilevament des Grandis Termis e de Basiliche Patriarcjâl, al è stât doprât il sisteme laser austriac Riegl Z360I (<http://www.riegl.com>) integrât cuntune cjamare fotogrametriche digitâl Nikon D100 (<http://www.nikonimaging.com>) dal Laboratori di Fotogrametrie de Universitât di Vignesie. Dilunc chest cjapitul a son riassunts i risultâts otignûts midiant il software RiSCAN PRO® (Riegl).

3.1 Rilevament laser scanning e fotogrametric des Termis Romanis. La part meridionâl des termis (“Scavo Lopreato”) e je stade rilevade dilunc i sgjâfs de estât dal 2005: tant par començâ, a son stâts metûts inte aree 33 segnâi rifletints cilindrics (5 cm di diametri x 5 cm di altece).

La fase § 2.2 di acuisizion di dâts che a partegnin a une superficie cuasi-orizontâl, come che e je chê di une aree archeologjiche, e domande di zirâ l’as Z^s dal TLS di desenis di grâts e, se al è pussibil, di alçâ il pont di scansion. Par chest motîf, e je stade tirade sù une impalcadure (trabatel) dongje de “Aule Sud” in maniere di alçâ il TLS di cirche 5 m parsore dal teren (viôt Figure 5 a çampe e Figure 2 a çampe). Cussì e je stade fate une scansion stuarte di 35° par jù, cuntune risolucion angolâr di 0,030° che e à fat rigjavâ un nûl di 6,7 milions di ponts! Cun di plui, de stesse posizion adalt, e je stade acuiside une scansion panoramiche verticâl di dut ce che al stave ator jenfri un rai di plui o mancûl 200 m. Par altri, a son stadis fatis altris dôs scansions dal ôr occidentâl dai sgjâfs, une verticâl e une zirade di 40° (viôt Figure 3), e cussì a son stâts cjapâts sù in dut cirche 23 milions di ponts.

Des stessis cuatri stazions di scansion, al è stât fat un numar totâl di 64 imagjins digitâls ad alte risolucion (3.008 x 2.000 pixel) cuntun obietîf di 20 mm di lungjece focâl, tignint une soreposizion medie di sigurece pâr al 40%.

Intal stes moment, a son stâts rilevâts topografichementri i 33 segnâi rifletints cuntune stazion EDM Leica TCRA 1103 di doi ponts. Di che-

scj ultins, a son stâts misurâts ancje altris ponts di riferiment, in particolâr i pichets di açâr plantâts intal teren a formâ une gridele cuadrade di 5 m, doprade dai archeolics par ggeo-referenziâ lis misuris di *rilevament diret* dai sgjâfs. In cheste maniere, al è stât daspò pussibil calculâ, midiant il scheme topografic clamât de “intersezion invierse”, la posizion di chescj doi ponts intal stes sistema di riferiment doprât dai archeolics, che cussì al costituìs il PRCS dal rilevament TLS. Lis coordenadis dai segnâi rifletints e, di consequence, chês des scansions regjistradis si riferissin dutis al stes PRCS; no je stade fate la ggeo-referenziazion cartografiche § 2.4, che no jere di primari interès pal lavôr. Dutis lis operazions di rilevament inte aree des termis a son stadis fatis in mieze zornade.

La fase § 2.3 di regjstrazion des cuatri scansions e je stade fate facilmenti, graziis al fat che par acuisizions TLS in cjamp viert, praticementri ducj i 33 segnâi a son visibii in ogni scansion e cussì lis sîs incognitis par scansion des ecuazions (2) a puedin sedi risoltis midiant un sistema une vore ridondant. I valôrs statistics numerics otignûts travers la elaborazion cun RiSCAN PRO a confermin cheste condizion operative otimâl: la posizion dal baricentri dai segnâi cilindrics dopo la regjstrazion e je mediametri diferente di dome 5 mm. In cheste maniere, al è stât creât un unic nûl di 23 milions di ponts, cuntune densità medie inte zone de “Aule Sud” di 30.000 ponts par metri quadrât, vâl a dî un pont 3D ogni 5,8 mm! Pe seguitive fase § 2.5 di ricostruzion dal DDSM, dentri dal software RiSCAN PRO a son disponibilis diferentis proceduris pe modelazion 3D irregolâr o regolâr. Par une aree archeologjiche cuasi-orizontâl, la modelazion 3D basade suntune gridele regolâr 2D e promet miôr risultâts rispiet a la modalitât TIN. Considerant alore une gridele planimetriche cuntun pas di 5 x 5 cm dilunc lis direzions X^p e Y^p , a son stâts calculâts automaticementri i valôrs corrispondents Z^p di cirche 200.000 ponts costituint il DDSM dai sgjâfs dal an 2005 (viôt Figure 6).

Come che si viôt in cheste viodude prospetive, il DDSM, ricostruît cun trianguî retanguî isossele une vore piçui e rapresentât in forme smusade e sfumade, al somee une superficie continue: i siei colôrs fals a cambiin a secont de altece, dal ros al blu.

3.2 Rapresentazions des Termis Romanis. Disfrutant par ben i comants di RiSCAN PRO, al è stât automaticementri otignût un grant numar di

prodots numerics 2D/3D pe aree archeologjiche come sezions, profii e raprezentacions miscliçadis raster/vector.

A son stadis gjeneradis dibot sezions verticâls dal DDSM ogni 10 cm: 453 dilunc la direzion trasversâl X^P e 143 dilunc la direzion longjitudinâl Y^P , une di chestis e je ripuartade inte Figure 7 insiemit a la part des termis oltri la sezion viers Est, come un esempli di sezion/prospet combinâts.

Cun di plui, sezions orizontâls ogni 1 cm a àn produsût lis 41 *curvis di nivel* ripuartadis inte Figure 8, come esempli di raprezentazion misturade raster/vector, insiemit cun la ortofoto sul plan orizontâl, risultât de fase § 2.6 di integrazion cun lis imagjins Nikon fotogrametrichis.

Partint di un model 3D particolaregjât come chest (Figure 9 a çampe) e graziis a cognossincis archeologjichis e ipotesis storichis (Rubinich 2006), al è stât pussibil ricostruî virtualmentri lis Termis Romanis come che a jerin (Figure 9 a diestre). In di di vuê, chestis ricostruzions a son une vore popolârs tai documentaris di storie e di archeologjie, dispès dabon spettacolârs dal pont di viste cinematografic: la someance al vêr di chestis ricostruzions e dipent une vore de completece dal rilevament gjeometric 3D e de coretece des ipotesis costrutivis.

3.3 Rilevament laser scanning e fotogrametric de Basiliche Patriarcjâl. La acuisizion di dâts laser scanning e fotogrametrics cul Riegl Z360I integrât cun la çamare Nikon D100 e lis elaborazions cul software RiSCAN PRO pal rilevament de Basiliche Patriarcjâl a son similârs a chei par lis Termis Romanis.

Di fat, un spazi interni pardavêr 3D cun tantis colonis, altris ostacui visîfs e parts taponadis, al compliche une vore lis operations di rilevament: e a coventin tantis scansionis cun grandis variaçions inte densitàt di scansion, inte soreposizion fra i nûi e inte distribuzion dai segnâi comuns.

I dâts a son stâts cjapâts sù in trê zornadis tal dicembar dal 2006. Par començâ, a son stâts disponûts 53 segnâi rifletints, cilindris (come pes termis) o cerclis adesîfs (di 5 cm di diametri), dentri e fûr de Basiliche come “ponti di leam” pes fasis di registrazion e di gjeo-referenziazion. Il strument laser al è stât metût parsore dal trepîts in 13 oportunis posizions di scansion dentri de Basiliche. Di chestis, a son stâts tirâts sù 28

nûi di ponts, cun diferents orientaments dal as Z^S , dal pas angolâr, e dal interval di distancis misuradis. Par altri, di ogni posizion dal strument e je stade fate une scansion panoramiche ae massime risoluzion angolâr strumentâl, creant un nûl di 3.240.000 ponts. Pe scansion cuasi-verticâl “AbsideV” de abside principâl de Basiliche, fate di une stazion plui o mancûl tal so centri, e je stade cjapade une gridele di ponts di 5×5 mm su la superficie de parêt frescjade, vâl a dî 40.000 ponts par metri cuadrât! La Figure 10 e mostre la scansion panoramiche “NavataV” fate dal centri de navade centrâl intune interessante viodude 2D in coordenadis angolârs, indulà che ogni pont misurât al è disegnat tal spazi 2D di ϑ, φ secont i propri valôrs angolârs di acuisizion rispjet al SOCS.

Des stessis stazions di scansion, al è stât cjapât un numar totâl di 138 imagjins digjitâls cuntun fatôr variabil di soreposizion di sigurece: la Figure 11 e ripuarte lis dodis imagjins Nikon de scansion “NavataV” cun la lôr proprie soreposizion, in maniere di formâ une imagjin pseudo-panoramiche.

La Figure 12 e mostre invezit il risultât de fase § 2.5 di colorazion dal nûl di ponts, ancjemò intune viodude 2D: come che si pues notâ, il cjamp-di-viodude verticâl de cjamare al è plui piçul dal cjamp-di-scansion dal TLS. I ponts dal sufît e dal pavement no piturâts in chestis imagjins a saran colorâts in scansions oblicuis midiant lis imagjins relativis.

Il rilevament esterni de part frontâl de Basiliche e dal cjampanîl alt 73 metris al è stât fat di cinc stazions, che a àn rindût pussibilis 14 diferentis scansions, di panoramichis di dut ce che al è ator (dal tor!) a une vore strentis dome sul tor, e 55 imagjins digjitâls.

I 53 segnâi rifletints dentri e fûr a son stâts oportunementri rilevâts midiant la stazion EDM Leica TCRA 1103 di sîs ponts di une rêto topografiche. Un ricevidôr GPS Leica 520 al è stât metût suntun pont de rêto (*master*), mentri che un secont ricevidôr GPS compagn (*rover*) parsore di altris trê ponts de rêto, in maniere di fâ *misuris satelitârs statichis diferenziâls*. Chest al à permetût di fissâ diretementri il datum de rêto intal sisteme cartografic nazionâl italian Gauss-Boaga cjapât sù come GLCS. Di consequence, ducj i segnâi rifletints a vegnin riferîts al GLCS: come consequence a pissande, lis tredis scansions internis e lis cinc esternis a vegnin intal stes moment regjistradis e gjeo-referenziadis. La Figure 13 e mostre une viodude prospetive dal nûl comun di plui o mancûl 55 mi-

lions di ponts otignûts des scansions internis, ognidun cuntun colôr diferent.

Par ogni scansion a son stâts mediemetri doprâts dodis segnâi rifle-tints: il residui medi risultant al è di 2-3 cm e al è ben sodisfasint, sore-dut tignint cont de dificolât tal colimâ topograficementri il centri dai segnâi cilindrics.

Come esempi des elaborazions eseguidis sui dâts TLS e fotogramet-rics, la Figure 14 e riunîs chês fatîs pe seste colone a çampe (che si viôt ancje intes Figuris 10+12):

1. Une part de imagjin fotogrametriche che e ritrai la colone.
2. Il nûl di ponts de colone riunide des trê scansions TLS çapadis di plui dongje.
3. Il DDSM de colone in forme di TIN une vore piçui rapresentâts a fil di fier.
4. Il stes DDSM rapresentât a valôrs di grîs sfumâts secont la intensitât TLS.
5. Il prospet ortofoto intal plan verticâl de imagjin 1. e dal DDSM 3.

Al è stât metût un particolâr interès sul maraveôs pavement in mosaic: partint di cirche 3 milions di ponts culi çapâts sù, e je stade eseguide la fa-se § 2.4 di ricostruzion dal DDSM disfrutant la modalitât a gridele regolâr. Considerant un pas di 5 x 5 cm, a son stâts automaticementri calcolâts i valôrs Z^p di cirche 150.000 ponts costituint la superficie mosaicade; chest DDSM al à rindût pussibil di produsi la ortofoto dal pavement de Figure 16.

Cun di plui, a son stâts doprâts ancje dâts aeris, parcè che al jere stât fat in precedenza un rilevament *Aerial Laser Scanning* (ALS) cuntun si-steme Optech ALTM 3033 pe interie citât di Aquilee, dentri des ativitâts dal progjet european INTERREG IIIA Italie-Slovenie (<http://geomat-ica.uniud.it>). Il Grup di Ricerche in Gjeomatiche de Universitât dal Friûl al à sperimentât in profonditât la avanzade e inovative tecniche ALS di rilevament pe citât di Gurize, integrât ancje cun dâts TLS. Lis potenzia-litâts e i risultâts une vore prometents a son descrîts p.e. in Visintini, Cro-silla, Fico e Guerra (2005). Tornant indaûr ai dâts ALS disponibii par Aquilee che a vevin une basse densitât (1-2 ponts par metri cuadrât), viodût che a jerin riferîts al stes datum Gauss-Boaga, al è stât otignût in-tun moment un unic nûl di ponts terrestris e aeris! Lis raprezentazions dai risultâts des elaborazions dai dâts ALS a son ripuartadis inte Figure 17, insiemit cun chei dai dâts TLS.

Altris details sul rilevament TLS de Basiliche e su la modelazion automatica de abside principâl a puedin sedi cjatâts in Visintini, Crosilla e Sepic (2006).

3.4 Rappresentazions de Basiliche Patriarcjâl. Une vore di rappresentazions digjitâls de Basiliche a son stadis automaticamentri otignudis cun RiSCAN PRO, ma dome cualchidune e ven presentade in chest paragraf. La Figure 15 e ripuarte un prospet/sezion trasversâl mostrant la buine congruence fra lis scansions internis e esternis: dânt une cierte dimension ai ponts e doprant une opzion di smussament inte visualizazion, chest nûl di ponts al somee za une ortofoto suntun plan verticâl.

La Figure 16 e je invezit une plante raster/vector dal pavement in mosaic produsude midiant une vere ortofoto partint des imagjins Nikon, cuntun pixel che al corrispuint a un centimetri, insiemit cun lis curvis di nivel ogni centimetri, mostrant la sô grande irregolaritât par colpe de subsidence dal teren.

Il model 3D colorât de Basiliche al è stât espuartât in diviers formâts di file, permetint cussì visitis virtuâls une vore realistichis, sedi in ambient VRML sedi cun viaçs par fûr e par dentri in file AVI multimedîai. Un filmât di une navigazion virtuâl al pues sedi viodût a basse risoluzion, insiemit a altris esemplis di rilevament ALS e TLS inte pagine web <http://geomatica.uniud.it/progetti/laserscan/>.

Un altri esempli di traietorie virtuâl, cheste in svicinament ae Basiliche, e je ilustrade dilunc de Figure 17, in mût e maniere di rappresentâ ducj insiemit i dâts ALS, TLS e fotogrametrics. Lis figuris, che si puedin capî miôr in Visintini (2007), a mostrin par ordin:

1. Ponts ALS colorâts par elevazion (dal blu al ros).
2. Ponts ALS automaticamentri classificâts in “teren” (maron) e “no teren” (blanc).
3. Ponts ALS “no teren” automaticamentri classificâts in “edificis” (ros) e in “vegjetazion” (vert).
4. Modei dai edificis ombregjâts otignûts semi-automaticamentri dai ponts “edificis”.
5. Modei dai edificis a fîl di fier e ponts TLS colorâts RGB.
- 6.7. Ponts TLS colorâts RGB e DDSM vistûts dal pavement in mosaic.
- 8.9. DDSM vistûts dal pavement in mosaic.

Chestis viodudis diferentis a àn di sedi consideradis semplicementri

come sengui “fotograms” par costruî une navigazion virtuâl tal spazi interni o esterni o intal timp, cun plui o mancul impressionants “efiets speciâi cinematografics”.

Par ultime, la Figure 18 e mostre altris doi esemplis di rapresentazions virtuâls realizadis. A çampe, la Basiliche di vuê cun la pavimentazion che e cuvierzeve i mosaics come ripuartade intune plante di Niemann dal 1909, prime di sedi gjavade vie. A diestre, la aree de Basiliche cui edificis modelâts e vistûts come un *3D City Model* cuntun *Level di Detai 3* (p.e. Visintini, Spangher e Fico 2007) impuartât come file KMZ dentri dal ben cognossût spazi virtuâl gjeografic di Google Earth.

Discussion. Chest articul al descrîf la aplicazion des modernis technichis di rilevament e di rapresentazion pal studi des Termis Romanis e de Basiliche Patriarcjâl di Aquilee, ducj i doi partignints ae Liste dal Patrimonio Mondîal dal UNESCO.

La impuartance di chescj doi monuments, a pene riclamade in struc, e podarès sedi sufficient par vê une buine reson di doprâ lis technichis di rilevament e di rapresentazion al Stât-de-Art; par altri, e je la complessitât di chescj lûcs aquileiês a sburtâ a fuart par chescj straordenaris “materîai e metodis” modernis.

Al è stât fat un excursus intal rilevament terrestri midiant sistemis laser scanning integrâts cuntune çamare fotogrametriche, cussì come intes fasis di elaborazion, di regjstrazion, di gjeo-referenziazion, di ricostruzion de superficie e di integrazion cun lis imagjins. Si pues dî che cheste tecnologjie e à dabon rivoluzionât il mont gjeo-topo-cartografic e che o sin dome al inizi intal disfrutâ il so grues potenziâl pes dissiplinis architetonichis e inzegniristic che a àn ce fâ cui setôrs dal teritori, de urbanistiche, de costruzion edil e dal patrimoni culturâl.

Il so pont di fuarce e je la acuisizion di un numar mostruôs di informazions geometrichis e fotografichis, che nissune altre tecniche di rilevament no à mai podût furnî. La elaborazion dai dâts e devente il moment clâf dal procès, anje parcè che nol è nuie di fâ dilunc la acuisizion completamentri automatiche! Cuntune espression metaforiche, cheste tecniche e sfide il rilevadôr di talent a sedi bon di puartâ il sorprendint level di automazion de acuisizion dai dâts inte elaborazion dai dâts.

Il letôr interessât al varès di fâ cumò la domande fondamentâl: “Trop jerino automatics i rilevaments e lis rapresentazions des Termis e de Basiliche di Aquilee?” Ricuardant ancjemò la acuisizion dute automatiche dai dâts in dome trê-cuatri zornadis, il nivel di automazion realmentri conseguît intes elaborazions al pues sedi cuotât come dut-automatic pes fasis di ricostruzion de superficie, di integrazion des imagjins e, naturalmentri, des rapresentazions digjitâls, chestis ultimis avantazantsi des maveosis risorsis informatichis dal di di vuê. Lis fasis di regjistrazion e di gjeo-referenziacion a son stadis puartadis fûr in maniere “cuasi-automatiche”: ogni fastidi si gjave vie semplicementri rinomenant i ponts segnâi cul stes non dai ponts di control, se no i algoritmis di permutazion a cjatin avonde ben il coret imbinament. A si pues dî alore che i software disponibii a risolvin automaticementri ançe chestis fasis di elaborazion.

Concludint, traviers la esperience di Aquilee, chestis tecnicis di rilevament e di rapresentazion a son stadis valutadis in câs aplicatîfs reâi su doi diferents, ma a ogni mût, complès monuments come une aree archeologjiche vierte e il spazi sierât di une glesie Romaniche-Gotiche, otgnint rispuestis positivis in ducj i doi i câs.

La someance realistiche des rapresentazions digjitâls produsudis e culî presentadis e pues sedi di sigûr miorade cun altris fasis di modifiche e di refinament, ma ogni elaborazion cussì zontade e puartarès il procès di rapresentazion lontan di un procès “frache il boton” che invezit e je la finalitât de sfide che nus viôt coinvolt.

Sierant, la cuistion fundamentâl e dovarès tornâ fûr ancjemò, cumò inte forme “Trop bogns sono i risultâts rigjavâts in maniere dal dut automatiche?”. A cheste domande però no je une rispueste buine par dutis lis stagjons, parcè che un grum, se no dut, al dipent dal software che al masane i dâts laser scanning e fotogrametrics. Di consequence, o sin (magari cussì no) intes mans dai informatics e dai programadôrs che a implementin algoritmis plui o mancûl complès, cun prestazions che in di di vuê a son, in gjenerâl, plui che sodisfasintis.

A ogni mût, par finî chest articul cuntune note otimiste e fidant intal inesorabil disvilup tecnologjic, o podarìn spietâsi intal prossim futûr risultâts sorprendents ançe par dutis chês elaborazions consideradis complicadis fin cumò o (cuasi!) impossibilis!