

# O Estado da Arte das Técnicas de Georreferenciamento Terrestre Vista em Três Dimensões

## State of Art of Three-Dimensional View Terrestrial Georeferencing Techniques

Rômulo Ribeiro Campos<sup>a</sup>; Wesley Oliveira de Santana<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Escola de Engenharia e Agrimensura. BA, Brasil.

<sup>b</sup>Universidade Estadual do Piauí. PI, Brasil.

E-mail: romulorica@hotmail.com

---

### Resumo

No presente artigo foram realizadas avaliações e comparações das diferentes técnicas modernas de georreferenciamento. Atualmente, duas restrições principais do solo são utilizadas para a pesquisa de varredura laser em herança cultural: o uso de alvos como controle terrestre e pontos e a abordagem de Georreferenciação direta, com base na fixação da posição do instrumento e da atitude derivada de informações externas (estacionando sobre pontos conhecidos, nivelamento, orientação azimutal, usa de INS/GPS em caso de assentamentos abertos e amplos). Além disso, hoje em dia, vários instrumentos podem ser usados como uma estação total para determinar diretamente as coordenadas dos pontos de posições. Ambas as técnicas podem ser adotadas de forma separada, mas também podem ser integradas. A seleção de uma solução específica dependerá da precisão necessária para o georreferenciamento, mas também pode ser conduzida por necessidades operacionais especiais (tempo disponível, número de pessoas envolvidas, dificuldade em obter o site). Por outro lado, uma solução alternativa para calcular o registro de varredura com um solo mínimo é o controle de dados pelos algoritmos de correspondência de superfície.

**Palavras-chave:** Escaneamento a Laser Terrestre. Georreferenciamento. Correspondência de Superfícies. Patrimônio Cultural.

### Abstract

*In this article an evaluation and a comparison of different georeferencing modern techniques were carried out. Currently, two main soil restrictions have been used for the laser scanning exploration in cultural heritage: the use of targets as ground control and points and the direct georeferencing approach, based on the fixation of the instrument position and the attitude derived from external information (parking on known points, leveling, azimuth orientation, use of INS / GPS in case of open and wide settlements). In addition, nowadays, various instruments can be used as a total station to directly determine the position points coordinates as well. Both techniques can be adopted separately, but they can also be integrated. Selecting a specific solution will depend on the accuracy needed for geo-referencing, but can also be driven by special operational needs (time available, number of people involved, difficulty obtaining the site). On the other hand, a workaround to calculate the scanning record with a minimum soil is data control given by the surface matching algorithms.*

**Keywords:** Terrestrial Laser Scanning. Georeferencing. Surfaces Correspondence. Cultural Heritage.

---

### 1 Introdução

A maioria das aplicações atuais de varredura a laser terrestre (TLS) exige um georreferenciamento de cada visualização em 3D, que normalmente é executada por meio de alvos (ou recursos naturais) como Pontos de Controles de solo (GCPs). Na literatura, alguns métodos alternativos são propostos para realizar esta tarefa, todos com a possibilidade de reduzir os GCPs ao mínimo à configuração necessária para inserir toda a nuvem do ponto no sistema de referência terrestre. Para tanto, um primeiro grupo coleta todos os algoritmos para a correspondência de superfície, segundo expõem Masuda et al. (1995), permitindo então, o correto registro paralelo de varreduras com base em uma parcela compartilhada da superfície capturada. Assim, partindo de uma varredura e assumido como referência, todos os outros são unidos até a nuvem do ponto inteiro e, então, esta é corrigida e, finalmente, alguns GCPs são inseridos para georreferenciamento no solo (BERGEVIN; SOUCY; LAURENDEAU, 1996).

Entretanto, vale destacar que a principal desvantagem

desse procedimento está na abordagem, pois as varreduras devem compartilhar grandes porções com uma textura rica em detalhes reconhecidos pela correspondência de superfície do algoritmo. Para explorar a maior precisão do alvo medida, um método baseado em bloqueio simultâneo, que explora o ajuste de todas as varreduras está disponível também (SCAIONI; FORLANI, 2003).

Segundo Ullrich et al. (2003), já existem métodos de estação múltipla híbrida que ajusta de uma forma que permite visualizações em 3D imagens digitais capturadas por uma câmera corrigida no TLS. As vantagens de tais métodos são aquelas típicas de triangulação de bloco fotogramétrico, resultando em uma forte redução dos números dos GCPs, que são substituídos por pontos de ligação.

Existe, também, a possibilidade de realizar um georreferenciamento direto (GD), dependendo do seu objetivo de estudo, abordado por Lichti e Gordon (2004). Nesse método, um TLS se torna muito próximo de uma estação total motorizada: pode ser montada sobre uma plataforma provida

de estrutura óptica e de uma bolha nivelada, permitindo centrar em um ponto conhecido. Graças a um telescópio ou retrocesso de um alvo, a orientação no plano horizontal pode ser realizada. O interesse dos instrumentos do GD justifica o aumento rápido, como comprovado pelo fato de o scanner a laser mais recente estar equipado para ser diretamente georreferenciamento na configuração padrão. Pelo contrário, muitos TLS produzidos nos últimos anos poderiam permitir a DG, mas exigiam acurácia para serem integrados por ferramentas dedicadas. No entanto, é importante frisar que no caso de um uso de laser, a digitalização é feita com uma câmera calibrada, digitalizações e imagens podem ser georreferenciadas e orientadas juntas em uma triangulação híbrida (ULLRICH *et al.*, 2003). Em alguns casos, o uso de imagens fotogramétricas pode ajudar nas medidas de GCPs (pontos de ligação em caso de triangulação), porque a maioria dos TLS são instrumentos que exigem alvos retro reflexivos especiais como terra constrange.

A seleção do método de georreferenciamento a ser adotado depende de duas características: a forma do objeto e a precisão necessária de medidas. Por outro lado, existem algumas aplicações, em que o uso de métodos específicos de georreferenciamento não é completamente adequado por causa de questões técnicas, econômicas ou razões operacionais. Para entender o uso final do laser, pesquisas de escaneamento com especialistas (geólogos, geotécnicos ou engenheiros estruturais) são muito importantes. A pesquisa TLS é usada em diferentes campos e os requisitos podem ser diferentes de produções clássicas de mapas topográficos.

A pesquisa de minas cobertas para estudos estruturais é um exemplo típico em que baixas resoluções (5-10 cm) e condições ambientais (iluminação, temperatura, umidade) podem causar problemas na pesquisa elementar de operações, bem como no uso de combinações baseadas em GCP ou de superfície, os métodos de georreferenciamento não são completamente adequados porque os objetos com uma dimensão predominante (por exemplo, túneis, estradas, etc.) nos quais a forma geométrica do objeto não permite estabelecer um conjunto estável de GCPs ou onde a grande sobreposição necessária entre varreduras adjacentes tornaria muito caro o uso de métodos de correspondência de superfície. Neste caso, o uso da técnica DG é altamente adequado para ser aplicado com sucesso (ALBA *et al.*, 2005).

Dessa forma, é notório que existam várias técnicas de georreferenciamento atualmente disponíveis. Naturalmente, todas essas apresentam limitações em detrimento à aplicabilidade em campo, mas também essas técnicas demonstram pontos em comum.

Considerando o supracitado, o objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo epistemológico das principais técnicas de georreferenciamento para varredura a laser terrestre (TLS) 3D-views existentes. Para tanto, os objetivos específicos são: realizar uma análise comparativa das técnicas

de georreferenciamento 3D quanto as suas limitações, sejam essas financeiras ou metodológicas; apresentar as aplicabilidades em campo em diferentes situações das técnicas de georreferenciamento 3D com estudo de caso aplicável.

## 2 Desenvolvimento

### 2.1 Metodologia

A pesquisa se enquadra como artigo de revisão bibliográfica das principais técnicas de Georreferenciamento terrestre vista em três dimensões, desde o seu surgimento até os dias atuais. Para tanto, foram feitos levantamentos bibliográficos a partir de 1992 para resgatar o históricos e evolução dessas técnicas através dos principais artigos internacionais disponíveis em várias revistas da área, os quais se encontram alocados em diferentes plataformas de pesquisa.

### 2.2 Primórdios do Georreferenciamento por Scanner 3D

O problema do registro de varredura, geralmente, é abordado através da definição de dois sistemas de referência (RS): o intrínseco e o RS terrestre.

Normalmente, um scanner a laser realiza medição de uma grande nuvem de pontos em um tempo muito curto (até 12 k pontos por segundo em caso do TLS mais rápido). Para cada ponto laser, um intervalo de medição ( $\rho_m$ ) e um valor de intensidade (I) são coletados; estes dados podem ser integrados por informações RGB (Abreviatura de um sistema de cores aditivas em que o Vermelho, o Verde e o Azul são combinados de várias formas, de modo a reproduzir um largo espectro cromático) que no caso de uma câmera digital é corregistrado no scanner. Além disso, o ângulo de rotação horizontal ( $\alpha_m$ ) e o ângulo de atitude vertical ( $\theta_m$ ) são registrados para cada ponto medido, permitindo uma determinação no sistema de referência intrínseco (IRS) de uma dada posição de digitalização. Na prática, se mais de uma varredura for capturada do mesmo ponto de vista, sem alterar a posição TLS e atitude, todas as vistas 3D resultantes serão encaminhadas para o mesmo IRS (BEINAT; CROSILLAA, 2001).

Pela construção, os eixos do scanner a laser não estão perfeitamente alinhados, para que essas diferenças possam ser corrigidas para transferir as coordenadas esféricas medidas ( $\rho_m$ ,  $\alpha_m$ ,  $\theta_m$ ) para o IRS ( $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$ ). O modelo geométrico adotado para executar essa correção deve ser dado pela documentação técnica da TLS, mas isso não acontece com todos os instrumentos. Por outro lado, cada modelo de scanner a laser, geralmente é fornecido um software para controle de aquisição de dados, que executa diretamente a transformação de coordenadas de pontos 3D no IRS. O sistema de referência terrestre (GRS) é compartilhado entre mais do que uma digitalização. Para transformar cada digitalização do seu próprio IRS em um GRS uma roto-tradução 3D deve ser calculada com base em pontos de controle comuns (ou recursos). Esta operação é chamada de verificar o corregistro.

Dado o vetor  $X$  que armazena como coordenadas de um ponto no GRS, uma transformação do IRS pode ser expressa pela introdução da matriz de rotação  $R$  e do vetor  $O1$  expressando a origem do IRS em relação ao GRS (FISCHER; BOLLES, 1981).

$$X = R \cdot O1$$

A matriz de rotação  $R$  pode ser parametrizada por ângulos cardânicos (*cardanic angles*) ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) como comumente feito em fotogrametria. Relativo materialização de um GRS, isso pode ser feito por um conjunto de controle de pontos com coordenadas conhecidas, ou considerando uma varredura como referência para registrar todos os outros que se sobrepõem a esse.

### 2.3 GCP baseado em Georreferenciamento

A técnica generalizada para georreferenciamento de varredura é baseada em cada registro de scanner de varredura para o GRS, por meio de um conjunto de GCPs materializados por alvos ou características naturais. Graças ao conhecimento no mínimo de 3 GCPs, que podem ser medidas a digitalização a ser georreferenciada, todos os 6 parâmetros da *rototranslation* podem ser calculados por uma técnica de ressecção.

Na prática, o número do GCP deve ser aumentado para aumentar redundância. Sendo este problema não linear, geralmente um algoritmo, que não requer aproximações para o desconhecido é aplicado; na literatura, grande variedade desses métodos são relatados (BEINAT; CROSILLAA, 2001).

Lidar com possíveis *outliers* e encontrar automaticamente correspondentes de pontos na varredura e no chão, o algoritmo RANSAC é amplamente utilizado (FISCHLER; BOLLES, 1981).

Finalmente, uma vez que um conjunto de GCPs foram estabelecidos, um algoritmo de mínimos quadrados é aplicado e explora a redundância de dados e avaliar a precisão da solução estimada. No entanto, essa técnica pode ser usada para o georreferenciamento de uma rede de varreduras para um comum GRS, e o registro em dois desses. No último caso, os GCPs são substituídos por pontos de controle (ou caracterizados) que são compartilhados entre duas visualizações em 3D.

### 2.4 Georreferenciamento Direto

A segunda estratégia para executar o georreferenciamento de varredura é com base no chamado método direto. A maior parte do TLS existente pode ser georreferenciado diretamente, o que significa que o sensor pode ser centrado opticamente em um ponto conhecido e nivelado, enquanto o restante pode ser consertado orientando o sistema IRS para um ponto conhecido. O modelo básico geométrico, que descreve um TLS pode ser orientado por um telescópio e basicamente é semelhante ao que foi descrito pelo teodolito clássico de Lichti e Gordon (2004) e Scaioni (2005).

O scanner está estacionado em um ponto conhecido, em

um determinado GRS, enquanto o eixo  $z$  do próprio IRS é colocado verticalmente. Sendo conhecido o vetor  $H$  do ponto de estacionamento para a origem  $O1$  do IRS (de calibração ou de desenhos mecânicos) coordenadas de  $O1$  em o GRS pode ser facilmente derivado para a orientação azimutal, sendo realizada pelo alinhamento da cabeça do scanner ao longo de uma direção conhecida, graças a um aponte do dispositivo (medição do alvo do telescópio ou do *backsighting*). Alinhando um ponto  $O2$  com coordenadas planimétricas conhecidas em GRS ( $XO2, YO2$ ), também a direção do eixo  $x$  do IRS pode ser ajustado e, em seguida, o ângulo horizontal  $\kappa$  constrangido. O IRS resultante girado em torno do eixo  $z$  de um ângulo  $\kappa$  com respeito ao GRS. Por esse motivo se refere a um ponto genérico no IRS pelo vetor  $x_k$ . A transformação do IRS para o GRS é dada pela expressão:

$$X = R_{\kappa} x_k + O1$$

Em que a matriz de rotação  $R_{\kappa}$  definirá a rotação  $\kappa$  da IRS para o GRS. Uma descrição detalhada dos métodos de georreferenciamento direto para avaliar sua precisão é relatada em Lichti e Gordon (2013) e Scaioni (2003).

A tecnologia DG permite apenas o georreferenciamento de um 3D-viewsno GRS, não é usada para *coregistration*. Além disso, se a varredura é diretamente georreferenciada no mesmo GRS, essa também irá resultar em *coregistered*. Observe que, neste caso, as varreduras não são necessárias para pontos compartilhados comuns, e as superfícies são sobrepostas.

### 2.5 Georreferenciamento por Correspondência de Superfície

A fotogrametria digital, na qual a correspondência de imagens se refere a uma estimativa de uma transformação geométrica 2D, mapeia um *patch* e extrai imagens de referência para um ou mais escavos imagens, correspondendo a superfície significativa para calcular um 3D transformação (geralmente, uma roto-translação 3D) entre porção correspondente de dois pontos-nuvens. Obviamente, o problema de combinar duas superfícies é muito mais complexo do que o caso 2D. De fato, no último, dados observados, isto é, os valores de intensidade de cada pixel da imagem podem ser considerados como uma função  $I = f(i, j)$ , em que  $i$  e  $j$  são linhas e colunas de um pixel, respectivamente. No primeiro caso, apenas a geometria, isto é, coordenadas de pontos ou superfície calculada a partir da nuvem de pontos, como a triangulação é considerada apenas, mas nem sempre uma coordenada pode ser expressa como função explícita dos outros. Este fato resulta, obviamente, na complicação do problema. Além disso, a correspondência de superfície existente pode ser tratada diretamente com pontos (por exemplo, o método ICP de Besl Junior e McKay (1992) e suas melhorias ou modificações ou triangulados superfícies).

Os esforços são focados também no desenvolvimento de métodos que integram, seja a geometria e a resposta a laser ou os valores RGB. No entanto, no pacote operacional, um

dos mais populares e métodos eficientes de correspondência de superfície é o ponto mais imediato interativo (ICP) desenvolvido por Besl Junior e McKay (1992), e então melhorado por pesquisadores posteriores. O ICP é baseado na busca de pares de pontos mais próximos nos dois conjuntos, e estimando a transformação rígida, que os alinha. Então, a rígida transformação é aplicada aos pontos de um conjunto, o procedimento é iterado até a convergência. O ICP assume que um conjunto de pontos é um subconjunto do outro. Quando esta suposição não é válida, são criadas falsas combinações, que influenciam negativamente a convergência do ICP para a correta solução (FUSIELLO et al., 2002). Várias variações foram feitas na melhoria do método ICP.

## 2.6 Estudo de Caso Aplicável

O edifício histórico chamado San Pietro al Monte em Civate, um dos mais importantes e bem testemunhos organizados de Romanês na Lombardia, Itália é um exemplo de aplicação dessas tecnologias supracitadas. Nessas foram realizadas um levantamento de varredura a laser através da adoção de um Riegl LMS-Z420i equipado por uma câmera digital calibrada Nikon D100 (6.1 Mpixel) e por uma ferramenta para montagem em inclinação. Este dispositivo foi usado porque o FoV horizontal deste scanner é panorâmico (360 °), mas o vertical é limitado a  $\pm 40$  °.

Graças ao conhecimento da transformação relativa entre todas as posições inclinadas da cabeça do scanner vertical, o procedimento de georreferenciamento foi bastante simples. Uma vez que o LMS-Z420i foi georreferenciado em posição vertical, todas as posições inclinadas foram também georreferenciadas. Da mesma forma, também a câmera digital integrada é montada em uma posição conhecida, então, todas as imagens adquiridas foram orientadas no IRS do scanner de forma direta. Uma descrição detalhada das características técnicas desses TLS de longo alcance podem ser encontradas em Riegl local na rede Internet; uma boa revisão também é relatada por Scaioni et al. (2005).

A aquisição de dados é controlada através de um PC. O fornecimento de energia de todas as ferramentas é garantido por uma Honda EU10i um gerador elétrico portátil, capaz de 0,9 kW de potência alocada com um Peso total de cerca de 13 kg.

Foram adotados dois tipos de PCG, todos constituídos por metas cobertas por papel retrorrefletante. O primeiro tipo é um simples papel retrorrefletor, que foi colocado nas paredes com cola. O segundo tipo é um cilindro com diâmetro  $\varphi = 50$  mm e altura  $h = 50$  milímetros. A vantagem desses objetivos é a possibilidade de colocá-los diretamente sobre pontos conhecidos por um tripé ou um poste sem uma materialização permanente. As estações totais do Leica TCRA 1203 foram usadas para determinação de coordenadas GCP e, por algum detalhe, medições dentro da igreja. Finalmente, dois GPS Leica 1200 foram usados para vincular a pesquisa local ao mapeamento nacional.

No processo de operacionalização topográfica, pesquisada na Basílica di San Pietro, foi realizada para derivar um modelo 3D de realidade virtual. Este objetivo exigiu dois diferentes focos de precisão. Ao ar livre, a simples morfologia e construção, os materiais do objeto exigiram uma precisão acima de  $\pm 5$  cm enquanto o interior da Basílica apresenta muitos afrescos e basreliefs que exigiram maior precisão acima de  $\pm 2$  cm. Para isso, faz com que diferentes pesquisas de rede e visualização em método 3D de georreferenciamento fossem adotadas.

Outra modelagem usada na Basílica foi a de rede Geodésica. Para tanto, duas redes diferentes foram configuradas e medidas. A primeira rede consiste em 12 vértices principais materializados por unhas topográficas, cujas medidas foram realizadas pelo próprio TLS fora da Basílica. O TLS foi usado como uma estação total, aqui o digitalizar, aquisições e determinar a rede geodésica foram realizados no mesmo estágio. De todos os pontos de vista precedentes e seguintes foram medidos, adotando alvos retro reflexivos cilíndricos. O percurso fechado de 280 m de comprimento total apresentou fechamento erro de 3,5 cm de comprimento e 0,05 graus de ângulo. A rede medida (11 pontos de vista e 45 alvos) foi processada por L.S. e os resultados são de  $\pm 1.7$  cm em X-Y e  $\pm 2.9$  cm em Z. O método proposto permitiu obter o Levantamento TLS e as soluções de rede em apenas um dia de trabalho no campo.

Dentro da igreja, a medida foi realizada por meio de uma estação total Leica 1200. O L.S. ajustado à rede geodésica resultou na determinação do alvo com estimativa de std. dev.s de  $\pm 2$  mm em X-Y e  $\pm 3$  mm em Z. Coordenadas de alguns pontos pertencentes à rede externa foram medidos para juntar as duas redes. Ao final, graças à medição estática do GPS, dois pontos do GPS nacional a rede IGM95 foram vinculados à rede local, para obter coordenadas cartográficas de pontos no Gauss-Boagrade. A rede geodésica é a materialização do GRS.

Todos os dados para a modelagem geométrica foram adquiridos durante duas campanhas de medição. O primeiro durou um dia em junho 2006, quando todas as varreduras externas da Basílica foram tomadas e, em uma segunda campanha, em setembro de 2006, na qual foi completado o trabalho. Tanto o georreferenciamento como a captura de nuvem de pontos foi controlado pelo software RiscanPro licenciado pela Riegl instalado em um PC ligado ao scanner.

Para obter esses dados foram estabelecidas 27 posições principais de varredura. De cada ponto de vista, além de algumas exceções, foram realizadas 2 ou 3 varreduras diferentes, adquiridas de acordo com diferentes inclinações do Riegl LMSZ420i.

Esse fato mostra, de alguma forma, o planejamento da aquisição de dados a laser que é uma tarefa realmente complexa, que requer uma análise atenta para planejar corretamente todas as varreduras. Cada digitalização foi integrada pela sua imagem digital complementar capturada



pela câmera Nikon D100 equipada com uma lente de 20 mm.

Para análises desses dados, os softwares mais comerciais fizeram o processo de georreferenciamento automático de varredura. Vale salientar que a avaliação de ferramentas para o controle de qualidade, muitas vezes, não melhora no mesmo grau. Este torna difícil avaliar a precisão e a presença de erros grosseiros potenciais. Em alguns casos, o único procedimento de controle geralmente aplicado é a inspeção visual da varredura alinhamento.

Todo o trabalho foi validado no laboratório com teste de Topografia. Dessa forma, um primeiro campo de teste foi configurado para se tornarem práticos os testes e as comparações sobre diferentes técnicas de georreferenciamento para dados TLS. Isto é composto por uma pequena rede geodésica composta por 6 vértices no chão, a partir dos quais as coordenadas de 12 alvos retro reflexivos foram medidas. As ordenadas da rede, cujo layout foram medidos por uma estação total e após um ajuste do L.S., resultaram em um std.dev de  $\pm 1,6$  mm em planimetria e em  $\pm 2$  mm de altura. O scanner Riegl LMS420i foi posicionado em 4 vértices da rede, georreferenciados de diferentes maneiras, e de cada posição coordenadas de alvos foram adquiridas. Posteriormente, foi aplicado o conjunto de parâmetros de georreferenciamento calculados em cada estação, os resíduos em 23 pontos de verificação independentes (IChPs) foram avaliados. Todos os IChPs foram materializados por alvos retro reflexivos também. O georreferenciamento clássico baseado em GCP (método indireto) foi executado pelo SW Riscan Pro para controlar dados aquisição. Nesse caso, um L.S. foi implementado em conjunto comum estágio de pré-análise de dados, que é capaz de executar: Reconhecimento e medição automática de alvo:

- Etiquetagem automática do alvo com base no conhecido de distâncias mútuas entre esses em cada varredura e em o chão;
- Cálculo de parâmetros que permitem uma verificação mínima na medida do alvo, como o tamanho avaliado, número de pontos, resposta laser média registrada.

Após o L.S. estimar os parâmetros de georreferência, resíduos em GCPs foram exibidos junto com o sigma *nough* do ajustamento.

O georreferenciamento direto (DG) foi realizado usando coordenadas de cada ponto de referência TLS obtido a partir da medição da rede geodésica. A configuração angular foi realizada pelo emprego de um nível de queda de sensibilidade igual a 30 "/ 2 mm), complementada por um retrocesso de medição do alvo para a orientação do H azimutal. Além disso, neste caso, todos os GCP disponíveis, que não foram utilizados para georreferenciar, foram adotados como IChPs. Durante os testes laboratoriais, uma outra opção foi avaliada. O TLS foi utilizado sem explorar o total de medições da estação, mas simultaneamente digitalizou o objetivou e mediu os pontos de espera da rede geodésica. Dentro desta operação, o TLS foi colocado em cada vértice da rede, mas dessa vez considerada com coordenada desconhecida, que tem sido nivelada e

orientada por H azimuthally. Além disso, de cada ponto de exposição, alcance, ângulos, tanto horizontais como verticais, para o precedente e o próximo vértice da travessia foram medidos. Dessa forma, dois alvos retro reflexivos cilíndricos foram colocados em um tripé logo após o monumento da rede no chão. As coordenadas resultantes do cruzamento próximo às vértebras foram calculadas por L.S. Os resíduos sem IChPs foram ligeiramente piores do que com base na DG com total de medições de estações, mas foram, no entanto, muito interessantes para os campos de aplicação em que uma menor precisão é requerida.

Finalmente, o método de correspondência de superfície foi analisado. Varreduras foram processados no software Imalign-Polyworks de acordo com o que compara o seguinte esquema: no primeiro passo, as varreduras foram alinhadas em paralelo, então, um alinhamento global baseado em ICP foi aplicado a todo o conjunto de dados. O alvo coordena, em cada varredura foi comparado aos GCPs determinados com a estação total.

A técnica DG foi adotada para obter uma relação georreferenciada de varreduras adquiridas fora da igreja de San Pietro al Monte em Civate, representando 10 visualizações em 3D. O IRS do primeiro ponto de referência (100), portanto, denominado como IRS100, foi adotado como GRS. A altura instrumental foi removida para reduzi-lo ao plano terrestre. Depois de usar as coordenadas, orientações de H azimute para o antes do ponto de vista, e a altura instrumental, todas as varreduras foram georreferenciados no GRS. Em uma primeira etapa, o A aquisição do SW Riscan Pro foi usada para DG, mas isso infelizmente não permite fazer qualquer verificação do georreferenciado para qualidade dos dados. Por esta razão, um diferente procedimento utilizado. Primeiro, as medidas do alvo e as estações de rede de avanço adquiridas em cada varredura foram exportados, e esses foram processados por L.S. Finalmente, as coordenadas ajustadas foram importadas no Riscan Pro e todas as varreduras foram georreferenciadas. A precisão final resultou (Erro RMS) de  $\pm 1,9$  cm em X-Y e  $\pm 3,5$  cm em Z. DG com coordenadas conhecidas do ponto de estacionamento que não foram realizados, porque nenhuma medida total de estações fora tomada para a rede geodésica ao ar livre.

### 3 Conclusão

No trabalho, um plano de fundo sobre os métodos de georreferenciamento 3D para as visualizações em 3D adquiridas pela TLS foram apresentados. O artigo aborda em análise os desempenhos alcançados pela técnica de georreferenciamento direto, baseadas no uso de um TLS instrumento como um teodolito. De acordo com essa abordagem, os dois métodos diferentes são propostos e testados: o primeiro explora informações sobre o ponto de estacionamento TLS, que deve já estar disponível a partir de medições anteriores; o segundo permite derivar no mesmo

estágio tanto a configuração do scanner como determinação das coordenadas do ponto de vista. Essas técnicas foram aplicadas e comparadas durante levantamento de um par de sites completamente diferentes: um teste indoor campo estabelecido no laboratório universitário, e para um caso real de estudo, ou seja, a antiga igreja de San Pietro al monte em Civate (Lombardia, Itália). Os testes foram realizados para avaliar a precisão na aquisição de dados de acordo com diferentes técnicas. As comparações foram feitas com base em um conjunto comum de pontos de verificação independentes. Ambos os métodos são baseados no georreferenciamento direto e permitem obter poucas precisões menores em relação a outras abordagens.

Obviamente, o caso mais crítico ocorre quando os dados sobre os pontos de estacionamento não estão disponíveis. Por outro lado, no caso de uma precisão média é suficiente (ou seja, a um nível de 2-3 cm), se faz necessário os métodos que são realmente operacionais, porque esses evitariam a maior parte do trabalho a ser realizado no campo. Além disso, são aplicáveis desconsiderando a morfologia específica do objeto pesquisado, porque esses não exigem nenhuma particular sobreposição entre varreduras ou texturas ricas para aplicar com êxito técnicas de correspondência de superfície. O último ponto é muito interessante para a reconstrução de realidade virtual de modelos 3D de herança cultural, porque neste caso o mais importante é ter uma modelagem completa de um site grande do que alcançar a maior precisão no levantamento.

## Referências

ALBA, M. et al. Strategies for Direct Georeferencing of Riegl LMS-Z420i Data. In printing in Proc. of Optical 3D Measurement Techniques, v.45, n.120, p.3-5, 2005.

BEINAT, A.; CROSILLA, F. Generalised Procrustes Analysis for Size and Shape 3-D Object Reconstructions. Vienna, v.13, n.4, p.345-353, 2001.

BERGEVIN, R.; SOUCY, M.; LAURENDEAU, D. Towards a general multi-view registration technique. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v.18, n.5, p.540-547, May. 1996.

BESL JUNIOR, P.; MCKAY, N.D. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v.14, n.2, p.239-256, 1992.

FISCHLER, A.M; BOLLES, C.R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. ACM Magazine, v.24, n.6, p.381-395, 1981.

FUSIELLO, A. et al. Model acquisition by registration of multiple acoustic range views. Computer Vision, v.12119, n.20, p.805-819, 2002.

GORDON, S.J.; LICHTI, D.D. Terrestrial laser scanners with a narrow field of view: the effect on 3D resection solutions. Survey Review, v.37, n.292, p.448-468, 2013.

LICHTI, D.D.; GORDON S.J. Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. In Proc. of FIG Working Week, v.12 n.9 p.22-27, 2004.

MASUDA, T.; YOKOYA, N. A robust method for registration and segmentation of multiple range images. Vision and Image Understanding, v.61, n.3, p.295-307, 1995.

SCAIONI, M. Direct Georeferencing of TLS in surveying of complex sites. IAPRSSIS, v.36 n.5, p.1-8, 2005.

SCAIONI, M.; FORLANI, G. Independent model triangulation of terrestrial laser scanner data. IAPRSSIS, v.34, n.5, p.308-313, 2003.

ULLRICH, A.; SCHWARZ, R.; KAGER, H. Using hybrid multi-station adjustment for an integrated camera laser-scanner system. In Proc. of Optical 3D Meas, v.48, n.10, p.298-305, 2003.