



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Conectando Paisagens: Implantação de Uma Rede Geodésica materializada em Ambientes Ideais, Florestais e Diversos

Melodie Kern Sarubo Dorth Sinégalia¹ (autor correspondente), Giovanna de Andrade Ferreira², Patrick Faria Fernandes³, Jose Roberto Kil Filho⁴, Vinicius Cunha Amaral⁵, José Matheus Segre Moneva Viveiros⁶, Bianca Jacobo Martins Soares⁷, Nikolas Bethiol Domingues Rodrigues⁸, André Marcondes Andrade Toledo⁹, Paulo Guilherme Molin¹⁰

¹Me. em Ciências na área de Engenharia de Transportes, Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos, 18052-780, Sorocaba, São Paulo, Brasil. melodiekernsd@gmail.com. ²Mestranda, Departamento de Ciências Florestais. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. giovanna.gaf@gmail.com. ³Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos, 18052-780, Sorocaba, São Paulo, Brasil. patrick.faria.fernandes@gmail.com. ⁴Aluno de Iniciação Científica. Universidade Federal de São Carlos, 18245-970, Buri, São Paulo, Brasil. jrkfilho@estudante.ufscar.br. ⁵Aluno de Iniciação Científica. Universidade Federal de São Carlos, 18245-970, Buri, São Paulo, Brasil. viniciuscunha@estudante.ufscar.br. ⁶Mestrando, Departamento de Ciências Florestais. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. josemsmv@estudante.ufscar.br. ⁷Estudante. Universidade Federal de São Carlos, 18245-970, Buri, São Paulo, Brasil. biancajms@estudante.ufscar.br. ⁸Estudante. Universidade Federal de São Carlos, 18245-970, Buri, São Paulo, Brasil. nikolas_bethiol@hotmail.com. ⁹Prof. Dr.Titular. Universidade Federal de São Carlos, 18245-970, Buri, São Paulo, Brasil. ¹⁰Prof. Dr.Titular. Universidade Federal de São Carlos, 18245-970, Buri, São Paulo, Brasil. Professor colaborador. Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos, 18052-780, Sorocaba, São Paulo, Brasil. Professor colaborador. Departamento de Ciências Florestais. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. pgmolin@gmail.com. (autor correspondente).

Artigo recebido em 16/04/2024 e aceito em 16/01/2025

RESUMO

Enquanto mudanças climáticas sem precedentes estão ocorrendo em escala global, torna-se primordial restaurar e preservar ecossistemas florestais, visando mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Nesse cenário, mensurar o estoque de carbono positivo das florestas é uma tarefa de importância crítica nas ações de restauração no entanto, é de extrema importância afastar-se das metodologias tradicionais e desenvolver tecnologias que possibilitem o monitoramento em larga escala. Os drones, e uma ampla variedade de sensores remotos, emergem como ferramentas poderosas, proporcionando insights valiosos para tomadas de decisão, contudo, tais tecnologias dependem fundamentalmente do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS, do inglês, Global Navigation Satellite System), onde, no intuito de alcançar melhores resultados, contar com a existência de uma infraestrutura geodésica robusta torna-se primordial. As redes geodésicas locais têm um papel crucial, complementando a infraestrutura nacional, entretanto, em muitas regiões, especialmente em ambientes florestais, há lacuna dessas redes, limitando a eficácia das geotecnologias no monitoramento e gestão de paisagens diversas. Outro fator diz respeito à ausência de estudos mesclando vértices em situações ideais e não ideais, como adjacências de floresta e edificações. Visando suprir tais lacunas, este estudo apresenta as etapas e técnicas utilizadas na implantação da Rede Geodésica Cepegeo, composta por quinze vértices implantados em ambientes diversos. Todos os vértices foram levantados por técnicas da topografia convencional e geodésia. Posteriormente tais dados foram ajustados, possibilitando a obtenção das coordenadas e precisões de cada vértice, sendo organizados em memoriais descritivos que podem ser acessados através do Centro de Pesquisa e Extensão em Geotecnologias (CePE-Geo).

Palavras-chave: Precisão; GNSS; Geodésia; Topografia; Qualidade Posicional.

Connecting Landscapes: Implementation of a Geodetic Network Materialized in Ideal, Forested and Diverse Environments

ABSTRACT

While unprecedented climate changes are occurring on a global scale, it is crucial to restore and preserve forest ecosystems in order to mitigate the effects of climate change. In this context, measuring the positive carbon stock of forests is a critically important task in restoration efforts. However, it is essential to move away from traditional methodologies and develop technologies that enable large-scale monitoring. Drones, along with a wide range of remote sensing sensors, emerge as powerful tools, providing valuable insights for decision-making. However, these technologies fundamentally

rely on the Global Navigation Satellite System (GNSS), where, in order to achieve better results, having a robust geodetic infrastructure becomes paramount. Local geodetic networks play a crucial role in complementing national infrastructure; however, in many regions, particularly in forested environments, there is a gap in these networks, limiting the effectiveness of geotechnologies in monitoring and managing diverse landscapes. Another factor concerns the lack of studies combining vertices in both ideal and non-ideal situations, such as forest edges and built-up areas. Aiming to fill these gaps, this study presents the steps and techniques used in the implementation of the Cepegeo Geodetic Network, composed of fifteen vertices established in diverse environments. All vertices were surveyed using conventional topographic and geodetic techniques. Subsequently, the data was adjusted, enabling the determination of the coordinates and precisions of each vertex, which were organized into descriptive memorials accessible through the Center for Research and Extension in Geotechnologies (CePE-Geo).

Keywords: Precision; GNSS; Geodesy; Topography; Positional Accuracy

Introdução

Em meio a mudanças climáticas sem precedentes e em escala global, as florestas desempenham papéis significativos no ciclo global do carbono e na preservação e restauração das florestas, bem como a compreensão de sua dinâmica torna-se imperativa (Liang, 2023), no entanto, no cenário atual, um dos principais desafios no monitoramento de florestas consiste em medir e monitorar as variáveis florestais de maneira eficaz e precisamente, além de menos onerosas, posto que normalmente a medição destas depende de massivas campanhas de campo (Gómez et al 2019; Dupuis et al 2020; da Costa & Quintanilha, 2024; Nishiwaki et al., 2023).

Contudo, é crucial afastar-se das metodologias tradicionais dispendiosas e desenvolver tecnologias que possibilitem um monitoramento em larga escala usando ferramentas mais acessíveis e econômicas. O advento dos RPAS (sistemas de aeronaves remotamente pilotadas, do inglês, Remotely Piloted Aircraft Systems), comumente conhecidos como drones, e de uma ampla gama de sensores capazes de gerar imagens de alta resolução, possibilitou o desenvolvimento de novas abordagens provenientes de sensoriamento remoto e aerofotogrametria (Ball et al., 2023; Liang, 2023; Sinégalia et al, 2023; White et al, 2017). Várias revisões sobre o tema vêm sendo publicadas, atraindo gradualmente a atenção de pesquisadores científicos e da indústria, devido às suas amplas perspectivas de aplicação nas mais diversas áreas, desde aplicações gerais dos mesmos até em áreas específicas (Zhang et al. 2023).

Alves 2023 por exemplo, analisou o uso de um drone compacto e de baixo custo, avaliando seu desempenho, as vantagens que oferece e os principais desafios encontrados na coleta de imagens em comunidades tradicionais na Amazônia brasileira. Já Filho & Silva 2024, efetuaram a classificação da cobertura do solo utilizando imagens RGB e multiespectrais adquiridas por drone em área de floresta seca.

No entanto, um desafio persiste em relação às precisões desses produtos. Diversas pesquisas, investigam a qualidade posicional dos mesmos, mostrando que a preocupação com os erros tem sido uma constante desde os primeiros estudos sobre drones, iniciados na década de 1990; Haspel (1996), por exemplo, examinou a influência dos erros aleatórios na qualidade dos resultados obtidos, desconsiderando os erros sistemáticos.

Neste cenário, visando minimizar os efeitos que possam ocasionar degradação na qualidade desses produtos, é comum a adoção de pontos de controle, que possuem coordenadas definidas usualmente através de levantamentos utilizando receptores GNSS (Sistema de navegação global por satélites, do inglês, Global Navigation Satellite System) distribuídos estrategicamente na área a ser mapeada, de modo a serem facilmente identificados nas imagens geradas (Sefercik et al., 2023; Singh et al 2023).

Cevick et al 2024 por exemplo investigou o efeito do número e da distribuição de pontos de controle terrestre no processo de correção geométrica das imagens de satélite, e os resultados demonstraram que a distribuição apropriada dos GCPs melhorou significativamente a precisão das ortoimagens.

Contudo, a adoção de GCPs obtidos esporadicamente nas áreas de interesse não é suficiente, sendo crucial que tais pontos sejam respaldados por uma infraestrutura geodésica sólida, e apesar dos avanços tecnológicos e da crescente adoção de técnicas geodésicas em diferentes setores, muitas regiões ainda enfrentam lacunas significativas em sua infraestrutura geodésica (Kobryń, 2019; Santana & Dalazoana, 2020).

Na maioria das cidades brasileiras, ainda há deficiência de bases geodésicas e cartográficas que atendam a essas especificações, sendo, muitas vezes, desatualizadas ou até inexistentes, o que ocasiona uma série de complicações, que vão desde a degradação da qualidade nos levantamentos

topográficos até grandes desastres estruturais (Michels et al., 2021).

Uma infraestrutura geodésica robusta basicamente se resume a materialização de pontos com referencial geodésico de alta precisão, compondo uma base cartográfica com estrutura compatível com as modernas técnicas de posicionamento, fornecendo suporte para operações geodésicas em todos os níveis, onde as redes geodésicas locais desempenham um papel fundamental na complementação e na integração com a infraestrutura geodésica nacional (Kobryń, 2019; Weiss et al., 2022).

Enquanto as redes nacionais estabelecem uma base sólida de referência espacial em grande escala, as redes locais fornecem detalhes e informações específicas para áreas menores e mais detalhadas, sendo crucial a interligação entre as redes geodésicas locais e a infraestrutura geodésica nacional com o intuito de garantir consistência e precisão dos dados geodésicos em todo o território (IBGE, 2024a).

Tradicionalmente, levantamentos que visem monitoramentos são executados com Estações Totais, medidores eletrônicos de distância e receptores GNSS (Javadi et al 2024), onde uma estratégia eficaz que pode ser aplicada, com o intuito de melhorar a qualidade das redes geodésicas, é a combinação dos levantamentos por receptores GNSS com levantamentos que fazem uso das técnicas da topografia convencional (como as que utilizam estação total), posto que, enquanto os levantamentos topográficos convencionais oferecem detalhes locais precisos sobre o terreno e características específicas, os levantamentos geodésicos garantem uma abrangência e precisão global necessárias para estabelecer uma referência geoespacial confiável em larga escala (Weiss et al., 2022).

Posicionar-se sempre foi uma preocupação experimentada pelos homens. No início da evolução humana, quando viviam em pequenos grupos isolados, enfrentavam-se desafios como escassez de recursos e conflitos, o que os levava a buscar novos locais para se estabelecer. Nesse contexto, além da necessidade de se orientar e posicionar, surgiu a demanda por mapeamento, envolvendo o registro dos itinerários em seus deslocamentos. Esses registros eram feitos com instrumentos simples, como bastões e cordas, para medir distâncias e ângulos entre pontos de referência. Esses dados eram então utilizados para criar mapas e representações básicas do terreno, fundamentais para a sobrevivência e organização das comunidades antigas, dando origem aos

primeiros conceitos da topografia convencional. (Rocha & Rocha, 2021).

Assim, o termo topografia convencional refere-se ao método tradicional de medição e representação de uma porção da superfície terrestre através do uso de instrumentos ópticos e técnicas de levantamento visando determinar, através de princípios trigonométricos, a posição tridimensional dos pontos de interesse. No entanto, com o avanço das civilizações e a necessidade de mapear áreas cada vez maiores, surgiu a geodésia como uma ciência mais complexa e abrangente. A geodésia é o ramo da ciência que lida com a medição e a representação da forma e das dimensões da Terra. Envolve o uso de técnicas mais sofisticadas, como o emprego de observações astronômicas para determinar as dimensões e formas da Terra em grande escala, considerando a curvatura terrestre (Nero et al., 2023; Dantas & Costa, 2024).

Com o advento da Era Espacial e a introdução dos sistemas de posicionamento global por satélites artificiais, como o GNSS, as atividades geodésicas passaram por uma revolução significativa, posto que esses sistemas possibilitam a determinação precisa das coordenadas geográficas de pontos de interesse, fornecendo uma referência global que combina rapidez e alta precisão, superando os métodos clássicos de levantamento. Como resultado, eles atendem a demandas tanto da comunidade acadêmica e científica quanto do setor prático (Jin et al., 2022; Ocalan, 2022; IBGE, 2024b), tornando-se essenciais em diversas áreas de atuação.

Um exemplo de aplicação é a regularização de imóveis rurais no Brasil, para a qual foi criada a Lei nº 10.267, em 2001, que tornou obrigatório o georreferenciamento desses imóveis. Nesse contexto, os levantamentos realizados por GNSS se destacam como os mais utilizados para esse fim (Paiva et al., 2021). Além disso, o posicionamento por GNSS tem sido amplamente aplicado em levantamentos voltados para o posicionamento e dimensionamento de parcelas florestais (Caizzzone, 2021).

Visando atender às necessidades das diversas áreas que utilizam o GNSS, diferentes métodos foram desenvolvidos, os quais podem ser basicamente classificados em duas modalidades: posicionamento absoluto e posicionamento relativo (Krueger et al., 2020; Caizzzone, 2021; Jin et al., 2022).

O posicionamento relativo é uma técnica usada particularmente quando há duas estações coletando simultaneamente observações. Há

diversas técnicas de posicionamento relativo, e em todas elas há a necessidade de dois receptores rastreando simultaneamente, sendo um deles instalado em área aberta (sem obstruções), devendo rastrear durante todo o levantamento, ou por no mínimo 4 horas, denominado base, e o segundo equipamento, denominado rover, percorrendo os vértices de interesse respeitando os procedimentos da técnica escolhida (Peng et al., 2021; Kim & Kim, 2022; Paula et al., 2023).

O que diferencia as técnicas de posicionamento relativo é o procedimento adotado com o rover em campo. O processamento dos dados ocorre em duas etapas: inicialmente, processa-se e ajusta-se o vértice base, e, em seguida, utiliza-se as coordenadas corrigidas e ajustadas da base para processar as coordenadas dos vértices levantados com o rover. Em aplicações geodésicas no Brasil, ao utilizar o método relativo com GNSS, o usuário pode recorrer aos dados das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) para o processamento e ajustamento da base. A RBMC foi iniciada no final de 1996, com o objetivo de estabelecer uma infraestrutura geodésica de referência para posicionamentos com o uso das modernas técnicas GNSS. Essa rede facilita o uso do sistema pelo usuário e garante a qualidade dos resultados obtidos. Antes de disponibilizar as observações para os usuários, é realizado um controle de qualidade dos dados. Após essa verificação, os arquivos de observação são liberados pela internet, e seus dados podem ser utilizados tanto em trabalhos práticos quanto em pesquisas científicas (IBGE, 2024a).

No posicionamento absoluto, também conhecido como posicionamento por ponto, a posição do vértice de interesse é determinada no sistema de referência do GNSS necessitando de apenas um receptor. Pode ser dividido em duas técnicas: PPS (Posicionamento por Ponto Simples), onde não se efetua processamento, ou seja, os dados são utilizados sem refinamento estatístico, e PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), também conhecido como posicionamento por ponto, onde a posição do vértice de interesse é determinada no sistema de referência GNSS com processamento e correções via software, mas sem a necessidade da utilização de uma estação conhecida (Krueger et al., 2020; Freitas et al., 2022; Ocalan, 2022; Atiz et al., 2023; IBGE 2024b).

Uma questão de suma importância diz respeito ao controle da qualidade posicional tanto dos vértices que compõem as redes geodésicas

existentes, quanto dos GCPs, visto que trabalhos de mensuração envolvem diversas etapas, que vão desde o planejamento até o processamento dos dados obtidos, e em qualquer atividade que envolva a obtenção de medidas sempre existe algum tipo de erro associado (Michels et al., 2021). Tais erros podem ser classificados em grosseiros, sistemáticos e aleatórios, onde os erros grosseiros normalmente são oriundos da falta de experiência ou por desatenção de quem realiza o processo de medição, os aleatórios são erros cuja causa tem um caráter randômico, ou seja, não podem ser associados a uma causa específica, e os erros sistemáticos ocorrem devido às condições do meio e imperfeições nos equipamentos. (Gemael, 1994; Weiss et. al., 2022). Assim, os erros sistemáticos podem indicar algum problema no instrumento de medição e os erros aleatórios ou acidentais são aqueles que ocorrem de maneira fortuita, ao acaso (Gemael, 1994; Pourreza et al., 2022).

No que diz respeito à levantamentos utilizando receptores GNSS de precisão, os erros sistemáticos mais impactantes dizem respeito ao erro orbital dos satélites (que ocorre porque os satélites GNSS não seguem órbitas perfeitamente estáveis devido a perturbações gravitacionais e outras influências), aos erros dos relógios (os receptores GNSS dependem da precisão dos relógios atômicos embarcados nos satélites para medir o tempo de propagação dos sinais. Se houver desvio na sincronização do relógio, seja no satélite ou no receptor, isso pode afetar significativamente a precisão do posicionamento), bem como ao multicaminhamento (que ocorre quando os sinais GNSS são refletidos por superfícies próximas, como edifícios, árvores ou terrenos acidentados antes de alcançar o receptor, podendo resultar em leituras distorcidas ou atrasadas, levando a uma determinação imprecisa da posição). Por outro lado, no que diz respeito aos erros aleatórios incluem o ruído do receptor, que são variações aleatórias devido a condições ambientais ou interferências eletromagnéticas, e as condições atmosféricas variáveis, que podem causar variações nas propriedades dos sinais GNSS ao atravessar a atmosfera terrestre (Setti et al., 2020; Freitas et al., 2023; Paula et. al., 2023; Peng et al., 2023).

Obviamente, por se tratar de processos de obtenção de medidas, a topografia convencional também está sujeitas à fatores que podem ocasionar erros de levantamentos, onde as principais fontes de erros sistemáticos dizem respeito à calibração dos instrumentos utilizados nos levantamentos. Assim, se os instrumentos não estiverem

devidamente calibrados ou apresentarem desgaste, isso pode introduzir um viés sistemático nas medições. Por outro lado, os erros aleatórios são variações não sistemáticas nas medições, que podem ocorrer de forma imprevisível, e incluem, por exemplo, erros de observação, que podem resultar de fatores como vibrações do equipamento, movimentos do operador ou variações na luminosidade durante as medições (Nero et al., 2023; Dantas & Costa, 2024).

Vale ressaltar que tanto em levantamentos nas técnicas da topografia convencional, quanto por receptores GNSS, são aplicadas medidas visando minimizar os efeitos desses erros, como, por exemplo, no que diz respeito à topografia convencional, costuma-se efetuar levantamentos considerando poligonais fechadas (para cálculo dos erros angulares e lineares, e posterior correção dos mesmos), e nos levantamentos GNSS, os profissionais utilizam técnicas avançadas de processamento de dados, como modelos atmosféricos para compensar os efeitos da ionosfera e troposfera, e filtros de dados para mitigar o impacto de ruídos e interferências (Dantas & Costa, 2024; Paula et. al., 2023; Peng et al., 2023).

Contudo, ao combinar ambos os métodos, pode-se inferir tratamentos estatísticos visando melhorar a precisão geral das medições, e neste trabalho, o ajustamento escolhido foi o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Tal método visa estimar e corrigir erros sistemáticos, além de reduzir o impacto dos erros aleatórios nas medições (Weiss et al., 2022).

O ajustamento de observações faz parte de um ramo da matemática aplicada e o seu principal objetivo é uma solução única para problemas onde existe uma abundância de observações e o sistema de equações lineares é consistente. O ajustamento também tem por objetivo a estimativa de qualidade da solução e utiliza a expansão do método dos mínimos quadrados (MMQ) desenvolvidos por Gauss e Legendre (Gemael 1994), que consiste em uma técnica de otimização de um conjunto de valores de modo a minimizar a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores observados e os valores estimados, sendo essencial existir um número maior de observações com relação ao número de incógnitas, e usualmente os softwares

A implantação da rede geodésica descrita neste trabalho representa um marco significativo para a comunidade científica, acadêmica e profissional, posto que o desenvolvimento e a expansão contínua de uma infraestrutura geodésica são essenciais para atender às demandas crescentes

comerciais de ajustamento GNSS proporcionam análise do controle de qualidade do ajustamento, através do Teste Tau (teste que utiliza os resíduos normalizados de cada observação para avaliar se, estatisticamente, estão dentro dos limites previstos) (Gemael, 1944; Weiss et al, 2022).

Outra questão a ser considerada diz respeito à escolha dos locais para a materialização da rede, onde os marcos geodésicos da maioria das redes normalmente são implantados em locais ditos de situação ideal, ou seja, sem estruturas e/ou objetos próximos devido à influência na qualidade do sinal e/ou multicaminhamento (Kobryń, 2019), porém, os profissionais da área de mensuração encontram situações adversas em campo, desde regiões com alto índice de corpos d'água, até perímetros urbanos com alta incidência de edificações, e há ausência de trabalhos mencionando a qualidade posicional desses vértices.

Neste estudo, visando contribuir com a infraestrutura geodésica nacional, procedeu-se à implantação de uma rede geodésica local, denominada Rede Cepegeo, cujos vértices foram materializados considerando tanto situações ditas “ideais” (com vértices materializados em áreas menos propensas aos fatores que influenciam na qualidade dos dados GNSS), como foram implantados vértices considerando as diversas situações comumente encontradas pelos profissionais das áreas de mensuração, como pontos em áreas de floresta ou próximas a elas, além de próximas a encostas de morros, “corpos d'água” e edificações.

No que diz respeito à qualidade posicional de levantamentos topográficos georreferenciados, este trabalho utilizou uma combinação de técnicas oriundas da topografia convencional e de posicionamento por GNSS, onde as coordenadas obtidas foram tabeladas e, posteriormente, ajustadas, possibilitando atribuir coordenadas finais para cada vértice da rede, e suas respectivas precisões, onde memoriais descritivos fornecendo as coordenadas, precisões e demais informações de cada vértice foram elaborados. Tais documentos foram disponibilizados ao CePE-Geo, podendo ser acessados por a toda comunidade científica e acadêmica.

por informações geoespaciais precisas e confiáveis, e o investimento na criação e manutenção de redes geodésicas robustas e interconectadas são fundamentais para impulsionar a inovação e o progresso em áreas que dependem

da precisão e da exatidão das informações espaciais.

Espera-se que os resultados obtidos por meio desta rede proporcionem uma base sólida para avanços em diversas áreas, incluindo cartografia de alta precisão, monitoramento geodésico, planejamento urbano, estudos ambientais e outros. Além disso, esta iniciativa visa não apenas gerar conhecimento científico de alta qualidade, mas também fornecer ferramentas e informações práticas para o desenvolvimento e implementação de projetos de engenharia, infraestrutura e políticas públicas.

Material e métodos

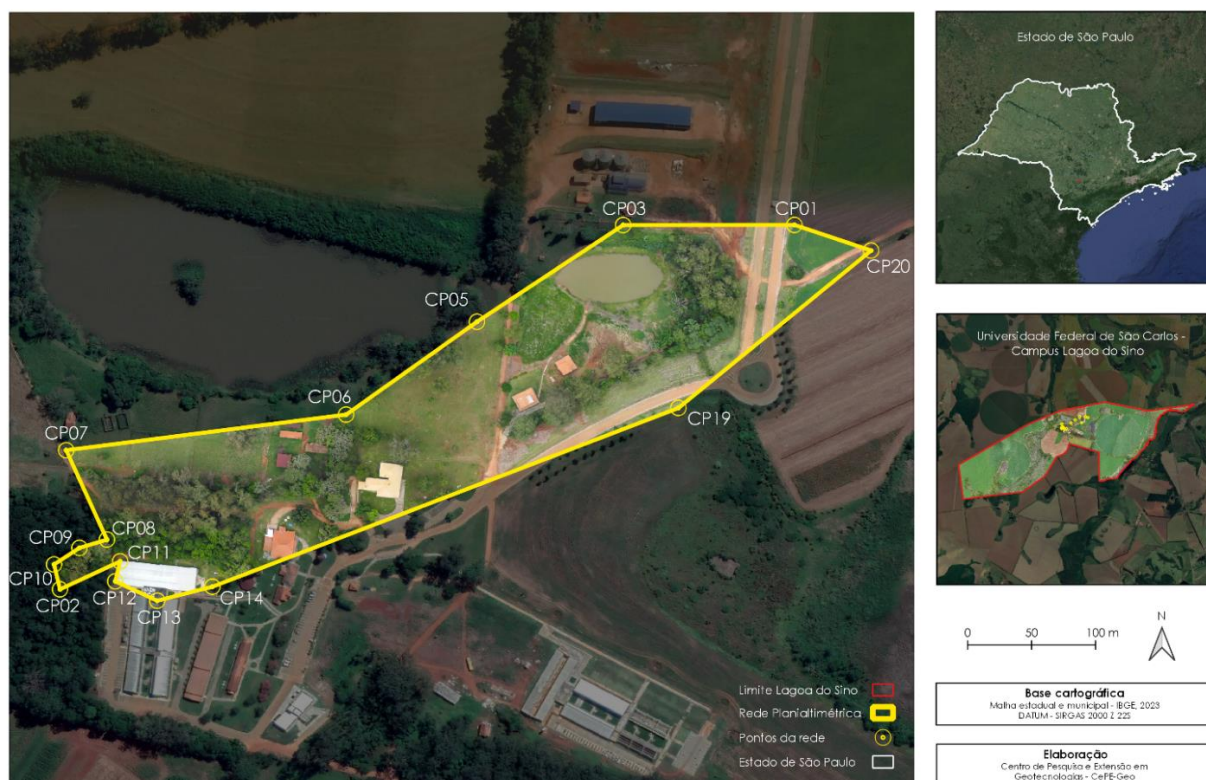
Nesta seção, seção será apresentada a área de estudo e os materiais e procedimentos

metodológicos adotados visando atender aos objetivos deste trabalho serão descritos.

Área de estudo

O estudo foi realizado no campus da Universidade Federal de São Carlos, denominado Lagoa do Sino, localizado na cidade de Buri, no sudoeste do Estado de São Paulo. O campus abrange uma área de 643,3421 hectares e encontra-se a aproximadamente seis quilômetros de Campina do Monte Alegre-SP, nas proximidades do rio Paranapanema. Suas coordenadas centrais são 23°47'51" S e 48°35'34" W. A Figura 1 ilustra a área de estudo e a poligonal gerada pela implementação da Rede Cepegeo.

Figura 1: Planta de situação da Rede Cepegeo.



Materiais

Os marcos foram confeccionados em concreto, com 40 cm de altura e 18 cm de diâmetro no topo, e cada um possui uma chapa metálica contendo a identificação correspondente ao ponto. Em relação aos equipamentos utilizados, para as técnicas de topografia convencional, foi empregada uma estação total da marca Topcon,

modelo GTS-239W, nos levantamentos planimétricos, e um nível da marca Geotech, modelo DSZ3-A32X, acompanhado de uma mira graduada de alumínio de 4 metros de altura, para os levantamentos altimétricos. O processamento dos dados foi realizado por meio de planilhas Excel para cálculos manuais e do software Topcon Link para o processamento computacional.

Nos levantamentos geodésicos, utilizou-se um receptor GNSS de alta precisão da marca Trimble, modelo Spectra Precision 60 (SP60). O processamento dos dados foi realizado no software Survey Office e no site PPP do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para processamento absoluto.

Metodologia – delineamento geral

Inicialmente, foram definidos os parâmetros técnicos a serem utilizados, e iniciou-

se a confecção dos marcos de concreto e das plaquetas identificadoras, bem como o estabelecimento dos locais para sua implantação.

Em seguida, teve início a execução dos levantamentos. Após a coleta dos dados, procedeu-se com o cálculo e processamento das informações, que foram tabuladas e analisadas. Por fim, as coordenadas finais foram ajustadas e suas respectivas precisões homologadas por meio de memoriais descritivos de cada marco.

A Figura 2 apresenta o delineamento geral deste trabalho.

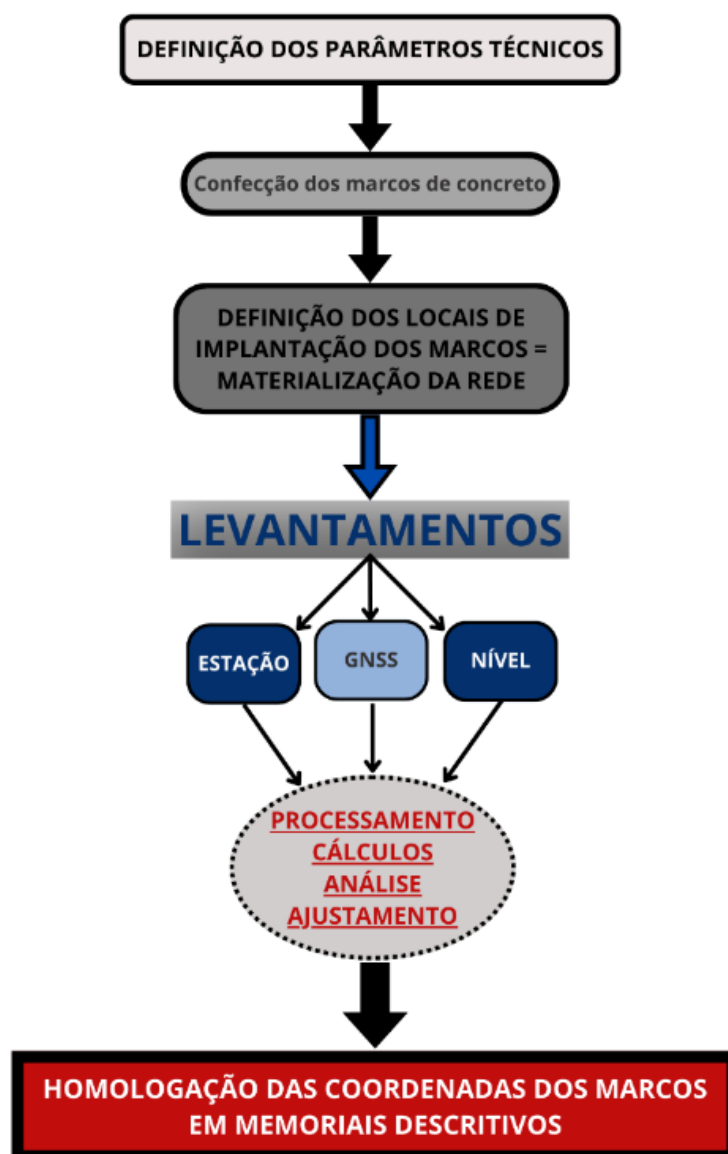


Figura 2: Delineamento geral da metodologia

A seguir descreveremos detalhadamente as etapas desenvolvidas neste trabalho, apresentadas na figura anterior.

Definição dos parâmetros iniciais

Neste trabalho, para a definição dos parâmetros técnicos a serem empregados, foram utilizados os documentos “Instruções para Homologação de Estações Estabelecidas por Outras Instituições”, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e o “Manual Técnico para Georreferenciamento de Imóveis Rurais”, do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF).

Definição dos vértices e materialização da rede

Posteriormente, foram escolhidos os locais que compuseram a rede, com a seleção dos pontos levando em consideração as diversas situações

encontradas pelos profissionais das áreas de mensuração.

Os vértices foram implantados tanto em áreas adjacentes a florestas quanto em locais com cobertura florestal, além de pontos em áreas a céu aberto, denominadas “situação ideal”, com o objetivo de atender às exigências para vértices base nas técnicas de posicionamento relativo.

Também foram implantados marcos em locais a céu aberto, próximos a encostas de morros, corpos d’água e edificações. Os vértices da rede foram identificados como Cepegeo + número (de 01 a 20), sendo que a sigla utilizada para denominação foi CP + número (por exemplo, CP01). A Tabela 1 apresenta os vértices e as condições físicas consideradas para a materialização dos mesmos.

Tabela 1: *Vértices da Rede Cepegeo e as condições físicas dos mesmos, bem como principal fator que pode ocasionar erros quando efetua-se levantamentos utilizando GNSS.*

Vértice	Condição
CP01 e CP20	Situação ideal = céu aberto, e não há estruturas físicas próximas, como edificações, florestas e corpos d’água e/ou encostas de terreno (declividade)
CP19	Céu aberto, mas próximo à encosta de morro (3,5 metros)
CP03 CP07	Distância entre 100 e 140 metros de corpo d’água; Distância entre 4 e 10 metros de edificações
CP05 CP06	Distância entre 10 e 50 metros de corpo d’água;
CP08 e CP09	Adjacência de floresta e/ou clareira em floresta
CP10	Floresta, com copa de média densidade
CP02	Floresta, com copa de alta densidade
CP11 e CP12	Adjacência de floresta e distantes entre 1,5 e 3 metros de edificações
CP13	Cercado por edificações em todas as direções
CP14	Céu aberto, porém próximo à encosta de morro (distante 2 metros) e de edificação (distante 10 metros)

Levantamentos, cálculos e processamentos para definição das coordenadas dos vértices

Com o objetivo de obter as coordenadas com a máxima precisão para todos os marcos, foram realizados levantamentos utilizando técnicas de Topografia Convencional, empregando as metodologias de Poligonação para definição das coordenadas planimétricas e Nivelamento Geométrico Composto para a obtenção das coordenadas altimétricas. Além disso, foram efetuados levantamentos com receptores geodésicos de alta precisão para a obtenção das coordenadas por posicionamento GNSS, nas técnicas relativo-estático e PPP.

Poligonação

Neste método, todos os vértices da área de estudo formaram a poligonal de interesse, e o levantamento teve início e término nos vértices CP01 e CP20 (conhecidos). Isso permitiu a triangulação entre os vértices, as linhas de interesse e os vértices e linhas de referência levantados, possibilitando o cálculo do erro angular e linear, bem como as correções proporcionais durante o processamento.

Para o processamento das coordenadas no software Topcon Link, foram inseridas as coordenadas dos vértices de referência, configurando-os como pontos de controle de erros.

No material suplementar, disponibilizamos a tabela de campo que mostra a sequência utilizada no levantamento por poligonização, assim como a sequência do cálculo manual, na qual os vértices de referência também foram usados como pontos de controle de erros.

A classificação dos erros da poligonal foi realizada conforme o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC), estabelecido pelo Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984.

Nivelamento Geométrico Composto com contranivelamento

Neste método, para a obtenção das altitudes, o nível foi posicionado entre os vértices de interesse, e a mira foi instalada sobre eles. Após a realização das leituras nas miras, os desníveis foram calculados. Considerando o vértice CP01 como referência, as altitudes dos demais marcos foram determinadas com base nos desníveis calculados (Sinegalia, 2022).

No material suplementar, disponibilizamos a tabela de campo que demonstra a sequência empregada no levantamento de nivelamento geométrico, juntamente com as fórmulas utilizadas.

Para classificar a qualidade posicional altimétrica, foram considerados os parâmetros da NBR 13.133. De acordo com o erro encontrado, a poligonal pode ser classificada em Classe IN (quando os erros são inferiores a $12 \text{ mm}/\sqrt{k}$, sendo "k" a distância horizontal total percorrida durante o nivelamento, em quilômetros) ou em Classe IIN (para erros maiores que $12 \text{ mm}/\sqrt{k}$ e menores que $20 \text{ mm}/\sqrt{k}$).

Levantamentos utilizando receptores GNSS

Inicialmente, os vértices CP01 e CP20 foram levantados utilizando a metodologia de posicionamento relativo GNSS, com rastreios realizados por três dias consecutivos em horários semelhantes e outros três dias em horários diferentes, sempre em pares, com duração mínima de 4 horas por rastreio. O objetivo foi determinar as coordenadas desses vértices como pontos de referência da rede.

No processamento dos dados, para a técnica relativa, foram utilizadas as estações NEIA (RBMC, no município de Cananéia), SPC1 (no município de Campinas) e SPOR (no município de Ourinhos). A escolha dessas estações visou garantir uma configuração geométrica adequada para as linhas de base, atendendo aos parâmetros estabelecidos por Dorth (2010) para um processamento com linhas de base de classe A. Os parâmetros seguidos foram: i. Boa configuração

geométrica entre as estações de controle e os pontos desconhecidos, com linhas de base inferiores a 700 km; ii. Solução de ambiguidade satisfatória em todas as linhas de base; iii. PDOP (Diluidor de Precisão Posicional) inferior a 3 para todas as linhas de base; iv. Precisão horizontal e vertical inferior a 20 cm em todas as linhas de base.

Atualmente, existem cerca de 53 estações ativas (consulta em 09/01/2024). Também foram realizados testes de processamento com combinações dessas estações e com as estações SPS1 (Sorocaba) e SPBO (Botucatu).

Após o processamento, os dados foram ajustados utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e o Teste-Tau, com nível de significância de 5%. Na metodologia absoluta, os dados provenientes dos levantamentos dos vértices foram processados individualmente utilizando o PPP do IBGE. Vale destacar que todas as elevações foram calculadas e convertidas em altitudes elipsoidais utilizando a ondulação geoidal com o datum HNOR_Imbituba (IBGE, 2024a).

Por fim, todos os vértices foram levantados por no mínimo três dias, com rastreios de pelo menos 4 horas, e sempre com rastreios simultâneos entre dois vértices da rede, alternando entre os vértices a serem definidos e os de referência.

Ajustamento envolvendo os resultados de todos os levantamentos para homologação da rede

Neste trabalho, os dados foram ajustados considerando os pesos e as injunções, utilizando o Método Paramétrico e o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), e validados por meio do Teste Tau, com nível de significância de 5%.

Após a obtenção das coordenadas para cada marco e suas respectivas precisões, os resultados foram documentados em Memorial Descritivo.

Resultados

Materialização da Rede

Como mencionado, após a definição de todos os parâmetros e a confecção dos marcos, estes foram implantados nos locais previamente selecionados.

A figura 3 apresenta o marco CP01 implantado, e a figura 4 mostra a localização de todos os vértices que compõem a Rede Cepegeo, juntamente com as respectivas situações consideradas para sua implantação.



Figura 3: Vértice CP01 da Rede Cepegeo.

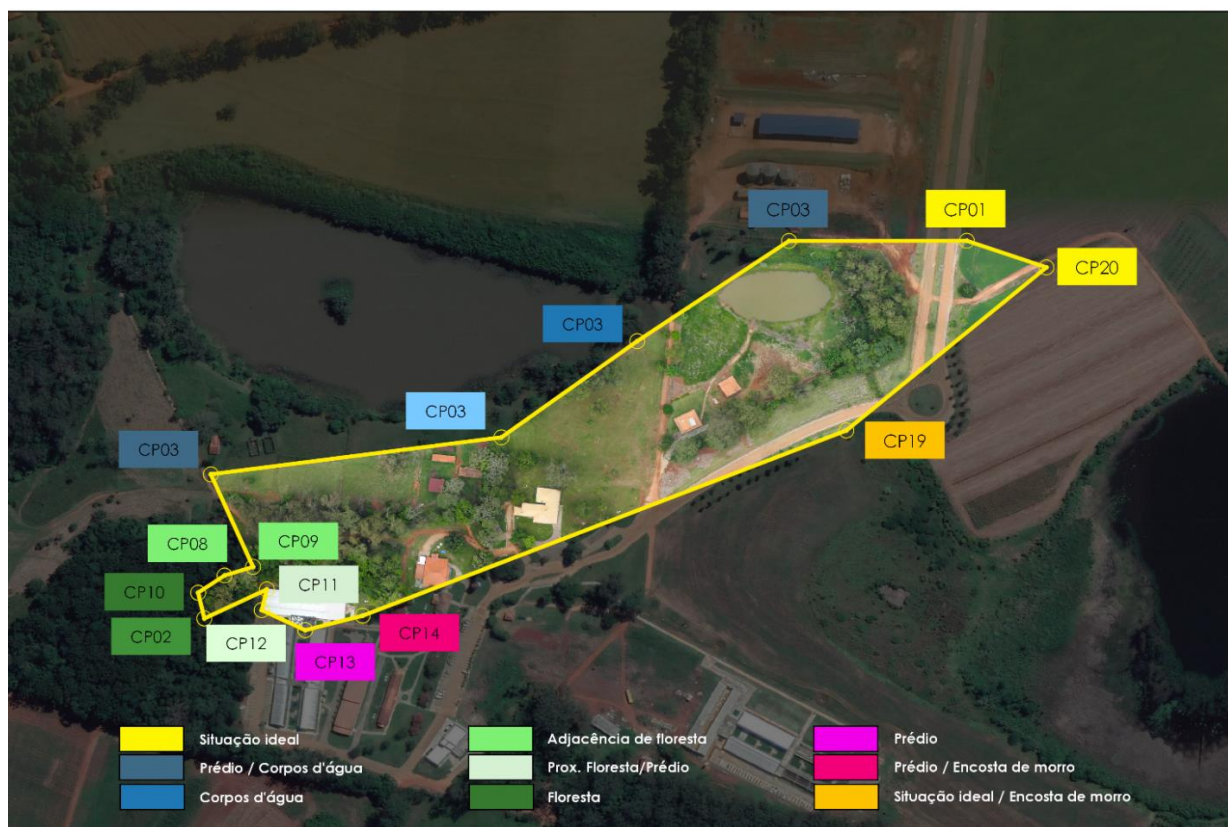


Figura 4: Localização dos vértices da Rede Cepegeo com destaque amarelo para os vértices próximos ou em florestas e destaque laranja para os vértices em situação ideal.

Coordenadas dos vértices de referência

A Tabela 2 apresenta as coordenadas advindas após o processamento e ajustamento de levantamentos executados utilizando receptores GNSS, e processados de acordo com tal metodologias, para os vértices CP01 e CP20..

Posteriormente os dados receberam tratamento estatístico e a Tabela 3 apresenta as coordenadas finais homologadas (consideradas de referência) dos vértices CP01 e CP20.

Vale ressaltar que em ambas as tabelas, a coordenada E obtida pelo PPP foi desconsiderada

3780

por caracterizar viés estatístico (por isso está grifada).

Tabela 2: Coordenadas oriundas do posicionamento relativo com GNSS para o CP01.

CP01	Coordenadas UTM			PRECISÃO		
02/03/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Survey	7386020,568	140160,148	633,83	0,011	0,011	0,273
Topcon	7386020,563	140160,139	633,826	0,01	0,009	0,014
PPP	7386020,558	140160,068	633,84	0,002	0,007	0,009
21/03/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Survey/Topcon	7386020,571	140160,13	633,814	0,11	0,11	0,074
PPP	7386020,561	140160,145	633,907	0,11	0,11	0,074
04/07/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Survey/Topcon	7386020,575	140160,136	633,95	0,005	0,023	0,042
PPP	7386020,589	140160,126	633,935	0,002	0,002	0,004
06/07/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Survey/Topcon	7386020,56	140160,152	634,016	0,14	0,15	0,1
PPP	7386020,583	140160,134	633,91	0,001	0,002	0,003

CP20	Coordenadas UTM			PRECISÃO		
02/03/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Surveys	7386000,338	140220,638	632,554	0,008	0,008	0,272
Topcon	7386000,338	140220,63	632,551	0,011	0,01	0,014
PPP	7386000,332	140220,572	632,54	0,001	0,003	0,003
10-12/02/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Survey/Topcon	7386000,348	140220,624	632,518	0,006	0,006	0,009
PPP	7386000,331	140220,638	632,538	0,001	0,001	0,003
18/08/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Survey/Topcon	7386000,313	140220,624	632,55	0,01	0,011	0,022
PPP	7386000,344	140220,614	632,69	0,001	0,001	0,003
21/08/2023	N	E	H (Elip.)	σ_n	σ_e	σ_H
Survey/Topcon	7386000,326	140220,63	632,531	0,005	0,004	0,009
PPP	7386000,321	140220,633	632,521	0,002	0,002	0,004

Tabela 3: Coordenadas UTM Rede Cepegeo – Fase 1.

Vértice	N	σ_n	E	σ_e	Helip	σ_z
CP01	7386020,568	0,003	140160,141	0,009	633,870	0,013
CP20	7386000,336	0,005	140220,634	0,015	632,534	0,018

De posse das coordenadas homologadas, foram gerados documentos com todas as informações geodésicas inerentes à cada vértice (Memorial Descritivo).

A Figura 5 apresenta o memorial descritivo do Vértice CP01 e o memorial completo do referido vértice pode ser obtido contatando-se o CePe-Geo.



CePE-Geo
Centro de Pesquisa e Extensão em Geotecnologias

REDE PLANIALTIMÉTRICA DE PRECISÃO CEPEGEO

Relatório de Informação de Marco

CP01

1. Identificação do vértice

Identificação/ Código: **CP01**

Nome do Vértice: CEPEGEO-01



2. Informações sobre a localização

Cidade: Buri

Estado: São Paulo (SP)

Informações Adicionais: Marco de concreto com plaqueta de identificação. Próximo à portaria da Universidade Federal de São Carlos – campus Lagoa do Sino. Rodovia Lauri Simões de Barros, km 12 - SP-189 – Aracaçu.



3. Coordenadas Oficiais

SIRGAS2000 (Época 2000.4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 23° 35' 47,060207''	Sigma:	0,003 m
Longitude:	- 48° 31' 31,542296''	Sigma:	0,009 m
Alt. Elipsoidal:	633,87 m	Sigma:	0,013 m
Alt. Geométrica:	630,187 m		
*Ondulação Geoidal (HNOR_IMBITUBA) = -3,73m			
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	7.386.020,568 m		
UTM (E)	140.160,141 m		
MC:	-45		

4. Informações Adicionais

Coordenadores (as) CePE-Geo

Prof. Dr. Paulo Guilherme Molin

Prof. Dr. André Marcondes Andrade Toledo

Coordenador(a) da Rede Cepegeo

Eng^a. Cartógrafa Me Melodie Kern Sarubo

Dorth Sinegalia

Figura 5: Memorial Descritivo CP01.

Coordenadas dos vértices da rede: Topografia Convencional

A tabela 4 apresenta as coordenadas calculadas e corrigidas obtidas através dos

levantamentos e processamentos oriundos da Topografia Convencional.

Tabela 4: Coordenadas obtidas através por poligonação, com cálculo manual e via Topcon Link.

Vértice	N (m) manual	E (m) manual	N (m) Topcon Link	E (m) Topcon Link	H (m) Topcon Link	H (m) Niv. Geom.
CP20	7386000,336	140220,634	7386000,336	140220,634	632,534	632,534
CP01	7386020,568	140160,141	7386020,568	140160,141	633,87	633,87
CP03	7386017,168	140026,153	7386017,165	140026,167	633,083	633,133
CP05	7385932,389	139913,833	7385919,515	139983,668	632,771	633,019
CP06	7385851,175	139813,397	7385932,376	139913,859	633,008	633,962
CP07	7385815,540	139595,169	7385851,164	139813,428	633,845	638,704
CP08	7385740,596	139628,904	7385815,525	139595,211	638,81	640,734
CP09	7385733,045	139607,590	7385740,58	139628,948	640,489	640,651
CP10	7385718,501	139588,038	7385733,034	139607,652	640,875	641,432
CP02	7385697,555	139593,210	7385722,419	139639,738	641,567	641,715
CP11	7385722,436	139639,693	7385705,365	139636,304	641,57	641,820
CP12	7385705,382	139636,259	7385718,492	139588,103	641,65	641,864
CP13	7385689,786	139669,478	7385697,545	139593,276	641,984	641,886
CP14	7385702,714	139712,417	7385689,767	139669,527	641,592	640,182
CP19	7385863,243	140073,327	7385702,7	139712,487	639,876	629,495

Coordenadas dos vértices da rede: Receptores GNSS

Os demais vértices da rede também foram levantados por posicionamento relativo, efetuando-se rastreios por três dias em horários semelhantes e outros três dias em horários diferentes sempre em pares, por no mínimo 4 horas. Na etapa de processamento utilizou-se o software Survey Office, com as mesmas estações da RBMC como pontos de controle. Também procedeu-se o processamento pelo PPP do IBGE.

Posteriormente tais dados foram ajustados utilizando MMQ e teste Tau para controle da qualidade.

Homologação dos demais vértices da rede

Os dados de todos os levantamentos foram tabulados, analisados e ajustados utilizando o MMQ e validados pelo Teste Tau, a um nível de significância de 5%. A tabela 5 apresenta as coordenadas homologadas e as respectivas precisões de todos os vértices.

Tabela 5: Coordenadas UTM Rede Cepegeo.

Ponto	N	σ_n	E	σ_e	Elip	σ_z
CP01	7386020,568	0,003	140160,141	0,009	633,834	0,013
CP02	7385697,555	0,007	139593,210	0,047	641,715	0,190
CP03	7386017,168	0,002	140026,153	0,010	633,132	0,035
CP05	7385932,389	0,009	139913,833	0,018	633,019	0,008
CP06	7385851,175	0,008	139813,397	0,022	633,963	0,083
CP07	7385815,540	0,011	139595,169	0,029	638,702	0,076
CP08	7385740,596	0,011	139628,904	0,031	640,735	0,174
CP09	7385733,045	0,008	139607,590	0,044	640,653	0,157
CP10	7385718,501	0,007	139588,038	0,046	641,432	0,154
CP11	7385722,436	0,012	139639,693	0,032	641,820	0,179
CP12	7385705,382	0,012	139636,259	0,032	641,863	0,207
CP13	7385689,786	0,013	139669,478	0,035	641,886	0,169
CP14	7385702,714	0,010	139712,417	0,050	640,180	0,215

CP19	7385863,243	0,009	140073,218	0,009	629,495	0,041
CP20	7386000,336	0,005	140220,634	0,015	632,534	0,018

Discussão dos Resultados

As florestas tropicais desempenham um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, armazenando grandes quantidades de carbono em sua biomassa e na matéria orgânica presente no solo. Esse armazenamento é fundamental para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ajudando a controlar o aquecimento global. Nesse contexto, a utilização de dados provenientes de inventários florestais, associados a modelos de interpolação geoestatística e geotecnologias, torna-se imprescindível, pois oferece uma maneira precisa e eficiente de obter variáveis florestais com custos reduzidos (da Costa & Quintanilha, 2024).

As geotecnologias, como Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e levantamento com GNSS, são ferramentas poderosas para a melhoria desses dados. Para garantir a precisão exigida, é comum o uso de pontos de controle geodésicos, levantados por GNSS, que servem tanto para validar as medições de campo quanto para referenciar as parcelas florestais (Keefe et al., 2019).

No entanto, para que esses dados geoespaciais atendam aos requisitos de qualidade, é essencial que sejam suportados por uma infraestrutura geodésica robusta. Redes geodésicas desempenham um papel fundamental na validação e correção dos erros de mensuração, além de promoverem a integração de dados geoespaciais provenientes de diversas fontes. A ausência de uma rede geodésica adequada pode comprometer gravemente a análise e interpretação dos dados, afetando a precisão das informações geoespaciais (Weiss et al., 2022).

Atualmente, os GNSS fornecem dados precisos para observações em todo o mundo, graças ao crescente número de satélites de diferentes operadores, além de tecnologias mais avançadas e potentes. Isso é acompanhado pela implementação de modelos matemáticos e físicos que descrevem com maior precisão os erros sistemáticos que afetam as observações GNSS, como os efeitos ionosféricos, troposféricos, relativísticos e de multipercurso, no entanto, a combinação adequada dos métodos de medição resulta em dados ainda mais precisos, proporcionando melhores resultados de medição ou estimativas mais confiáveis de parâmetros desconhecidos (França et al. 2022).

Este trabalho visou a implantação de uma rede geodésica, combinando métodos de topografia convencional e posicionamento GNSS, com o intuito de garantir a melhor qualidade posicional para os vértices dessa rede. A densificação de levantamentos geodésicos por meio de técnicas clássicas de posicionamento, como as estações totais, pode ser necessária em razão da qualidade do posicionamento fornecido pelo Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) (França et al. 2021).

A integração de levantamento topográfico convencional com GNSS oferece uma abordagem abrangente e precisa para a construção de uma estrutura geoespacial confiável. Esse modelo integrado é superior aos métodos tradicionais isolados, proporcionando maior cobertura e precisão, o que é essencial para atender aos requisitos de projetos de grande escala (Kobryń, 2019).

Atualmente, a Rede Geodésica de Precisão Cepegeo é composta por 15 vértices materializados e homologados. Ela foi desenvolvida para atender às necessidades de posicionamento e referenciamento espacial no ambiente acadêmico e científico. No entanto, os resultados obtidos por meio de sua implantação evidenciam a importância de tal infraestrutura, demonstrando sua confiabilidade e aplicabilidade em diversos setores da sociedade, além do campo científico.

Dentre os desafios encontrados na materialização da rede, destaca-se a escolha dos vértices que compõem a rede, um processo que exigiu balancear os objetivos do estudo com os parâmetros técnicos recomendados pelos documentos orientadores da implantação. Também surgiram dificuldades relacionadas às metodologias de levantamento, especialmente na topografia convencional, que demandou a intervisibilidade entre, no mínimo, três vértices da rede para possibilitar a obtenção de ângulos e a amarração da rede. Em relação aos levantamentos com GNSS, a principal dificuldade foi a mobilização intensa de recursos humanos e materiais, uma vez que cada vértice precisou ser ocupado por, no mínimo, três dias, com rastreios de pelo menos quatro horas para garantir a precisão necessária.

Outro problema significativo foi a manutenção dos marcos, que sofreu com quebras nas estruturas, remoção de plaquetas de

identificação e, em alguns casos, a construção de edificações próximas aos vértices, o que inutilizou alguns marcos. A partir dessa identificação, a expansão da rede foi iniciada em duas fases adicionais, utilizando as mesmas metodologias, com o objetivo de atender às crescentes demandas do grupo Cepegeo. A construção de uma quadra esportiva próxima ao vértice CP01, ponto de referência para este estudo, também exigiu a ampliação da rede. As fases 2 e 3, ainda em levantamento, adicionarão cerca de 10 vértices à Rede Cepegeo. A incorporação de pontos adicionais a uma rede geodésica aumenta a redundância das medições, permitindo uma avaliação mais precisa dos erros e uma melhor estimativa dos parâmetros geodésicos, resultando em maior confiança nos dados (Weiss et al., 2022).

Quanto à qualidade dos levantamentos realizados com a topografia convencional, a técnica de poligonação, com cálculos manuais via planilha, obteve resultados que destacam sua eficácia no estabelecimento e triangulação entre os vértices da rede. Para o componente planimétrico, a precisão foi de $3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$, o que é considerado de alta precisão de acordo com a NBR 13.133.

Já o componente altimétrico apresentou precisão de 0,72 m, classificada como classe IIN ($12 \text{ mm}/\sqrt{k}$) pela mesma norma. Embora a NBR 13.133 determine que apenas o nivelamento geométrico alcance essa qualidade, a utilização de instrumentos avançados e a execução cuidadosa das medições permitiram formar poligonais com ângulos e distâncias consistentes, garantindo a integridade da rede, inclusive no componente altimétrico.

Um fator relevante foi a discrepância nas coordenadas calculadas pelo software Topcon Link, que apresentaram uma diferença acumulada de até 5 cm no componente planimétrico e de 20 cm no altimétrico. Esse desvio deve-se ao fato de que o cálculo manual foi realizado com base no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), utilizando injunções com os vértices de referência, o que proporcionou um refinamento estatístico dos resultados.

Para a definição das coordenadas altimétricas, a utilização do nivelamento geométrico composto, com contranivelamento, foi crucial. Essa técnica não só permitiu uma maior precisão no componente altimétrico, como também possibilitou ajustes e validações importantes para as metodologias empregadas, além de fornecer uma análise precisa da acurácia de outras técnicas. A conformidade com as especificações da NBR

13.133 garantiu maior confiabilidade nos resultados.

Por fim, a utilização do método relativo de posicionamento com diferentes tempos de rastreio contribuiu significativamente para a melhoria da precisão posicional. A combinação dessas metodologias — poligonação, nivelamento geométrico e GNSS — não apenas garantiu resultados robustos e de alta qualidade, como também proporcionou redundância nas medições, permitindo verificações cruzadas e aumentando a confiabilidade das coordenadas finais homologadas para os vértices da rede. Essa abordagem integrada, que combina o melhor de cada metodologia, assegura a robustez da rede geodésica e oferece um padrão de qualidade que pode ser replicado em outras aplicações de georreferenciamento e monitoramento ambiental.

Conclusão

As redes geodésicas desempenham um papel fundamental para os profissionais das áreas de mensuração, pois não só aprimoram a qualidade posicional dos vértices levantados, mas também permitem a validação e correção de erros que afetam a precisão dos levantamentos. Além disso, essas redes viabilizam a integração eficiente de dados geoespaciais, conferindo robustez aos dados adquiridos e garantindo maior confiabilidade nas análises subsequentes. Em um cenário no qual a precisão é essencial para diversas áreas do conhecimento e da prática profissional, a infraestrutura geodésica de qualidade é indispensável.

Neste contexto, o presente trabalho detalha todas as etapas envolvidas na implantação de uma rede geodésica de precisão, com o objetivo de atender aos elevados parâmetros de qualidade posicional e de abordar situações práticas comumente encontradas pelos profissionais de mensuração. A execução de uma rede geodésica com essas características visa proporcionar uma infraestrutura sólida que possa ser replicada em outros projetos de grande escala, beneficiando tanto o meio acadêmico quanto a comunidade profissional.

Os desafios enfrentados ao longo deste processo, como a escolha criteriosa dos vértices, a mobilização extensiva de recursos para os levantamentos GNSS e a necessidade constante de manutenção dos marcos, evidenciam a importância de uma rede geodésica bem estruturada e mantida. Essas dificuldades destacam, ainda, a necessidade de um planejamento adequado, que contemple

todas as variáveis envolvidas, desde a escolha dos pontos de referência até a sua preservação no tempo. A integração das metodologias de levantamento adotadas – poligonização, nivelamento geométrico e GNSS – resultou em uma rede de alta qualidade posicional, cumprindo os padrões exigidos pelas normas técnicas e proporcionando dados confiáveis para as análises posteriores. Essa abordagem multidisciplinar, que combina diferentes técnicas de mensuração, se mostrou essencial para o sucesso de projetos geodésicos complexos.

A implantação dessa rede, utilizando métodos de topografia convencional e posicionamento GNSS, foi crucial para a criação de uma estrutura geoespacial local precisa e confiável. A combinação de técnicas tradicionais com as tecnologias mais avançadas, como o GNSS, proporcionou uma cobertura ampla e uma precisão que superou os métodos isolados (Kobryń, 2019).

A integração de diferentes métodos de levantamento – como a poligonização e o nivelamento geométrico – fortaleceu ainda mais a confiabilidade da rede, assegurando a consistência dos dados, mesmo frente às adversidades encontradas durante a materialização e manutenção da rede.

Além disso, o trabalho contribui para o entendimento da importância de uma infraestrutura geodésica bem mantida, especialmente em um país com dimensões continentais como o Brasil, onde a escassez de redes geodésicas de alta precisão pode comprometer projetos de grande impacto. A implantação e manutenção de redes como a Cepegeo são fundamentais não apenas para o aprimoramento da mensuração geoespacial, mas também para o avanço das pesquisas científicas e o planejamento de grandes projetos de infraestrutura, como os relacionados à gestão ambiental, ao ordenamento territorial e ao desenvolvimento urbano sustentável.

A Rede Geodésica Cepegeo representa um avanço significativo para a comunidade científica e profissional, servindo como modelo para a criação de outras redes geodésicas interconectadas em nível nacional. Espera-se que este trabalho inspire futuros estudos e investimentos na expansão da infraestrutura geodésica, principalmente no que se refere à interconexão de diferentes redes e à incorporação de novas tecnologias de medição. Redes geodésicas robustas e bem estruturadas são cruciais para impulsionar a inovação e o progresso nas áreas que dependem de informações espaciais precisas, como a cartografia,

o planejamento urbano, a agricultura de precisão, a geologia e o monitoramento ambiental.

Investir na expansão e atualização dessas redes não só preenche as lacunas identificadas ao longo deste estudo, como também contribui para o fortalecimento da infraestrutura geodésica nacional, promovendo a integração entre diferentes áreas do conhecimento e impulsionando a sustentabilidade e o desenvolvimento científico e tecnológico do país.

Agradecimentos

Todos os autores agradecem FAPESP por “Estratégia para a Mata Atlântica” (#2021/11940-0) e “NewFor” (#2018/18416-2).

PGM agradece FAPESP por “Biota Síntese” (#2020/06694-8).

MKSDS, PFF e PGM agradecem o Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis (PPGPUR).

Todos os autores agradecem o Centro de Pesquisa e Extensão em Geotecnologias (CePE-Geo).

Referências

- Alves, J. D. G. 2023. Possibilidades e desafios no uso de drone para mapeamento de comunidades tradicionais na Amazônia. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 16-5, p2594-2608. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2594-2608>
- Atiz, O. F., Shakor, A. Q., Ogutcu, S., & Alcay, S. 2023. Performance investigation of Trimble RTX correction service with multi-GNSS constellation. *Survey Review* [online] 55(388). Disponível: <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1080/00396265.2021.1999128>. Acesso: 12 abril 2024.
- Ball, J. G. C., Hickman S. H. M., Jackson, T. D., Koay, X. J., Hirst, J., Jay, W., Archer, M., Aubry-Kientz, M., Vincent, G., Coomes, D. A. 2023. Accurate delineation of individual tree crowns in tropical forests from aerial RGB imagery using Mask R-CNN. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* [online] 9. Disponível: <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1002/rse.2.332>. Acesso: 12 abril 2024.
- Caizzone, S., Schönfeldt, M., Elmarissi, W., Ciciu, M.-S., 2021. Antennas as Precise Sensors for GNSS Reference Stations and High-Performance PNT Applications on Earth and in Space. *Sensors* [online] 21. Disponível:

- <https://doi.org/10.3390/s21124192>. Acesso: 08 abril 2024.
- Cevik, I.C., Atik, M. E. & Duran, Z., 2024. Investigation of Optimal Ground Control Point Distribution for Geometric Correction of VHR Remote Sensing Imagery. *J Indian Soc Remote Sens* 52 359–369 Disponível: <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12524-024-01826-0>
- Costa, J. D. M. da, & Quintanilha, J. A., 2024. Uso das Geotecnologias na Estimativa de Biomassa e Carbono Florestal: Uma Revisão. *Revista Brasileira De Geografia Física* [online] 17(2). Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1127-1146>. Acesso: 08 abril 2024.
- Dantas, F. K. D., & Costa, F. R. da, 2024. Altimetria e planimetria, análise de métodos fotogramétricos por vant versus topografia convencional. *Pensar Geografia* [online] 7(1), Recuperado de <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/PGEO/article/view/4457> (Original work published 1º de janeiro de 2024). Acesso: 31 março 2024.
- Dupuis C., Lejeune P., Michez A., Fayolle A., 2020. How Can Remote Sensing Help Monitor Tropical Moist Forest Degradation?—A Systematic Review. *Remote Sensing* [online] 12(7). Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs12071087>. Acesso: 08 nov. 2023.
- França R. M., Klein I., Veiga L.A.K., 2021. The influence of the deflection of the vertical on geodetic surveys in Brazil. *Bol Ciênc Geodésicas*, 27(spe). Disponível: <https://doi.org/10.1590/s198221702021000s00020>
- França, R.M., Klein, I. & Veiga, L.A.K., 2022. Quality of the deflection of the vertical obtained from global geopotential models in horizontal geodetic positioning. *Appl Geomat* 14, 795–810. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00473-9>
- Freitas K.X.S., Nascimento L.A., Dal Poz, W.R., 2022. Análise da influência ionosférica e solar na acurácia do IBGE-PPP utilizando séries temporais. *Revista Brasileira de Geomática* [online] 10. Disponível: DOI: 10.3895/rbgeo.v10n1.14495. Acesso: 23 nov. 2023.
- Gemael C., 1994. Introdução ao Ajustamento de Observações – Aplicações Geodésicas. Livro. Curitiba: Editora da UFPR.
- Gómez C., Alejandro P., Hermosilla T., Montes F., Pascual C., Ruiz L. A., Álvarez-Taboada F., Tanase M., Valbuena R., 2019. Remote sensing for the Spanish forests in the 21st century: a review of advances, needs, and opportunities. *Forest Systems* [online] 28(1):eR001. Disponível: <https://doi.org/10.5424/fs/2019281-14221>. Acesso: 06 abril 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024a. Atlas Geográfico Escolar: Sistema Global de Navegação Por Satélite – GNSS. Acesso: 18 mar. 2024.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2024b. Instruções para homologação de estações estabelecidas por outras instituições. Acesso: 18 mar. 2024.
- Javadi, P., García-Asenjo, L., Luján, R., & Lerma, J. L. (2024). Assessment of Panorama Photogrammetry as a Tool for Long-Range Deformation Monitoring. *Sensors*, 24(11), 3298. <https://doi.org/10.3390/s24113298>
- Jin, S., Wang, Q., Dardanelli, G., 2022. A Review on Multi-GNSS for Earth Observation and Emerging Applications. *Remote Sensing* [online] 14. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs14163930>. Acesso: 11 abril 2024.
- Keefe, R.F.; Wempe, A.M.; Becker, R.M.; Zimbelman, E.G.; Nagler, E.S.; Gilbert, S.L.; Caudill, C.C. Positioning Methods and the Use of Location and Activity Data in Forests. *Forests* [online] 10, 458. Disponível: <https://doi.org/10.3390/f10050458>. Acesso: 15 abril 2024.
- Kim, E., Kim, S-k. 2022. Global Navigation Satellite System Real-Time Kinematic Positioning Framework for Precise Operation of a Swarm of Moving Vehicles. *Sensors* [online] 22. Disponível: <https://doi.org/10.3390/s22207939>. Acesso: 12 abril 24.
- Kobryń, A. 2019. Multicriteria Decision Making in Geodetic Network Design. *Journal of Surveying Engineering* [online] 146. Disponível: [https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000301](https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000301). Acesso: 11 abril 2024.
- Krueger, C. P., Junior, P. S. de O., Garnés, S. J. dos A., Alves, D. B. M., Euriques, J. F., 2020. Posicionamento GNSS em Tempo Real:

- Evolução, Aplicações Práticas e Perspectivas para o Futuro. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 72. Disponível: <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>. Acesso: 10 abril 2024.
- Liang, Y., Kou, W., Lai, H., Wang, J., Wang, Q., Xu, W., Wang, H., Lu, N., 2022. Improved estimation of aboveground biomass in rubber plantations by fusing spectral and textural information from UAV-based RGB imagery. *Ecological Indicators* [online] 142. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109286>. Acesso: 11 nov. 2023.
- Michels, N. B., Silva, R. M. da, Souza S. F. de, 2021. Georreferenciamento de imóveis rurais: análise de área entre topografia, RTK e sistema TM. *Revista Brasileira de Geomática* [online] 9. Disponível: <https://revistas.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/12734/8127>. Acesso: 10 abril 2024.
- Nero, M. A., Rocha, A. P., Mamede, C. G., Schuler, C. A. B., Temba, P. d. C., & Reinoso-Gordo, J. 2023. Positional accuracy in close-range photogrammetry through topography and geodesy. *Revista De Arquitectura* [online] 25(2). Disponível: [doi:https://doi.org/ez31.periodicos.capes.gov.br/10.14718/RvArq.2023.25.3659](https://doi.org/ez31.periodicos.capes.gov.br/10.14718/RvArq.2023.25.3659). Acesso: 11 abril 2024.
- Nishiwaki, A. A. M., Moura, M. S. B. de, Galvêncio, J. D., Oliveira, C. P. de, Silva, E. A., Lima, J. R. de S., ... Domingues, T. F., 2023. Uso do LiDAR na Estimativa de Atributos Florestais: Uma Revisão. *Revista Brasileira De Geografia Física* [online] 16(1). Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p505-527>. Acesso: 10 mar. 2024.
- Ocalan, T., Turk, T., Tunalioglu, N. et al. 2022. Investigation of accuracy of PPP and PPP-AR methods for direct georeferencing in UAV photogrammetry. *Earth Sci Inform* [online] 15, 2231–2238. Disponível: <https://doi.org/ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12145-022-00868-7>. Acesso: 20 dez. 2023.
- Paiva, A. A. de, Burim, S. C., Borges, P. A. F., & Anjos, C. S. dos., 2021. Avaliação da acurácia posicional de vértices obtidos por imagem de sensor orbital e aerofotogrametria para fins de georreferenciamento de imóveis rurais. *Revista Brasileira De Geografia Física* [online] 14(6), 3530–3541.
- Paula E. R., Monico J.F.G., Tsuchiya I.H., Valladares C.E., Costa S.M.A., Marini-Pereira L., Vani B.C., Moraes A.O., 2023. A Retrospective of Global Navigation Satellite System Ionospheric Irregularities Monitoring Networks in Brazil, *Journal of Aerospace Technology and Management* [online] 15. Disponível: <https://doi.org/10.1590/jatm.v15.1288>. Acesso: 23 nov. 2023.
- Peng, Y., Scales, W.A., Hartinger, M. et al., 2021. Characterization of multi-scale ionospheric irregularities using ground-based and space-based GNSS observations. *Satell Navig 2* [online] 14. Disponível: <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00047-x>. Acesso: 23 nov. 2023.
- Pourreza M., Moradi F., Khosravi M., Deljouei A., Vanderhoof M.K., 2022. GCPs-Free Photogrammetry for Estimating Tree Height and Crown Diameter in Arizona Cypress Plantation Using UAV-Mounted GNSS RTK. *Forests* [online] 13(11):1905. Disponível: <https://doi.org/10.3390/f13111905>. Acesso: 20 dez. 2023.
- Sefercik, U. G., Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ., Nazar, M., et al., 2023. 3D positioning accuracy and land cover classification performance of multispectral RTK UAVs. *International Journal of Engineering and Geosciences* [online] 8(2). Disponível: <https://doi.org/10.26833/ijeg.1074791>. Acesso: 20 dez. 2023.
- Setti Junior P. de T., SILVA C.M. da, Oliveira Junior P.S. de; Alves D.B.M., Monico J.F.G., 2020. Posicionamento multi-GNSS. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 72. Disponível: DOI: 10.14393/rbcv72nespecial50anos-56580. Acesso: 30 out. 2023.
- SIGEF (Sistema de Gestão Fundiária) 2024. Manual Técnico para Georreferenciamento de Imóveis Rurais” do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF). Acesso em 18 dez. 2023.
- Santana, T. A., Dalazoana, R. 2020. Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios. *Revista Brasileira de Cartografia* ISSN 1808-0936. Disponível: <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>. Acesso: 02 dez. 2024.
- Sinegalia, M.K.S.D., Santoro, G.B. and Molin, P.G. 2023. How have RPAS helped monitor forests and what can we apply in forest restoration monitoring?. *Restoration Ecology* [online] 32: e14061.

Disponível: <https://doi.org/10.1111/rec.1406>

1. Acesso: 13 dez. 2023.

- Rocha, A. G. B., & Rocha, R. B., 2021. A Cartografia ao longo da história da humanidade: importância e avanços técnicos. *Ensino Em Perspectivas*, [online] 2(2), 1–17. Recuperado de <https://revistas.uece.br/index.php/ensinoemrpectivas/article/view/4995>. Acesso: 12 abril 2024.
- Weiss, G., Slavomir, L., Gasinec, J., Stankova, H.; Cernota, P., Weiss, E., Weiss, R., 2022. Establishment of local geodetic networks based on least-squares adjustments of GNSS baseline vectors. *Advances in Geodesy and Geoinformation* [online] 71. Disponível: <https://doi.org/10.24425/gac.2022.141168>. Acesso: 20 jan. 2024.
- White J.C., Wulder M.A., Hermosilla T., Coops N.C., Hobart, G.W., 2017. A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment* 194: 303–321. Disponível: <https://doi-org.ez257.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.rse.2017.03.035>
- Haspel, M. 1996. LP-based accuracy improvement for UAVs. Nineteenth convention of electrical and electronics engineers in Israel, p440-443. Disponível: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/14b2a68e-a6f9-4b0a-9710-5c3653658b8f-0131592773/relevance/1>. Acesso em 03/12/2024.
- Zhang, Z., & Zhu, L., 2023. A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications. *Drones*, 7(6), 398. <https://doi.org/10.3390/drones7060398>