

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

EDUARDO DA ROSA AQUINO

ANÁLISE DO IMPACTO DA PRECISÃO POSICIONAL DE EQUIPAMENTOS MÓVEIS
SOBRE RESULTADOS DE PRODUÇÃO

Porto Alegre

2021

EDUARDO DA ROSA AQUINO

ANÁLISE DO IMPACTO DA PRECISÃO POSICIONAL DE EQUIPAMENTOS MÓVEIS
SOBRE RESULTADOS DE PRODUÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patricia Helena Lucas Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

Coordenador: Afonso Reguly

EDUARDO DA ROSA AQUINO

ANÁLISE DO IMPACTO DA PRECISÃO POSICIONAL DE EQUIPAMENTOS MÓVEIS
SOBRE RESULTADOS DE PRODUÇÃO

Esta dissertação de Mestrado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter – PPGE3M UFRGS _____

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti – DEMIN UFRGS _____

Dra. Taís Renata Câmara – Vale S.A. _____

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha irmã pela educação, apoio e incentivo para que eu conseguisse realizar e concluir esta etapa acadêmica.

Ao meu orientador professor Dr. Rodrigo Peroni pela orientação acadêmica e por acreditar no meu potencial, me ajudar no desenvolvimento deste trabalho, pela compreensão e por não desistir de me apoiar, depois de tantos contratempos que apareceram no caminho até a finalização deste trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM) pela estrutura disponibilizada para realização do trabalho.

Aos colegas de laboratório, em especial Irvyn Laurence, Eduardo Neto, Pedro Zydek, Douglas Alegre e Felipe Dille pelos incontáveis cafés e conversas descontraídas, pelas trocas de conhecimento e companheirismo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) e do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) por toda experiência e conhecimento compartilhados.

Ao Eder Griebeler, diretor executivo da FAST2 Mine que disponibilizou recursos para a aquisição do receptor utilizado no estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela provisão da bolsa de mestrado.

RESUMO

As constantes flutuações de preços no mercado de bens minerais e os altos custos envolvidos em um empreendimento mineiro contribuem para uma necessidade de maior controle em direção à otimização das operações. Essa tem sido uma exigência cada vez mais demandada por parte das empresas de mineração e o uso de novas tecnologias tem sido fundamental nesse quesito. Um dos principais controles realizados diz respeito à reconciliação de produção, cuja finalidade é comparar os resultados da extração principalmente em termos de teores e massas, com aquilo que foi previamente planejado. O principal objetivo deste estudo é identificar e analisar possíveis divergências de aderência entre os planos de lavra e a operação, oriundos da precisão posicional dos equipamentos de lavra, visando minimizar as perdas de minério e a diluição dos teores. Na maioria dos empreendimentos mineiros, o controle de uma operação de lavra é realizado através de um dispositivo terminal com GPS (*Global Positioning System*) embarcado nos equipamentos, o qual fornece além dos indicadores de desempenho operacionais, o posicionamento dos equipamentos, com precisão em escala métrica. Esse nível de precisão no plano de lavra, em termos de reconciliação, principalmente para o posicionamento de escavadeiras, pode gerar discrepâncias significativas se considerada a aderência geométrica à poligonal planejada de lavra. Sendo assim, a metodologia sugerida envolve a utilização de um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de precisão centimétrica e de baixo custo, que permite avaliar o posicionamento da escavadeira durante sua operação por pós-processamento dos dados, utilizando uma tecnologia conhecida como PPK (*Post-Processed Kinematic*). Através de um rastro de posicionamento, pôde-se realizar um comparativo entre as coordenadas registradas pelo receptor GNSS e pelo GPS - em um mesmo instante de tempo - para avaliar os erros posicionais que ocasionaram diferenças entre o que foi planejado e o que foi executado na operação de lavra. Os resultados demonstraram que o uso da metodologia permitiu identificar as divergências de aderência e a consequente diluição dos teores. O receptor GNSS especificado se mostrou uma boa ferramenta de auxílio na operação de lavra, capaz de avaliar a precisão posicional dos equipamentos e na realização de ações corretivas para que a diluição seja minimizada.

Palavras-chave: Aderência. Receptor GNSS. Precisão. PPK. Diluição.

ABSTRACT

The constant price fluctuations of mineral commodities and the high costs involved in mining industry contribute to a greater control need, towards the optimization of operations. This has been an increasing demand from mining companies, and the use of new technologies has been fundamental in this regard. One of the main controls performed deals with production reconciliation, comparing operational results, mainly in terms of grades and tonnes, with what was previously planned. The main objective of this study is to identify and analyze possible divergences in adherence between the mining plans and the operation, coming from mining equipment positioning, aiming to minimize ore losses and grade dilution. In most mining projects, the control of a mining operation is accomplished through a terminal device with GPS (Global Positioning System) built-in the equipment, which provides, beyond the operational key performance indicators, the positioning of the equipment, with precision in metric scale. This level of precision in the mining plan, in terms of reconciliation, especially for the positioning of excavators, can generate significant discrepancies if we consider the geometric adherence to the planned mining limits. Therefore, the suggested methodology involves the use of a low-cost and with centimetric precision GNSS (Global Navigation Satellite System) receiver, which allows to determine the excavator positioning during its operation by post-processing the data, using a technology known as PPK (Post-Processed Kinematic). Through a positioning path, it was possible to fulfill a comparison between the coordinates recorded by the GNSS receiver and by the GPS - at the same time interval - to evaluate the positional errors that caused differences between what was planned and what was executed in the mining operation. The results showed that the use of the methodology allowed the identification of adherence divergences and the possibility reduction of the grade dilution. The GNSS receiver proved to be a good tool to help the mining operation, capable of assessing the positional precision of the equipment to perform corrective actions to minimize dilution.

Keywords: Adherence. GNSS receiver. Precision. PPK. Dilution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma simplificado da metodologia proposta no estudo.....	17
Figura 2: Resumo esquemático do processo de reconciliação e questões-chave para análise. (Fonte: Modificado de Morley, 2003).....	20
Figura 3: Ilustração esquemática das diluições planejada e não planejada, representada em uma poligonal de lavra em seção plana.	22
Figura 4: Princípio do posicionamento baseado em satélites. (Fonte: Modificado de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle, 2008.....	24
Figura 5: Constelação de satélites GPS. (Fonte: Ghilani e Wolf, 2012).....	25
Figura 6: Distribuição dos satélites nos planos orbitais do GPS. (Fonte: Modificado de Robaina e Caten, 2006).....	26
Figura 7: Configuração dos satélites GLONASS. (Fonte: Seeber, 2003).....	29
Figura 8: Constelação Galileo. (Fonte: Seeber, 2003).....	33
Figura 9: Infraestrutura terrestre do sistema Galileo. (Fonte: Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle, 2008).....	34
Figura 10: Receptores base e <i>rover</i> com rádios internos compatíveis utilizados em levantamento RTK. (Fonte: Modificado de Ghilani e Wolf, 2012).....	37
Figura 11: Fluxograma esquemático da metodologia proposta.....	43
Figura 12: Especificações de dimensões do Reach M+. (Fonte: https://doc.emlid.com.br/reachm-plus/specs/).....	44
Figura 13: Antena multi-GNSS Tallysman. Fonte: https://loja.emlid.com.br/product/tallysman-multi-gnss-antenna/	45
Figura 14: Interface inicial do aplicativo ReachView.	46
Figura 15: Janela do item “ <i>Status</i> ”.	47
Figura 16: Janela RTK <i>Settings</i>	48
Figura 17: Janela <i>Logging</i>	49
Figura 18: Janela principal do RTKCONV.....	52
Figura 19: Janela <i>Options</i> do RTKCONV.	53
Figura 20: Janela principal do RTKPOST.	54
Figura 21: Aba <i>Setting1</i> da janela <i>Options</i>	55
Figura 22: SNR <i>Mask</i>	55

Figura 23: Aba <i>Setting2</i> da janela <i>Options</i> do RTKPOST.....	56
Figura 24: Aba <i>Output</i> da janela <i>Options</i>	57
Figura 25: Aba <i>Positions</i> da janela <i>Options</i> do RTKPOST.....	58
Figura 26: Representação esquemática da mudança de escala.....	63
Figura 27: Distribuição dos logs de C11 no plano. (a) C11 original e (b) C11 em escala maior.	67
Figura 28: Distribuição dos vértices da poligonal no plano. (a) vértices originais e (b) vértices em escala maior.	68
Figura 29: Nuvem de pontos dos erros do processamento e poligonal da área de influência dos erros.....	69
Figura 30: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados Random 1 e Random 2.....	70
Figura 31: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados Random 3 e Random 4.....	70
Figura 32: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados <i>Random 5</i> e <i>Random 6</i>	71
Figura 33: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados <i>Random 7</i> e <i>Random 8</i>	71
Figura 34: Seção plana do modelo de blocos com a poligonal planejada.....	73
Figura 35: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal da área de influência dos erros do processamento em uma seção plana sobre o modelo de blocos.	74
Figura 36: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 1) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	75
Figura 37: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 2) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	75
Figura 38: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 3) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	76
Figura 39: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 4) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	76
Figura 40: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 5) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	77

Figura 41: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 6) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	77
Figura 42: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 7) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	78
Figura 43: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 8) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.....	78
Figura 44: Toneladas das poligonais.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo de receptores GNSS.....	43
Tabela 2: Especificações técnicas do Reach M+.....	44
Tabela 3: Sumário das configurações usadas do Reach M+ no aplicativo ReachView.	50
Tabela 4: Configurações das abas <i>Setting1</i> e <i>Setting2</i> utilizadas nas combinações.	59
Tabela 5: Combinações das configurações das abas <i>Setting1</i> e <i>Setting2</i>	59
Tabela 6: Descrição de cada item referente aos <i>logs</i> do arquivo de saída.	60
Tabela 7: Erros médios das coordenadas das combinações de processamento.....	66
Tabela 8: Massas de minério e de estéril referente às poligonais.....	79
Tabela 9: Teor médio e diluição referente às poligonais	81

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA E CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.2 META.....	15
1.3 OBJETIVOS	15
1.4 METODOLOGIA	16
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 RECONCILIAÇÃO	19
2.2 DILUIÇÃO	21
2.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GNSS	23
2.3.1 GPS	25
2.3.2 GLONASS	28
2.3.3 Galileo.....	31
2.3.4 BeiDou	34
2.4 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS	36
2.4.1 POSICIONAMENTO EM TEMPO REAL (RTK).....	37
2.4.2 POSICIONAMENTO PÓS-PROCESSADO (PPK)	39
2.5 SISTEMAS DE DESPACHO E DE GERENCIAMENTO DE EQUIPAMENTOS MÓVEIS.....	40
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	42
3.1 SELEÇÃO DO RECEPTOR GNSS	43
3.2 CONFIGURAÇÃO DO DISPOSITIVO.....	46
3.3 RASTRO DE POSICIONAMENTO	49
3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	51

3.5 FILTRAGEM DOS LOGS	61
3.6 COMPARAÇÃO DOS ERROS POSICIONAIS	61
3.7 MUDANÇA DE ESCALA.....	62
3.8 POLIGONAL PLANEJADA X POLIGONAIS DOS ERROS.....	64
3.9 ANÁLISE DAS DIFERENÇAS.....	64
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1 PROCESSAMENTO E FILTRAGEM DOS DADOS	66
4.2 MUDANÇA DE ESCALA.....	67
4.3 CRIAÇÃO DAS POLIGONAIS DOS ERROS.....	68
4.4 ANÁLISE DAS DIFERENÇAS.....	72
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	83
5.1 CONCLUSÕES	83
5.2 TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS.....	86

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Diante do cenário da indústria de mineração, com os preços das *commodities* enfrentando variações significativas e com a margem de lucro cada vez menor, a equipe técnica das empresas tem sido demandada para reduzir os custos de produção e aumentar a eficiência das suas operações. Neste sentido, a atenção das empresas está cada vez mais voltada às suas atividades de produção, em busca do constante controle e otimização das operações de lavra, como perfuração, desmonte, carregamento e transporte.

Uma ferramenta que está ao alcance das mineradoras é o sistema de despacho e de gerenciamento de equipamentos móveis, que controla e otimiza em tempo real a operação da mina. Dessa maneira, as empresas conseguem controlar suas operações, mensurar as incertezas e os erros associados a elas diminuem, conseqüentemente, há um maior aproveitamento dos recursos e os resultados financeiros tendem a melhorar.

Uma forma de mensurar os erros ou as discrepâncias entre aquilo que foi planejado e aquilo que foi realizado é através da reconciliação. Segundo Morley (2003), a reconciliação é uma atividade comum realizada na maioria das minas ao redor do mundo, em que geólogos e engenheiros despendem bastante tempo analisando dados e comparando cuidadosamente o comportamento do modelo de recursos/reservas, dos teores e da superfície topográfica com o que foi realmente produzido. Para Riske, De Mark e Helm (2010), a reconciliação é, em sua essência, o processo de identificação, análise e gestão da disparidade entre os resultados planejados e os resultados reais, de maneira a realçar as oportunidades. Nela geralmente estão incluídos os métodos para gerar melhores estimativas e melhores *designs*, as técnicas de minimização de perda e de diluição, as técnicas desenvolvidas de forma a aumentar a recuperação de minério extraído.

Câmara (2013) afirma que mesmo com boas técnicas de controle geológico e de teores, muitos empreendimentos mineiros sofrem com baixas aderências na reconciliação e que um dos principais motivos para que isto ocorra se deve ao erro na estimativa da diluição. Segundo Sinclair e Blackwell (2002), a diluição refere-se ao material estéril não separado do minério durante a operação de lavra e que, ao se misturar ao minério extraído, também é enviado à usina de beneficiamento.

De acordo com Ebrahimi (2013), a diluição é um dos fatores mais importantes que afetam a economia dos projetos mineiros. Enquanto despende-se um tempo considerável para

identificar e calcular todos os outros itens de custo de um projeto, é comum que se façam suposições gerais a despeito da diluição ao invés de quantificá-la.

Segundo Câmara (2020), utilizar uma estimativa coerente e fundamentada da diluição no planejamento de lavra pode auxiliar muito na obtenção de uma reconciliação mais realista. Eliminar totalmente a diluição em uma operação de lavra é impossível, no entanto ela pode ser controlada e quantificada. Conforme as causas da diluição forem melhores entendidas e ao se utilizar estas informações no planejamento, poderá haver uma redução da diluição, tornando assim, o planejamento mais confiável.

1.1 JUSTIFICATIVA E CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Uma forma de obter os resultados da produção para realização da reconciliação é através dos dados armazenados nos sistemas de despacho e gerenciamento de equipamentos móveis. Esses sistemas coletam uma grande quantidade de dados de produção, de forma automática em algumas versões de sistemas mais elaborados, ou apontados pelos próprios operadores em um terminal embarcado no equipamento em sistemas *off-line*. Esses apontamentos de tempos e demais parâmetros são alimentados em um banco de dados que devem ser tratados e analisados a fim de oferecer soluções práticas, possibilitando uma maior confiabilidade, eficiência, desempenho e segurança nas operações. Para que isso aconteça, assume-se que os operadores conhecem exatamente a localização dos blocos de minério a serem lavrados. Porém, nem sempre isto é a expressão da realidade na prática, uma vez que o posicionamento do equipamento de carga pode estar muitas vezes deslocado em relação ao bloco de minério da poligonal de lavra, devido ao receptor GNSS (geralmente de navegação), acoplado ao equipamento, possuir uma precisão de escala métrica. Assim, o não seguimento da poligonal planejada afeta invariavelmente o resultado da produção, causando divergências no processo de reconciliação.

Para melhorar a precisão dos equipamentos, os sistemas mais modernos implementaram em seus equipamentos receptores com a tecnologia RTK (*Real Time Kinematic*), que fornece informações mais precisas - em escala centimétrica - que os receptores GNSS comuns, além de dados de posicionamento em tempo real. Os operadores recebem, através do computador de bordo ou do terminal embarcado, as informações de projeto e essas são sobrepostas ao posicionamento preciso e instantâneo da máquina.

Na medida em que o equipamento de carga se movimenta e carrega o minério, as posições recebidas pelo receptor são automaticamente atualizadas. Esse processo auxilia o operador da máquina na otimização das tarefas e possibilita uma melhora de aderência entre o plano de lavra e a produção. No entanto, a tecnologia RTK ainda possui um custo alto de investimento e nem sempre é uma opção viável para determinadas empresas de mineração. Neste sentido, surge tecnologia PPK (*Post-Processed Kinematic*), uma técnica alternativa e de custo acessível, semelhante à tecnologia RTK. A desvantagem é que o posicionamento dos equipamentos não é atualizado em tempo real, mas é tão preciso quanto o posicionamento fornecido pelo RTK.

A diluição que ocorre devido aos problemas de precisão do posicionamento dos equipamentos móveis durante a operação de lavra, pode ser comparada com a diluição calculada através da utilização da metodologia apresentada neste estudo. Assim, através desse comparativo, será possível controlar e minimizar os efeitos da diluição no processo produtivo.

1.2 META

Diagnosticar e analisar problemas de aderência entre os planos de lavra e a produção, oriundos do erro de posicionamento de equipamentos, mensurando as perdas de minério e a diluição dos teores, utilizando receptor GNSS de baixo custo, pós-processado.

1.3 OBJETIVOS

De modo a alcançar a meta proposta neste trabalho, alguns objetivos foram estabelecidos, tais como:

- Avaliar e especificar um receptor que possa ser embarcado nos equipamentos móveis para dar a resposta de precisão desejada;
- Analisar o banco de dados com o registro das coordenadas de posição que simula a movimentação de escavadeiras, em um determinado intervalo de tempo;
- Realizar o pós-processamento dos dados brutos, para correção das coordenadas;
- Comparar os erros dos registros das coordenadas pós-processadas com os erros do GPS de navegação de um dispositivo terminal que simula o GPS do sistema de

despacho de uma escavadeira, a fim de verificar a precisão do posicionamento dos equipamentos;

- Analisar eventuais divergências na reconciliação, considerando a aderência geométrica à poligonal planejada de lavra;
- Mensurar os ganhos com o uso da metodologia proposta.

1.4 METODOLOGIA

A proposta de metodologia visa avaliar a precisão do posicionamento dos equipamentos móveis em relação ao que foi estabelecido na poligonal de lavra. Através desta avaliação, será possível diagnosticar as divergências de aderência no cumprimento do plano de lavra, com o objetivo de tentar reduzir as perdas de minério e a diluição dos teores durante a operação.

O método tem como base a utilização da técnica de posicionamento relativo cinemático pós-processado. Para sua realização, foi selecionado um receptor GNSS, de modo que este dispositivo seja previamente configurado, afim de garantir a aplicação da técnica de posicionamento. Utilizando o dispositivo conectado a um *notebook*, será realizado um rastro de posicionamento (caminhamento em ambiente externo, em uma tarde ensolarada) para uma coleta de dados dentro de uma poligonal pré-determinada (poligonal planejada). O rastro simula a operação de uma escavadeira em uma frente de lavra, uma vez que não foi possível realizá-lo em um cenário real de uma operação de lavra. Estes eventos armazenados representam um registro posicional das coordenadas em um determinado período de produção.

Após obter-se uma quantidade significativa de dados (3 a 4 minutos de coleta de dados), será efetuada a descarga (*download*) dos registros para realização do pós-processamento. Esta etapa tem a função de converter as coordenadas do levantamento (dados brutos) em coordenadas com maior precisão (dados corrigidos).

Serão realizadas uma variedade de processamentos, a partir de diferentes combinações de configurações. Então, depois de realizar uma filtragem dos *logs*, será escolhida a combinação cujas coordenadas apresentam a menor média de erros. A partir de então, essas coordenadas serão acrescidas destes erros e serão comparadas com as coordenadas acrescidas dos erros de um GPS de navegação de um terminal que simula o GPS do terminal embarcado na escavadeira.

Antes de avançar para a próxima etapa, é necessário realizar uma mudança de escala, de maneira proporcional, das coordenadas dos *logs* e dos vértices da poligonal planejada. Uma vez

que o rastro de posicionamento simula a movimentação de uma escavadeira, os *logs* e a poligonal serão alocados sobre um modelo de blocos teórico com dimensões reais de uma frente de lavra. A mudança de escala se justifica pelo fato de as dimensões da poligonal serem inferiores às dimensões dos blocos que representem um plano de curto prazo.

Depois de ter sido realizada a mudança de escala, a partir das coordenadas corrigidas somadas aos erros do GPS e aos erros do processamento, será possível projetar as novas poligonais que simulam os limites da execução da operação de lavra. Assim, juntamente com a poligonal planejada, essas duas poligonais serão avaliadas em relação ao modelo de blocos teórico, com o intuito de analisar suas diferenças e avaliar a diluição dos teores e caso ocorra, mensurar essa diluição.

Um esquema simplificado das etapas da metodologia pode ser observado no fluxograma da Figura 1.

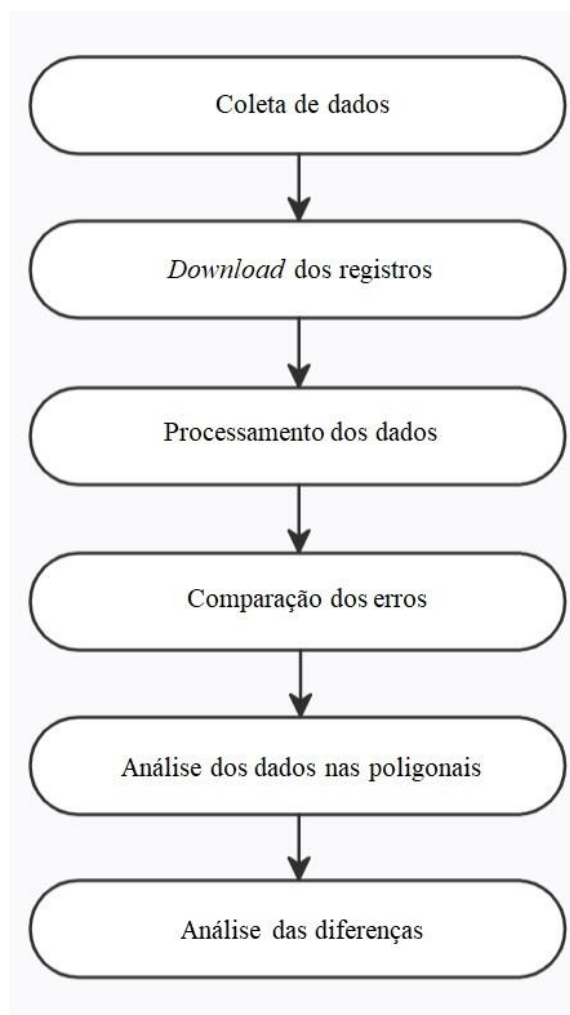


Figura 1: Fluxograma simplificado da metodologia proposta no estudo.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos, incluindo este primeiro em que é apresentada uma breve introdução do tema, a justificativa e a contextualização do problema, a meta, os objetivos e um resumo da metodologia aplicada. Os demais capítulos descrevem os seguintes tópicos e conteúdo:

- Capítulo 2: é dedicado à revisão de conceitos fundamentais e a apresentar o estado da arte acerca da reconciliação de lavra, da diluição, do sistema de posicionamento GNSS, das tecnologias RTK e PPK, do sistema de despacho;
- Capítulo 3: descreve a metodologia proposta no trabalho, em detalhes;
- Capítulo 4: apresenta as análises e discussões dos resultados obtidos através da aplicação metodológica em um estudo de caso teórico;
- Capítulo 5: encerra a dissertação apresentando as conclusões do trabalho e sugere trabalhos futuros relacionados ao tópico.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECONCILIAÇÃO

Em termos fundamentais, a reconciliação envolve a comparação dos resultados de produção com as previsões resultantes das estimativas. Consiste em averiguar se as massas do material produzido na lavra, apontado pelo despacho eletrônico, condizem com as massas planejadas originadas dos cálculos entre as superfícies topográficas e os modelos de blocos. Ou seja, deseja-se verificar se as massas de minério produzidas estão aderentes às massas e teores planejados nas poligonais dos planos de lavra.

Da mesma forma, é possível verificar se as concentrações químicas de minério lavrado estão de acordo com os resultados fornecidos pelas plantas de concentração. De acordo com Rodrigues¹ (2013 *apud* Costa, 2015), em ambos os casos, geralmente a divergência máxima permitida entre os valores comparados é 10 %. Portanto, 90 % do que foi planejado deve estar aderente ao que foi produzido. Usualmente, esses indicadores são analisados periodicamente (diário, semanal, mensal, trimestral, semestral e anualmente) e devem convergir para os dados planejados, normalmente dentro de períodos mais amplos.

Para Glacken e Morley (2003), os principais objetivos da reconciliação são: medir o desempenho da operação em função das metas iniciais; garantir uma avaliação acurada dos ativos minerais; validar os resultados das estimativas de massa e teor; fornecer indicadores de desempenho (em especial para o controle de teor).

De acordo com Shaw *et al.* (2013), os procedimentos básicos de reconciliação são:

- 1) Estabelecer uma auditoria de rastreamento de todos os dados;
- 2) Acordar em comunicar regularmente os resultados em um formato coerente e assegurar a realização de reuniões de reconciliação multifuncionais para debater os resultados e elaborar planos de ação;
- 3) Tabulação dos dados;
- 4) Relatar as variações com base em volumes consistentes (banco a banco, *stope a stope*) ou em períodos (mensais, trimestrais, anuais);
- 5) Gráfico das variações (ou fatores) de cada parâmetro para determinar tendências;

¹ RODRIGUES, F. Denver, Estados Unidos, 9 abr. 2013. 1 arquivo mp4 (64 min.). Entrevista concedida a Flávio Vieira Costa.

- 6) Analisar as diferenças e interpretar os gráficos para explicá-las;
- 7) Alterar sistematicamente os parâmetros de entrada para reduzir as futuras diferenças na reconciliação.

A Figura 2 apresenta um resumo esquemático típico de um processo de reconciliação, desde a estimativa de recursos até a produção de metal, destacando as questões-chave que devem ser abordadas ao longo do processo.

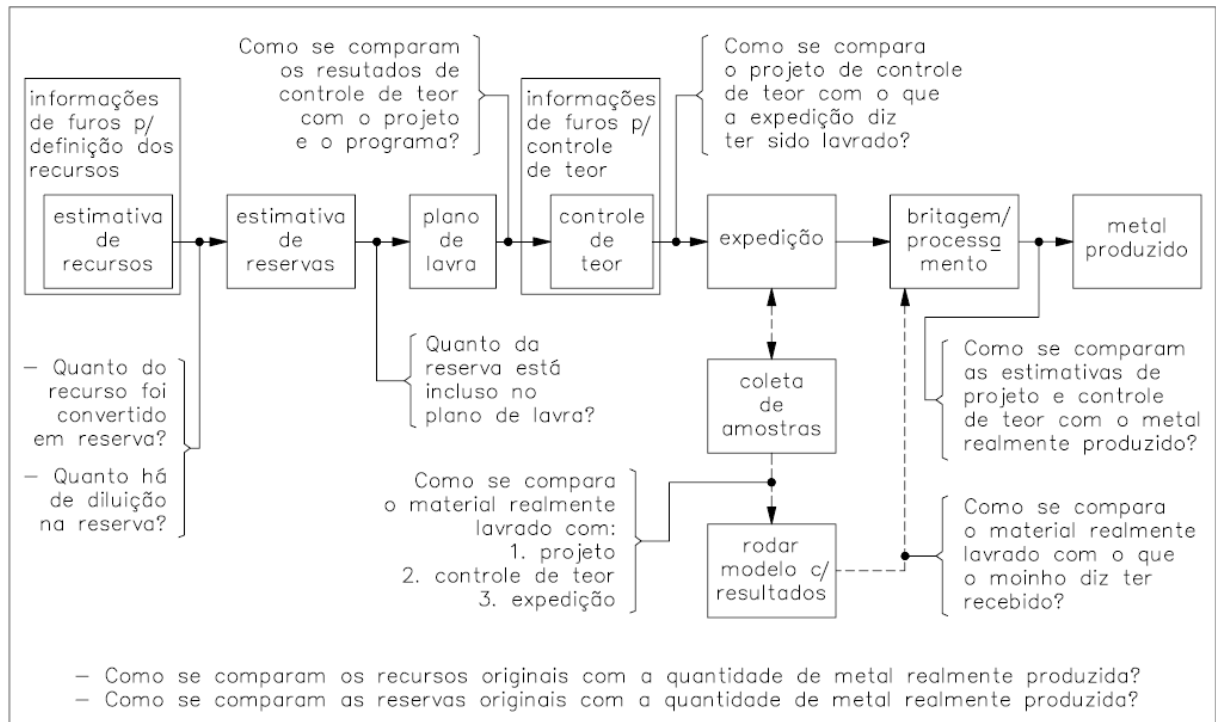


Figura 2: Resumo esquemático do processo de reconciliação e questões-chave para análise. (Fonte: Modificado de Morley, 2003)

Respostas que não sejam favoráveis a qualquer uma das questões-chave apontam para a necessidade de se realizarem novas análises, com a pretensão de identificar as causas das variações observadas e permitir que sejam tomadas as decisões para correção. Ao se identificar a causa dos problemas, os procedimentos poderão ser modificados, tendendo a minimizar as variações. Dessa forma, a reconciliação pode ser vista como um método de validação das estimativas das reservas e de controle dos teores, que permite replanejar as práticas inapropriadas de amostragem e de modelagem, o *design* e a lavra, desenvolvendo estratégias que objetivam melhorar a eficiência das operações.

Conforme Câmara (2013), para que qualquer reconciliação seja bem-sucedida, é fundamental que haja uma boa coleta de dados. Geralmente estes dados são obtidos a partir de:

amostras de frentes de lavra que suportam a qualidade dos modelos de recursos e de reservas; observações de levantamentos das atividades da mineração atual; fontes da planta de alimentação, como amostradores; indicadores de desempenho da planta, como por exemplo o consumo de energia da britagem ou a descarga dos ciclones; balanço de massa da planta.

2.2 DILUIÇÃO

Historicamente, a diluição tem sido definida como a contaminação do minério com um material de baixa qualidade ou mesmo estéril durante a produção, a qual resulta em um aumento de massa enviada ao beneficiamento, porém com uma redução do teor médio em relação às expectativas iniciais. De acordo com Ebrahimi (2013), a diluição pode ser definida como a razão entre a massa de estéril e a massa total de minério e estéril, enviados à planta. É normalmente expressa em formato percentual, como pode ser observado na Equação 1.

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{\text{Massa de estéril}}{\text{Massa de minério} + \text{Massa de Estéril}} \times 100 \quad (1)$$

De forma exemplificada, tem-se um bloco de lavra com massa de 1.000 toneladas, das quais 915 toneladas representam o minério e 85 toneladas, o estéril. Considerando que essas 1.000 toneladas foram enviadas para o processamento, então a diluição resultante é de 8,5 %.

Scoble e Moss (1994) classificam a diluição em duas categorias: planejada e não planejada, e que somadas, resultam na diluição total da lavra. Já Villaescusa (1998) classificou essas duas categorias como diluição interna e diluição externa, respectivamente. Anos mais tarde, Tatman (2001) sugeriu outros nomes para as categorias: diluição primária e diluição secundária, respectivamente.

Portanto, segundo estes autores, a diluição planejada (interna ou primária) refere-se ao material estéril presente nos limites do bloco de lavra planejado. Já a diluição não planejada (externa ou secundária), refere-se ao material estéril incorporado ao minério, mas que não estava contemplado nos limites do bloco de lavra planejado. A Figura 3 exemplifica estas definições.

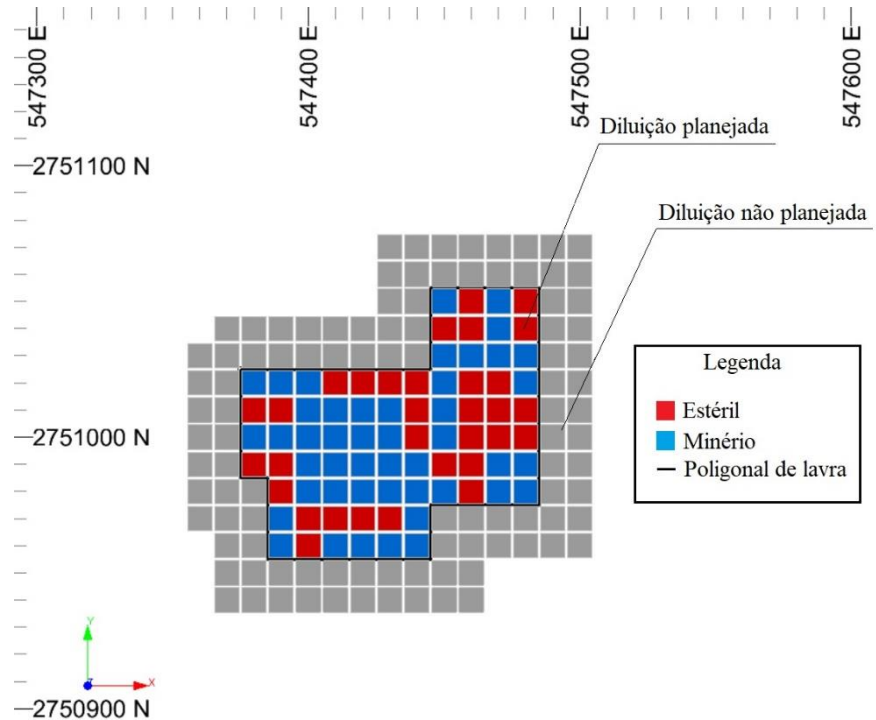


Figura 3: Ilustração esquemática das diluições planejada e não planejada, representada em uma poligonal de lavra em seção plana.

O corpo de minério está representado pela cor azul e o material estéril, pela cor vermelha. A poligonal de lavra está delimitada pela linha preta e representa os blocos a serem extraídos conforme o que foi planejado. É possível notar que para lavar a zona mineralizada, necessariamente será incorporado material estéril à mineralização, ou seja, haverá uma diluição planejada. A cor cinza representa os blocos de contato que podem acabar sendo incorporados aos blocos planejados, durante a extração, devido a particularidades do depósito e a características da operação, configurando assim uma diluição não planejada.

Os fatores que influenciam a diluição não planejada, decorrem de diferentes condições técnicas, e podem atuar de forma isolada ou conjunta. As obras de Pakalnis (1986), Potvin (1988), Scoble e Moss (1994), Clark (1998), Stewart (2005), Cepuritis e Villaescusa (2006), Villaescusa (2014) descrevem alguns fatores e dentre as principais causas da diluição não planejada referidas por estes autores, destacam-se: a qualidade do maciço rochoso, a redistribuição de tensões em função da escavação, os efeitos causados pelo processo de perfuração e desmonte de rochas.

De acordo com Câmara e Peroni (2016), a diluição externa é decorrente do método de lavra escolhido, bem como da complexidade do contato entre o minério e o estéril, enquanto o

grau de influência dependerá de quão abrupta for a mudança de teores neste contato; além disso, a diluição também pode ser decorrente do tamanho e da posição do bloco a ser lavrado. Os autores também afirmam que se o bloco a ser lavrado estiver em contato com blocos não mineralizados (ou de minério de baixo teor), a diluição ocorrerá neste contato quando forem utilizados métodos de separação imperfeitos ou para manter o ângulo de inclinação da face do talude.

Além da diluição, há ainda a definição de perdas de minério, que de acordo com Villaescusa (1998) é o minério que deixa de ser lavrado devido às condições do método e da operação. Ainda podem ser considerados fatores determinantes para as perdas de minério os erros de estimativa e de definição do teor de corte da otimização. Também podem ocorrer perdas de minério no processo de concentração.

De acordo com Câmara (2013), as perdas de minério e a diluição impactam negativamente no resultado econômico das empresas, uma vez que a primeira afeta a receita pelo fato do minério planejado não ser lavrado, enquanto a segunda, representa um aumento dos custos operacionais, devido à extração e beneficiamento indevidos do material estéril. Além disso, a vida útil do projeto também é afetada e em alguns casos, os projetos são encerrados precocemente.

2.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GNSS

O posicionamento baseado em satélites é a determinação das posições dos pontos de observação na terra ou no mar, no ar e no espaço, por meio de satélites artificiais. Os sistemas operacionais de posicionamento por satélite assumem que as posições dos satélites são conhecidas em todas as épocas.

De acordo com Seeber (2003), desde 1991 o termo *Global Navigation Satellite System* (GNSS) foi designado a abranger os sistemas globais de posicionamento baseado em satélites artificiais. Uma breve revisão histórica sobre o desenvolvimento do posicionamento por satélite pode ser encontrada, por exemplo, em Guier e Weiffenbach (1997) ou Ashkenazi (2006).

A obra de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) explica que os satélites operacionais proporcionam principalmente ao usuário a capacidade de determinar sua posição, tempo e velocidade na superfície terrestre, através do rastreamento de satélites por meio de um receptor de sinal. A posição é expressa, por exemplo, por latitude, longitude e altitude. Esta

tarefa é realizada através do processo de ressecção simples, que utiliza alcances ou intervalos de alcances medidos pelos satélites.

Para se obter uma cobertura global, uma constelação de satélites deve possuir um mínimo de 24 satélites posicionados espacialmente na órbita terrestre, de forma que o receptor em superfície terrestre possa ter um mínimo de quatro satélites detectáveis em seu horizonte. Segundo Rossbach (2000), dos quatro satélites, um é utilizado para sincronizar o tempo dos satélites e do receptor, enquanto outros três satélites são utilizados para calcular as coordenadas tridimensionais.

Resumidamente, cada coordenada é calculada a partir de uma subtração de vetores. O vetor Q^s é o vetor do satélite em relação ao centro da Terra (geocentro), o vetor Q_r é o vetor do receptor em relação ao geocentro e o vetor Q é o módulo da subtração dos vetores Q^s e Q_r (Figura 4).

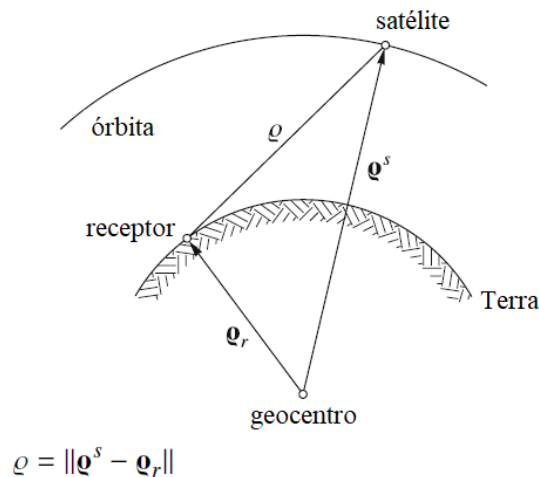


Figura 4: Princípio do posicionamento baseado em satélites. (Fonte: Modificado de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle, 2008)

O GNSS é composto pelos satélites GPS (americano), GLONASS (russo), Galileo (europeu) e BeiDou (chinês). De um modo geral, os sistemas de navegação diferem-se pelas características dos segmentos espacial, de controle e de usuários, que serão abordados particularmente.

2.3.1 GPS

O Sistema de Posicionamento Global (ou *Global Positioning System* - GPS) é um sistema de navegação por satélite baseado em sinais transmitidos por satélites artificiais, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*U. S. Department of Defense* - DoD) na década de 1970, com objetivo inicial de atender os requisitos militares e que posteriormente tornou-se disponível para civis. Para Monico (2008), o GPS foi concebido com a finalidade de fornecer informações de tempo e posição tridimensional em qualquer lugar da Terra, ou próximo a esta, de forma contínua, sob quaisquer condições climáticas, em um referencial global, homogêneo e com base em medidas de distâncias.

O sistema GPS é composto por três segmentos principais: (1) segmento espacial, (2) segmento de controle e (3) segmento de usuários. A Força aérea dos Estados Unidos da América desenvolve, mantém e opera (1) e (2).

O **segmento espacial** é constituído por pelo menos 24 satélites que operam em seis planos orbitais, igualmente espaçados a 60° , com quatro satélites em cada plano, a uma altitude de aproximadamente 20.200 km (Figura 5). Os planos orbitais são inclinados 55° em relação ao Equador (Figura 6) e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 2001).

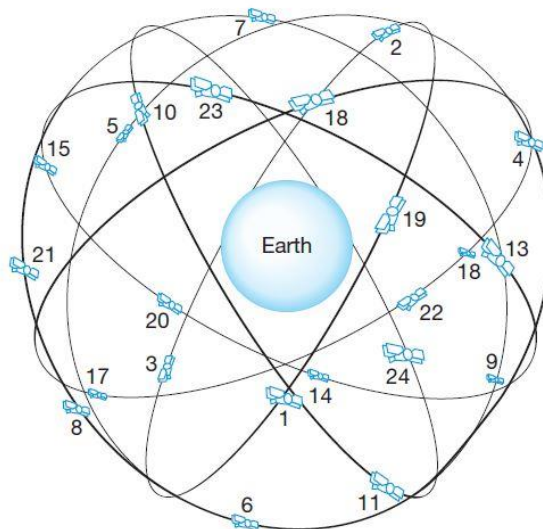


Figura 5: Constelação de satélites GPS. (Fonte: Ghilani e Wolf, 2012)

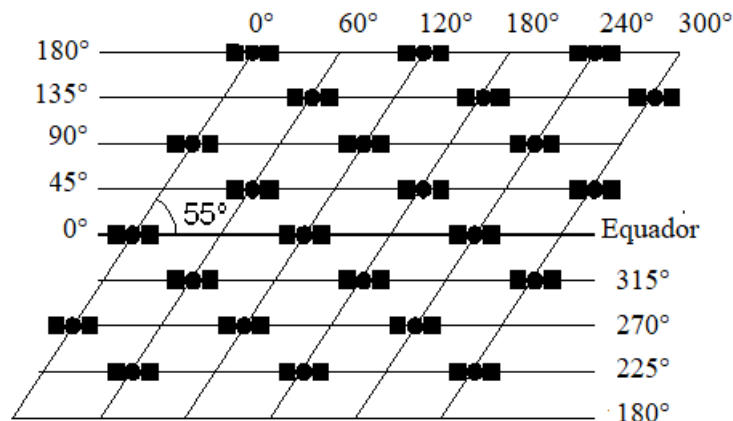


Figura 6: Distribuição dos satélites nos planos orbitais do GPS. (Fonte: Modificado de Robaina e Caten, 2006).

Os satélites da constelação GPS transmitem sinais em duas frequências portadoras da banda L, denominadas L1 e L2, derivadas de uma frequência fundamental de 10,23 MHz. Essas duas frequências são geradas a partir de fatores multiplicadores, respectivamente, 154 e 120. Dessa forma, a frequência da banda L1 resulta em 1.575,42 MHz e da banda L2, em 1.227,60 MHz. Os respectivos comprimentos de onda das duas bandas correspondem a 19,04 cm e 24,43 cm.

Sobre as portadoras, são modulados uma mensagem de navegação e os códigos de ruído pseudoaleatórios (*pseudorandom noise* - PRN). Os códigos PRN consistem em sequências únicas de valores binários (zeros e uns), gerados a partir de um algoritmo matemático especial. Segundo Ghilani e Wolf (2012), cada satélite transmite dois códigos PRN diferentes: o código P (*Precision*) e o código C/A (*Coarse/Acquisition*). O código P modula as portadoras L1 e L2, a uma frequência de 1,023 MHz e a um comprimento de onda de aproximadamente 300 m. Já o código C/A modula somente a portadora L1, a uma frequência de 10,23 MHz e a um comprimento de onda de aproximadamente 30 m.

O código C/A e o código P são tecnologias mais antigas. Os satélites recentes estão sendo equipados com novos códigos, os quais incluem um segundo código civil no sinal L2, chamado de L2C e uma terceira portadora, que fornece maior segurança, conhecida como L5, com frequência de 1.176,45 MHz e comprimento de onda aproximado de 25,5 cm. O segmento de código atribuído a cada satélite é reiniciado a cada semana, à 0 h TU (Tempo Universal), de sábado para domingo, criando a semana GPS, que é uma unidade de tempo do sistema (MONICO, 2008).

O **segmento de controle** é responsável pela operacionalidade do sistema GPS, cuja principal função é atualizar as mensagens de navegação transmitidas pelos satélites (LOCH e CORDINI, 1995). Segundo Monico (2008), as principais tarefas do segmento de controle são: monitorar e controlar de forma contínua o sistema de satélites; determinar o sistema de tempo do GPS; prever as efemérides (dados que informam a posição) dos satélites, calcular as correções dos relógios e dos satélites; atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite.

O sistema de controle operacional é composto por quatro subsistemas principais: uma estação de controle central (*Master Control Station – MCS*), uma estação de controle central alternativa, uma rede de antenas de comando e controle (*Ground Antennas – GAs*) e uma rede de estações de monitoramento distribuídas globalmente (U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 2008). A MCS está localizada em Colorado Springs, Colorado, Estados Unidos da América. Ela estabelece o comando e o controle da constelação de GPS, usa dados globais da estação de monitoramento para calcular as localizações precisas dos satélites, gera mensagens de navegação para *upload* nos satélites, monitora as transmissões por satélite e a integridade do sistema para garantir a integridade e a precisão da constelação, realiza a manutenção de satélites e a resolução de anomalias, incluindo reposicionamento de satélites para manter a constelação ideal.

As estações de monitoramento utilizam receptores sofisticados que rastreiam os satélites de GPS quando eles passam sobre elas, coletam sinais de navegação, portadoras/intervalo de distância e dados atmosféricos e enviam as suas observações à MCS. As GAs suportam *links* de comunicação que transmitem e recebem dados de navegação, atualizam e processam programas, transmitem comandos normais para os satélites e coletam dados por telemetria.

O **segmento de usuários** é constituído pelos receptores GPS, utilizados por civis e militares, para os propósitos a que se destinam, como por exemplo navegação, geodésia ou qualquer outra atividade. Compreende a antena que recebe os sinais enviados pelos satélites e o receptor que decodifica os sinais em diferentes canais, além de identificar os respectivos satélites que os enviaram e informar ao usuário seu posicionamento, velocidade e direção de deslocamento.

Este segmento consiste em duas categorias de receptores que são classificados pelo seu acesso a dois serviços que o sistema oferece, designados por: *Standard Positioning Service* (SPS) e *Precise Positioning Service* (PPS). Conforme Ghilani e Wolf (2012), o SPS é fornecido

gratuitamente para todos os usuários em qualquer parte do globo. Ele atua sobre a frequência de transmissão da portadora L1. Inicialmente, este serviço foi destinado a fornecer, no espaço, precisão de 100 m na horizontal e 156 m na vertical, com nível de confiança de 95 %. No entanto, conforme o U.S. Department of Defense (2020), desde 2018 os receptores GPS bem projetados têm alcançado, no espaço, precisão horizontal de 3 m e precisão vertical de 5 m, com nível de confiança de 95%.

Já o PPS é transmitido nas frequências das portadoras L1 e L2, e só está disponível para receptores com chaves criptográficas válidas, que são reservadas quase inteiramente para uso de militares norte-americanos. Esta mensagem fornece uma precisão publicada de 18 m na horizontal e de 28 m na vertical, com nível de confiança de 95 %. A precisão do usuário depende de uma combinação da geometria do satélite, do erro de alcance do usuário e de fatores locais, como bloqueio de sinal, condições atmosféricas e características/qualidade do projeto do receptor.

Como o objetivo dos levantamentos por satélite é determinar pontos na superfície terrestre, faz-se necessário o uso de um sistema de referência de coordenadas terrestres, uma vez que se permite relacionar fisicamente esses pontos com a Terra. O sistema de referência de coordenadas mais utilizado em levantamentos com GPS é o WGS84 (*World Geodetic System 1984*), que compreende um elipsoide de referência (com a origem no centro da Terra), um sistema de coordenadas padrão, dados de altitude e um geóide.

2.3.2 GLONASS

O Sistema de Navegação Global por Satélite (ou *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya System* – GLONASS) designa o sistema de navegação criado na extinta União Soviética e atualmente operado pela Força de Defesa Aeroespacial Russa. O desenvolvimento do sistema teve seu início no ano de 1976, sendo criado inicialmente para fins militares de posicionamento e navegação e que hoje é disponível também para uso civil.

O principal objetivo deste sistema é proporcionar posicionamento tridimensional, velocidade e tempo sob quaisquer condições climáticas e localidades do globo. Assim como o sistema GPS, o GLONASS também é composto por três segmentos: espacial, de controle e de usuários.

O **segmento espacial** é composto por uma constelação de 24 satélites em Média Órbita Terrestre (*Medium Earth Orbit - MEO*), distribuídos em três planos orbitais distintos, separados a 120° , com uma inclinação de $64,8^\circ$ em relação ao plano do Equador. Os satélites orbitam a uma altitude nominal de aproximadamente a 19.100 km. Cada plano orbital contém oito satélites igualmente espaçados a 45° , com período orbital de 11 horas, 15 minutos e 44 segundos (GHILANI; WOLF, 2012; RUSSIAN SPACE SYSTEMS, 2016). A Figura 7 apresenta uma representação da constelação dos satélites GLONASS.

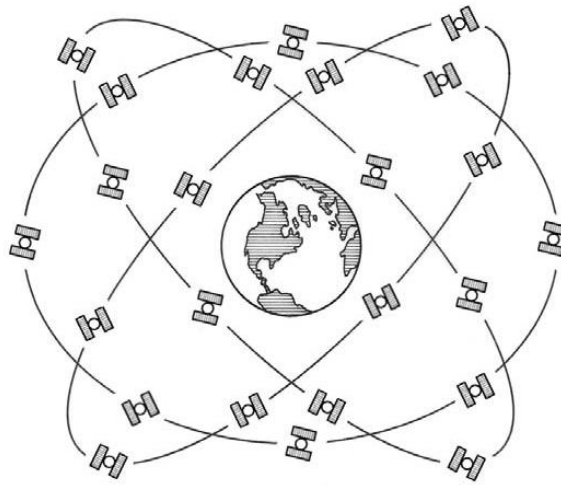


Figura 7: Configuração dos satélites GLONASS. (Fonte: Seeber, 2003).

Da mesma forma como no sistema GPS, o sistema GLONASS também transmite sinais em duas bandas portadoras: L1 e L2. Porém, cada satélite apresenta sua própria frequência. Segundo Seeber (2003), a frequência da banda L1 é dada pela Equação 2.

$$f_{L1} = f_0 + k \cdot \Delta f_{L1} \quad k = 0, 1, 2, \dots, 24 \quad (2)$$

Onde $f_0 = 1.602 \text{ MHz}$ e $\Delta f_{L1} = 0,5625 \text{ MHz}$. A variável k representa o número da frequência e o canal de cada satélite. O valor de $k = 0$ é designado “frequência técnica” e é reservado para realização de testes. A relação entre as frequências das bandas L1 e L2 (f_{L1} e f_{L2}) é dada pela Equação 3.

$$\frac{f_{L1}}{f_{L2}} = \frac{9}{7} \quad (3)$$

De forma similar ao GPS, há dois tipos de códigos PRN no GLONASS: código C/A e código P. O primeiro está disponível para usuários civis e atua com uma frequência de 0,511 MHz, somente sobre a portadora L1. Já o segundo, é utilizado apenas por usuários autorizados, a uma frequência de 5,113 MHz sobre as portadoras L1 e L2. Esses dois códigos são os mesmos para todos os satélites GLONASS. O processo de divisão da frequência em diferentes bandas é realizado através da técnica de FDMA (*Frequency-Division Multiple Access* ou – Múltiplo Acesso pela Divisão da Frequência), o que permite identificar os satélites pela frequência do sinal (KAPLAN; HERGARTY, 2006; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008).

O **segmento de controle** e monitoramento do sistema GLONASS localiza-se em território russo e é composto por um Sistema de Controle Central (SCC), uma Central de Sincronização (CS) que é responsável pelo sistema de tempo GLONASS e as Estações de Comando e Rastreo – ECRs (SEEBER, 2003; WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008). O SCC é um complexo militar sob o comando da Força de Defesa Aeroespacial Russa e está localizado no Centro Espacial de Krasnoznamensk a 70 km de Moscou. Todas as funções e operações do sistema são programados e coordenados pela SCC.

A CS está localizada em Shchyolkovo, na região de Moscou. Já as ECRs estão distribuídas homoganeamente em algumas cidades do território russo, como St. Petersburg, Ternopol, Eniseisk e em Komsomolsk-na-Amure. Resumidamente, as ECRs obtêm informações de distância e telemetria de cada satélite GLONASS. Estes dados são processados no SCC para determinar o estado do relógio dos satélites e suas órbitas. O resultado do processamento obtido é retornado para as ECRs, que retransmitem atualizações para os satélites.

Cada um dos satélites é equipado com refletores *lasers* que recebem e calibram, periodicamente os dados entre as estações e os satélites. O SCC realiza a sincronização através de um sistema central, composto por um relógio atômico de hidrogênio com alta precisão que, integrado aos relógios atômicos de césio dos satélites, dá origem ao sistema de tempo GLONASS.

O **segmento de usuários** é composto pelas antenas e receptores, que têm como função determinar posições, velocidades e obter tempo com grande precisão. Em relação ao GPS, o

número de receptores GLONASS disponíveis no mercado é bastante reduzido. De maneira geral, encontram-se receptores que rastreiam simultaneamente os dois sistemas, o que torna possível a integração deles.

O sinal de navegação dos satélites GLONASS possui duas classificações: *Standard Precision* (SP ou Padrão de Precisão) e *High Precision* (HP ou Alta Precisão). O primeiro atua sobre o código C/A, com precisão horizontal entre 13 m e 100 m e com precisão vertical entre 22 m e 156 m, para um nível de confiança de 95 %. Já o segundo atua sobre o código P, porém não possui informações divulgadas a respeito de precisão.

O sistema de coordenadas do GLONASS transmite os dados de suas efemérides no *Parametry Zemli 1990* (PZ-90), que possui origem localizada no centro da Terra e três eixos cartesianos ortogonais. Segundo relatos de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), o eixo Z está direcionado ao polo terrestre convencional, conforme as recomendações do *International Earth Rotation Service* (IERS); o eixo X resulta da interseção entre o plano equatorial e o plano representado pelo meridiano de Greenwich; o eixo Y completa o sistema ortogonal dextrogiro.

2.3.3 Galileo

O Galileo é um sistema global de navegação por satélite, financiado e gerido pela Europa. Foi desenvolvido em colaboração pela União Europeia (UE), pela Agência Espacial Europeia (ESA – *European Space Agency*) e pela indústria europeia, e projetado para aplicações civis, mas também se destina a ser usado para aplicações de segurança (ZIEDAN, 2006).

Em 1999, a contribuição europeia para a navegação por satélite foi provisoriamente designada Galileo, porém tornou-se o sinônimo do GNSS europeu. De fato, o Galileo não é um acrônimo como GPS e GLONASS, seu nome é em homenagem ao cientista e astrônomo italiano Galileo Galilei. O programa Galileo foi estruturado de acordo com três fases principais: (1) *In-Orbit Validation phase* (IOV ou fase de validação em órbita); (2) *Initial Operational Capability phase* (IOC ou fase de capacidade operacional inicial); (3) *Full Operational Capability phase* (FOC ou fase de capacidade operacional total).

A fase IOV consiste em qualificar o sistema através de testes e operação de dois satélites experimentais e uma constelação reduzida de quatro satélites operacionais e sua infraestrutura terrestre relacionada. A fase IOC consiste no comissionamento parcial da infraestrutura

terrestre e espacial, incluindo um lote de 14 satélites adicionais aos da fase IOV, os serviços de lançamento, a missão necessária e a infraestrutura de controle de solo, os serviços de suporte ao sistema e as operações correspondentes.

Já a fase FOC consiste na implantação da restante infraestrutura terrestre e espacial. Inclui uma fase intermediária de capacidade operacional inicial com 18 satélites. O sistema completo será composto por 30 satélites, centros de controle localizados na Europa e uma rede de estações de sensores e estações *uplink* em todo o mundo.

O Galileo é o único sistema GNSS completamente gerido pelas autoridades civis. No entanto, os serviços Galileo serão adaptados aos usuários civis e militares, através de um serviço aberto, de um serviço de elevada precisão e de um serviço público regulamentado. Dentre os serviços disponíveis, incluem-se:

- ***Open Service*** (OS), que fornece informações de posicionamento e sincronização destinadas a aplicativos de rádio navegação por satélite de alto volume. Destina-se à navegação de veículos motorizados e serviços de telefonia móvel baseados em localização, com acesso livre e gratuito ao usuário;
- ***Commercial Service*** (CS), para uso profissional, com requisitos de desempenho que excedam os do OS e com garantias de serviço e taxas de utilização;
- ***Safety Of Life Service*** (SOL), para aplicações de transporte, em especial para a aproximação de aterrissagem e orientação do veículo;
- ***Public Regulated Service*** (PRS), para aplicações dedicadas à segurança europeia, restrito a usuários autorizados pelo governo, para aplicativos confidenciais que exigem um alto nível de continuidade de serviço;
- ***Search and Rescue Service*** (SAR), para serviços de salvamento, ajudando a encaminhar sinais de socorro/emergência para um centro de coordenação de resgate.

O sistema consiste em um segmento espacial, em um segmento terrestre (de controle) e em um segmento de usuários. Ainda se mantém em implementação, com expectativa de finalizá-lo no decorrer dos próximos anos.

O **segmento espacial** compreende 30 satélites (27 operacionais e 3 sobressalentes ativas) em MEO, situados em órbitas circulares em três planos orbitais igualmente espaçados (Figura 8). A inclinação dos satélites é de 56° em relação ao Equador, com período orbital de 14 horas, 4 minutos e 45 segundos, para uma altitude de 23.222 km (SEEBER, 2003;

HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008; GHILANI e WOLF, 2012).

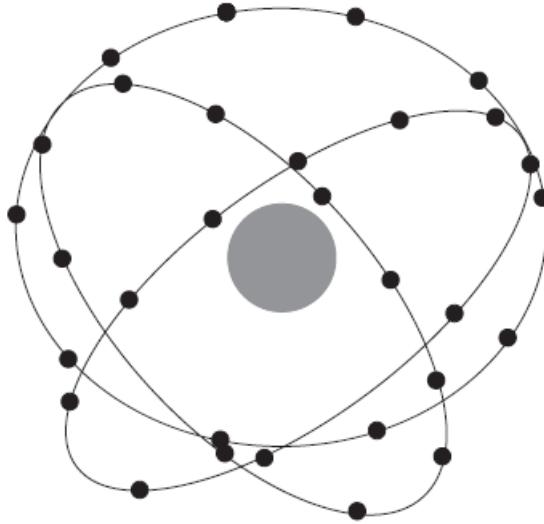


Figura 8: Constelação Galileo. (Fonte: Seeber, 2003)

Os sinais do Galileo são transmitidos em três bandas de frequências (E5, E6 e E1), utilizando quatro portadoras de frequência (E5a, E5b, E6 e E1). A banda E5 possui uma frequência central de 1.191,795 MHz, cujas bandas portadoras E5a e E5b transmitem frequências de 1.176,45 MHz e 1.207,14 MHz, respectivamente. A banda E6 possui uma frequência central de 1.278,75 MHz e a banda E1, de 1.575,42 MHz.

O **segmento terrestre** compreende tanto o segmento de controle terrestre (*Ground Control Segment* ou GCS) como o segmento de missão terrestre (*Ground Mission Segment* ou GMS). Sua infraestrutura é composta por dois centros de controle terrestre (*Ground Control Centers* ou GCC), cinco estações de telemetria, rastreamento e controle (*Telemetry, Tracking and Control stations* ou TT&C), nove estações *uplink* (*Uplink Stations* ou ULS) e cerca de 40 estações de sensores Galileo (*Galileo Sensor Stations* ou GSS). A Figura 9 apresenta a distribuição geográfica destas estações.

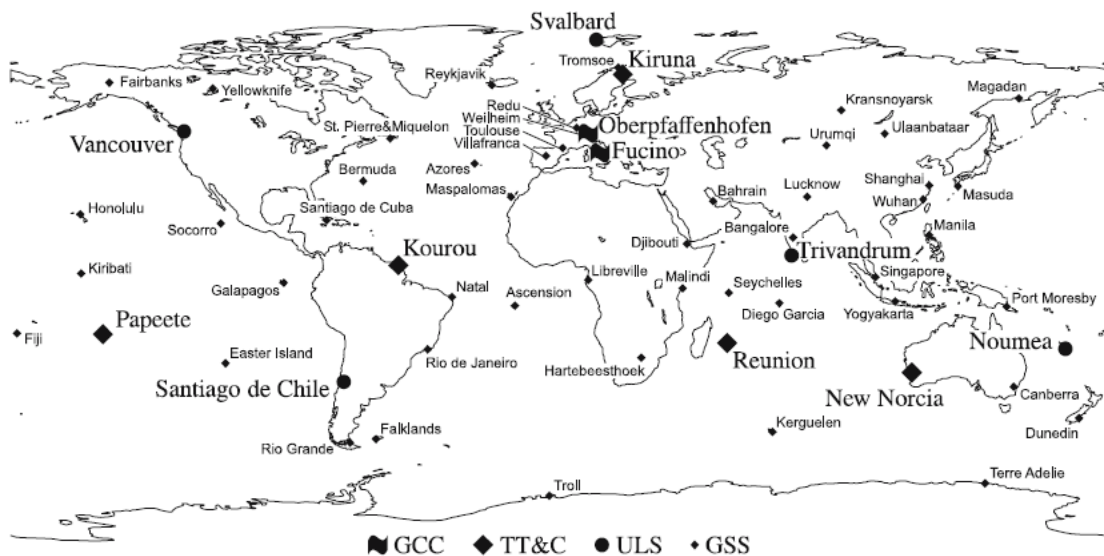


Figura 9: Infraestrutura terrestre do sistema Galileo. (Fonte: Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle, 2008)

O GCS é responsável por uma grande variedade de funções para oferecer suporte ao controle e gerenciamento de constelações dos satélites Galileo, enquanto o GMS é responsável pela determinação e *uplink* das mensagens de dados de navegação necessárias para fornecer os dados de navegação e tempo. As GSS coletam e encaminham medições e dados do Galileo para os GCC em tempo real. As ULS distribuem e enviam os dados da missão para a constelação de Galileo. As TT&C coletam e encaminham dados de telemetria gerados pelos satélites Galileo, distribuem e elevam os comandos de controle necessários para manter os satélites e a constelação Galileo.

O **segmento de usuários** é composto por todos os receptores e dispositivos compatíveis que coletam os sinais do Galileo. Eles determinam pseudo-intervalos (e outros observáveis) e resolvem as equações de navegação para obter suas coordenadas e fornecer sincronização de tempo precisa.

2.3.4 BeiDou

O sistema de navegação global por satélites, desenvolvido pela China, é conhecido por BeiDou (BDS). Em 1993, quando a China decidiu implementar um sistema de navegação independente, optou por denotá-lo como “BeiDou”, terminologia que remonta a constelação de estrelas Ursa Maior, que tem sido utilizada há séculos para identificar direções (HOFMANN-

WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). Em algumas literaturas, o sistema BeiDou também é referido como Compass.

A arquitetura do sistema é similar à dos outros sistemas GNSS, contendo um segmento espacial, um segmento terrestre e um segmento de usuários. De acordo com o China Satellite Navigation Office (2013), o sistema BeiDou tinha expectativa de finalização de sua implementação em 2020. De fato, foi alcançada em 23 de junho de 2020 ao ser lançado em órbita o último satélite do sistema.

O **segmento espacial** consiste em uma constelação de 27 satélites MEO, 5 satélites em órbita geostacionária (*geostationary orbit* ou GEO) e 3 satélites em órbita geosíncronica inclinada (*inclined geosynchronous orbit* ou IGSO). Os 27 satélites MEO possuem altitude de 21.528 km. Destes, 24 são distribuídos uniformemente, separados a 45° de latitude, em três planos orbitais com um ângulo de inclinação de 55° em relação ao Equador, e os 3 satélites restantes são sobressalentes.

Os satélites ISGO possuem uma altitude de 35.786 km, com inclinação de 55° em relação ao Equador, posicionados em três planos orbitais. Os satélites GEO operam em órbita a uma altitude de 35.786 km e localizam-se a 58,75° E, 80° E, 110,5° E, 140° E e 160° E, respectivamente. Os sinais do BeiDou são transmitidos em três bandas de frequências: B1 (1.575,42 MHz), B2 (1.176,45 MHz) e B3 (1.268,52 MHz).

O **segmento terrestre** é responsável pela operação e pelo controle do sistema BDS. Consiste em uma estação de controle central (*Master Control Station* ou MCS), estações de sincronização de tempo e *upload* (*Time Synchronization/Upload Stations* ou TS/US) e estações de monitoramento (*Monitor Stations* ou MS).

A MCS tem como principais objetivos: (i) coletar e processar dados de observação de sinais de navegação de cada TS/US e MS e gerar mensagens de navegação de satélite; (ii) executar o planejamento e a programação das missões, conduzir as operações, a gestão e o controle do sistema; (iii) observar e calcular o viés de relógio dos satélites, para carregar suas mensagens de navegação; (iv) monitorar a carga útil do satélite e analisar anomalias.

A TS/US é responsável por realizar o *upload* das mensagens de navegação e a sincronização do relógio dos satélites. Já a MS tem como principais tarefas a observação dos sinais de navegação dos satélites e o fornecimento de dados em tempo real para a MCS.

O **segmento de usuários** é composto por todos os receptores e dispositivos capazes de coletar e processar os sinais do BeiDou, determinando assim a posição do usuário, a velocidade

e o tempo preciso. Incluem-se também os receptores compatíveis com os outros sistemas de navegação.

2.4 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS

Conforme Seeber (2003), desde o surgimento do GPS, pesquisadores têm desenvolvido diversos métodos de posicionamento, cuja finalidade é explorar a capacidade que o GPS tem de prover coordenadas precisas sobre a superfície terrestre ou próximo dela. Segundo Monico (2008), o posicionamento geodésico, a partir de medidas de satélites GNSS, consiste na obtenção de coordenadas tridimensionais de um determinado ponto com relação a um referencial geocêntrico definido.

Além disso, há a dependência de outros fatores, como por exemplo o tipo de efeméride, as observáveis utilizadas, o tipo de receptor e a quantidade. Dependendo da técnica utilizada, podem ser fornecidos resultados com níveis de precisão que variam entre dezenas de metros e poucos centímetros.

Os métodos de posicionamento destacados na literatura normalmente são classificados em três grupos: (1) absoluto (ou por ponto), onde as coordenadas estão associadas diretamente a um referencial geocêntrico; (2) relativo, onde as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado (estação de referência) com coordenadas conhecidas; (3) DGPS (*Differential GPS*), onde as correções estimadas na estação de referência são aplicadas nas coordenadas ou pseudodistâncias da estação a ser determinada. De acordo com Monico (2008) e Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), estes métodos apresentam duas modalidades: estática (onde o receptor está em repouso) e cinemática (onde o receptor está em movimento).

Para fins deste estudo, será tratado o método de posicionamento relativo cinemático. Neste método, um receptor ocupa a estação de referência, no caso funcionando como base e outro receptor localiza-se se deslocando sobre os pontos de interesse a serem levantados. Além disso, para o método funcionar, é necessário a observação de no mínimo cinco satélites. Ghilani e Wolf (2012) relatam que este levantamento pode fornecer resultados imediatos, utilizando a técnica RTK (*Real Time Kinematic* ou cinemático em tempo real) ou em escritório após a coleta dos pontos, utilizando a técnica PPK (*Post-Processed Kinematic* ou cinemático pós-processado). As características de cada processamento serão discutidas nas próximas seções.

2.4.1 POSICIONAMENTO EM TEMPO REAL (RTK)

As técnicas de posicionamento cinemático relativo são indicadas para levantamentos em que se pretende determinar as coordenadas de inúmeros pontos de forma rápida e produtiva. Para a realização de um levantamento RTK, Costa *et al.* (2008) afirmam que deve ser instalado um receptor em uma estação estática com coordenadas conhecidas (estação de referência ou base RTK), um receptor móvel (*rover*) e um rádio de comunicação para enviar os dados da base para o *rover* (Figura 10). Este receptor pode ser de simples ou multi-frequência, sendo que o último possui a vantagem de receber sinais dos satélites com maior qualidade.

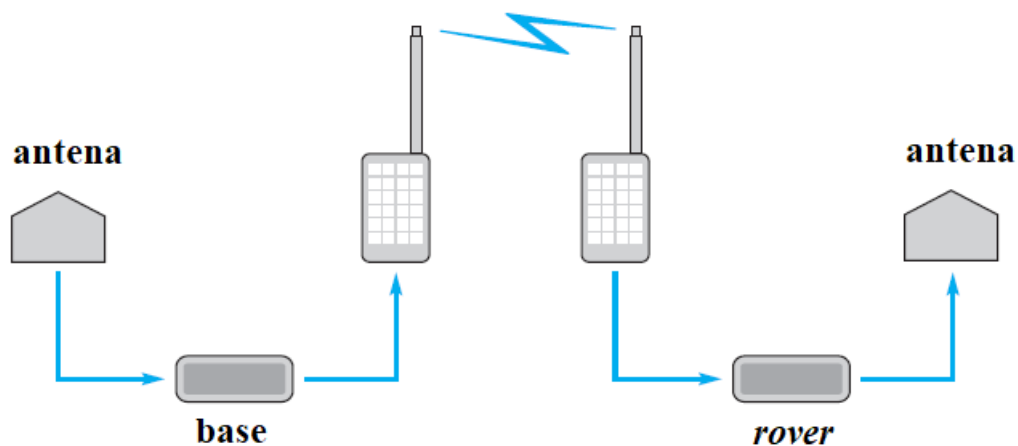


Figura 10: Receptores base e *rover* com rádios internos compatíveis utilizados em levantamento RTK. (Fonte: Modificado de Ghilani e Wolf, 2012)

Um receptor GNSS têm a função de medir o tempo que um sinal de satélite leva para viajar até o receptor. Os sinais transmitidos viajam através da ionosfera e troposfera, sofrendo retardos e perturbações durante o trajeto. Desta forma, é difícil para este tipo de receptor determinar precisamente a posição. Logo, a tecnologia RTK surge para resolver este problema.

Segundo Seeber (2003), Segantine (2005) e Monico (2008), a tecnologia RTK é baseada nas seguintes características:

- Transmissão em tempo real dos dados de fase da onda portadora e pseudodistância da estação base para estação móvel ou das correções das observáveis;
- Resolução das ambiguidades para linha de base entre a estação base e a móvel com solução quase instantânea *on the way* (OTW) ou *on the fly* (OTF);
- Determinação confiável do vetor da linha de base em tempo real.

Porém, como os erros envolvidos no processo (ionosfera, troposfera e órbita dos satélites) são proporcionais ao comprimento da linha de base, há uma limitação no posicionamento RTK, restringindo a distância entre a base e o *rover* a no máximo 10 km (ALVES, 2008; BARBOSA *et al.*, 2010). Hoje em dia, receptores de multi-frequência já permitem uma distância de linha de base de até 60 km.

Para diversos autores, como El-Rabbany (2002), Dai *et al.* (2003), Seeber (2003), Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Walse (2008) e Ghilani e Wolf (2012), a metodologia RTK pode alcançar níveis centimétricos de precisão, sem a necessidade de um processamento posterior dos dados. A obtenção de melhores resultados utilizando essa técnica se dá quando a antena da base é montada preferencialmente em locais abertos, longe de edifícios, carros e vegetações altas. Assim, evita-se a perda do sinal e atinge-se uma maior quantidade de satélites capturados. A antena do rádio também deve ser montada em um local mais alto possível, a fim de maximizar a cobertura do sinal.

Para permitir a conversão de dados, os receptores GNSS são fabricados de modo a obterem informações segundo protocolos definidos. O padrão internacional para transmissão de dados em tempo real em aplicações RTK, estabelecido pelo *Special Committee (SC-104)*, é denominado *Radio Technical Commission for Maritime Services* ou RTCM (SEEBER, 2003).

Em se tratando de mineração, atualmente muitas empresas de *softwares* de controle e gerenciamento dos equipamentos, como perfuratriz, escavadeira, carregadeira, trator, caminhão, etc., utilizam a tecnologia RTK. De acordo com El-Rabbany (2002), em minas a céu aberto, o uso do RTK melhorou significativamente várias operações como perfuração, escavação e rastreamento de veículos.

Os dados são enviados aos operadores na tela do computador de bordo. Na etapa de perfuração, é possível monitorar, controlar e orientar o operador a posicionar com precisão sobre os furos projetados. Além disso, o operador consegue verificar a profundidade do furo. Na etapa de carregamento, é possível visualizar com precisão a localização dos blocos de minério da poligonal de lavra, a inclinação da pá e a profundidade da bancada de trabalho.

Na etapa de transporte, o posicionamento dos caminhões é enviado para uma central de controle. Ao receber essa informação, a central consegue identificar o material que está sendo carregado, e assim enviar informações e instruções a serem seguidas pelos motoristas, como o trajeto que deve ser seguido até o destino final. Além disso, a central pode coletar informações sobre o *status* de cada caminhão, bem como as condições de tráfego.

2.4.2 POSICIONAMENTO PÓS-PROCESSADO (PPK)

O PPK é uma tecnologia de correção de dados GNSS, amplamente utilizada em levantamentos e mapeamentos para obter dados de posicionamento de alta precisão ou exatidão centimétrica. É uma técnica alternativa à RTK, pois possui um fluxo de trabalho mais flexível, permitindo executar o processamento várias vezes, utilizando configurações diferentes e sem a necessidade de um *link* de correção entre a base e o *rover*. Entretanto, o posicionamento preciso não acontece em tempo real, uma vez que todos os algoritmos são aplicados posteriormente. Tanto a base no solo, quanto o *rover*, registram dados GNSS brutos, que são então processados para melhorar a precisão do posicionamento. Não há a necessidade de conhecer as coordenadas da base no momento do levantamento.

Embora o PPK necessite de um pós-processamento dos dados, ele não apresenta a limitação de comunicação via rádio entre os receptores presentes no RTK, devido aos obstáculos físicos presentes na linha de comunicação. Além disso, os dados de efemérides precisas dos satélites GNSS estão disponíveis durante o pós-processamento, o que muitas vezes pode fornecer uma solução mais precisa. Também, há a vantagem de custo entre os métodos. Como o PPK não utiliza equipamentos responsáveis pelo cálculo das correções das coordenadas, o seu custo é menor em relação ao do RTK.

Os dados brutos resultantes do levantamento com a tecnologia PPK, na maioria dos *softwares* de pós-processamento, são lidos em um formato padrão, denominado RINEX (*Receiver-independent Exchange*). Conforme mencionado por El-Rabbany (2002) e Seeber (2003), existem seis arquivos RINEX diferentes: (1) arquivo de dados de observação (*observation data*), (2) arquivo de mensagem de navegação (*navigation messages*), (3) arquivo de dados meteorológicos, (4) arquivo de mensagem de navegação GLONASS, (5) arquivo de dados de satélites geoestacionários e (6) arquivo de dados de relógio de satélite e receptor.

Destes seis arquivos, as extensões (1) e (2) são as utilizadas no fluxo de pós-processamento dos dados. Em (1), geralmente são armazenados os satélites rastreados e de qual GNSS eles pertencem, as efemérides dos satélites, as frequências recebidas, os valores de ambiguidade (fixo ou flutuante), a marca e o modelo do receptor utilizados no rastreamento e a altura da antena. Já em (2), normalmente são armazenados os parâmetros ionosféricos, a saúde dos satélites, a altitude, a inclinação e a época (ano, dia, hora, minuto, segundo) dos satélites.

2.5 SISTEMAS DE DESPACHO E DE GERENCIAMENTO DE EQUIPAMENTOS MÓVEIS

Para otimizar os processos e aumentar a produtividade de equipamentos com menor custo e maior eficiência, algumas mineradoras apostam em *softwares* de despacho e gerenciamento de equipamentos. O uso desta tecnologia possibilita o monitoramento e o controle dos indicadores operacionais e a alocação dos equipamentos na mina, de forma *online*. A ferramenta fornece um diagnóstico completo dos equipamentos e dos operadores em todas as etapas do ciclo produtivo, no qual destaca-se: localização, pontos de carga e descarga, velocidade, estado, massa transportada, tempos de ciclo, distância percorrida, entre outros.

O rastreamento desses parâmetros ao longo do tempo permite ao gestor embasamento técnico na tomada de decisão, pois possibilita identificar os gargalos no ciclo de produção e as perdas no processo produtivo. Dessa forma, uma ação eficaz e uma otimização dos indicadores, além de melhorar o processo como um todo, acarreta na redução dos custos e no aumento da produtividade e, conseqüentemente, no ganho financeiro.

Chironis (1985) relata que a primeira instalação de um sistema de despacho ocorreu em 1979, em uma mina de cobre localizada na cidade de Tyrone (Novo México, Estados Unidos da América). De acordo com Tu e Hucka (1985), o potencial que o sistema de despacho possui de melhorar a utilização da frota de caminhões e carregadeiras é obtido evitando filas excessivas de caminhões em uma carregadeira, enquanto outra pode estar aguardando caminhões.

Dentro de uma mina, existem várias frentes de lavra e em cada uma delas, podem existir minérios de diferentes teores. Um dos objetivos do planejamento de produção em uma mina a céu aberto é determinar o ritmo de extração que será implementado em cada frente, para que se possa atender a alimentação da usina de beneficiamento, tanto em termos de quantidade, quanto em termos de qualidade do minério produzido. Nesse sentido, a implementação de um sistema de despacho é capaz de melhorar a produtividade dos equipamentos (carregadeiras, escavadeiras e caminhões), permitindo um ganho operacional, pois reduz o tempo de espera, há melhor monitoramento, roteirização ótima e controle de qualidade do produto (KOLONJA; KALASKY; MUTMANSKY, 1993; PINTO; MERSCHMANN, 2001; COSTA; SOUZA; PINTO, 2005; RODRIGUES, 2006; RODRIGUES; PINTO, 2012).

Munirathinam e Yingling (1994), Alarie e Gamache, (2002), Wang *et al.* (2006), Ercelebi e Bascetin (2009) e Thompson, Peroni e Visser (2018) destacam que o custo de

transporte em minas a céu aberto corresponde a mais de 50 % do custo operacional. Logo, o objetivo principal dos sistemas computadorizados para despacho de caminhões é a redução dos custos associados ao transporte do minério, devido à utilização mais eficiente dos equipamentos da frota. As obras de White e Olson (1986), White, Olson e Vohnout (1993) e Rodrigues (2006) sugerem que custos de investimento e operacionais podem ser minimizados através da redução do número de equipamentos necessários e do aumento da utilização da mesma frota.

Existem diversas empresas especializadas em *softwares* de sistemas de despacho. Cada uma delas difere na quantidade de módulos fornecidos e nos custos referentes à implementação do sistema, mas se assemelham na forma em que as informações são registradas. Geralmente, em cada equipamento é embarcado um dispositivo terminal com GPS, onde os operadores devem apontar cada atividade que realizam durante o ciclo de operações.

Essas informações são armazenadas em um banco de dados que gera diversos relatórios analíticos que são enviados a uma central de monitoramento e controle das operações, onde é possível visualizar um mapa com as atividades da mina em tempo real. Normalmente há um analista que visualiza as informações de forma intuitiva e prática, e que de forma integrada, avalia o desempenho das operações para uma tomada de decisão estratégica.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Em uma operação de lavra existem algumas maneiras de direcionar o operador à execução do que foi planejado. Geralmente, o operador se baseia em marcações orientadas por estacas na topografia a ser escavada, que representam as poligonais de lavra. Dentre as maneiras de direcionar a operação, há aquela em que o operador realiza a sua atividade através de apontamentos e orientações de supervisores, de forma mais intuitiva. Outra maneira é aquela onde o operador recebe a poligonal através de um terminal embarcado e é direcionado a sua atividade pelo GPS de navegação do terminal. Essas duas maneiras citadas, apesar de serem bastante utilizadas em diversos empreendimentos mineiros, possuem limitações em termos de precisão dos equipamentos móveis.

A metodologia proposta tem como premissa desenvolver uma técnica de avaliação do posicionamento dos equipamentos móveis em uma frente de lavra, cuja principal característica é garantir uma precisão da posição do equipamento na execução de sua operação, em relação ao que foi determinado através dos planos de lavra. Dessa forma, será possível diagnosticar os locais com possíveis divergências de aderência e assim, reduzir as perdas de minério e a diluição dos teores na lavra.

O método é baseado em levantamentos que utilizam as técnicas de posicionamento relativo cinemático, que neste caso é a tecnologia PPK. Um esquema geral das etapas da metodologia pode ser observado no fluxograma da Figura 11. Cada etapa da metodologia será explicada nas seções deste capítulo.

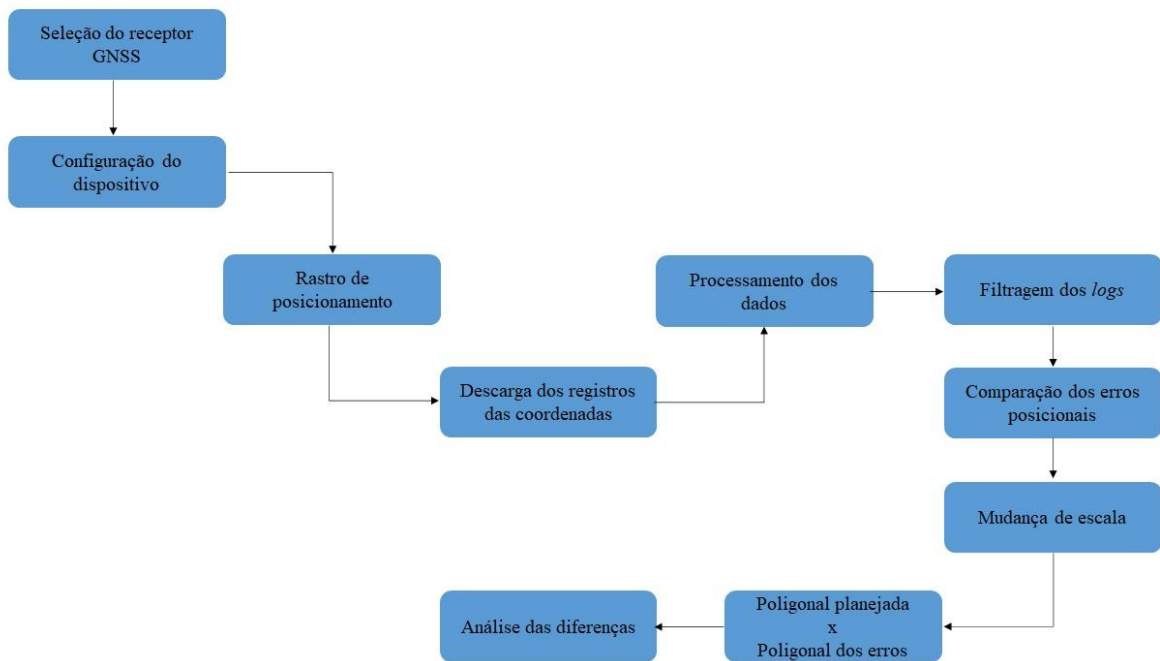


Figura 11: Fluxograma esquemático da metodologia proposta.

3.1 SELEÇÃO DO RECEPTOR GNSS

Primeiramente, antes de realizar a seleção do receptor, realizou-se uma pesquisa de mercado e determinou-se alguns requisitos fundamentais a serem cumpridos, tais como custo de aquisição, dimensões, peso, facilidade de instalação, precisão, etc. A Tabela 1 apresenta alguns modelos de receptores previamente analisados.

Tabela 1: Comparativo de receptores GNSS.

Item	Receptor 1	Receptor 2	Receptor 3
Marca	EMLID	TOPGNSS	HOLYBRO
Modelo	Reach M+	TOP708 high	F9P Helical
Peso (g)	20	200	49
Dimensões (mm)	45,3 x 56,4 x 14,6	85 x 75	34,8 x 36,3 x 12,9
Custo (US\$)	562,00	865,95	459,00

Após a análise dos receptores, apesar de não possuir o menor custo (já incluído o custo da antena), o receptor GNSS adquirido para realização do estudo foi o Reach M+ (Figura 12),

comercializado pela EMLID®, devido à facilidade de instalação e por ser um produto de fácil aquisição no mercado nacional.



Figura 12: Especificações de dimensões do Reach M+. (Fonte: <https://doc.emlid.com.br/reachm-plus/specs/>)

Este receptor é utilizado como *rover* em levantamentos que utilizam métodos de posicionamento cinemático relativo, como RTK e PPK. Suas principais especificações técnicas são listadas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas do Reach M+.

Mecânico		Elétrico		Posicionamento	
Dimensões	56,4 x 45,3 x 14,6 mm	Tensão de entrada em USB e JST GH	4,75 - 5,5 V	Horizontal estático	5 mm + 1 ppm
Peso	20 g	Polarização da antena DC	3,3 V	Vertical estático	10 mm + 2 ppm
Operação t°	-20... + 65 °C	Média consumo @ 5V	200 mA	Cinemático horizontal	7 mm + 1 ppm
				Cinemático vertical	14 mm + 2 ppm
Conectividade		Dados		GNSS	
Rádio LoRa (vendido separadamente)		Correções	NTRIP, RTCM3	Sinal rastreado	GPS / QZSS L1, GLONASS G1, BeiDou B1, Galileo E1, SBAS
Alcance de frequência	868/915 MHz	Saída de posição	NMEA, LLH / XYZ	Número de canais	72
Distância	Até 8 km	Registro de dados	RINEX com eventos com taxa de atualização de até 14 Hz	Atualizar taxas	14 Hz / 5 Hz
Wi-fi	802.11b / g / n	Armazenamento interno	8 GB	IMU	9DOF
Bluetooth	4.0 / 2.1 EDR				
Portas	USB, UART, Evento				

Fonte: <https://emlid.com/br/reach/>

O receptor resiste a temperaturas que variam em um extenso intervalo, o que indica que é possível utilizá-lo em diferentes condições de operação, como em climas secos, úmidos,

quentes ou frios. Também é possível notar que o receptor captura sinais de satélites dos principais sistemas de posicionamento, como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou.

O funcionamento do Reach M+ é relativamente simples, é necessário conectá-lo à uma fonte de energia de 5 V e à sua antena receptora de sinal (Figura 13). Antes de ligá-lo, deve-se escolher um lugar adequado para o posicionamento da antena, uma vez que isto é essencial para alcançar resultados mais precisos de localização do equipamento que esteja sendo monitorado. A antena possui 38 mm de diâmetro, 14 mm de espessura e pesa 50 g.



Figura 13: Antena multi-GNSS Tallysman.
Fonte:
<https://loja.emlid.com.br/product/tallysman-multi-gnss-antenna/>

Para que o receptor funcione de maneira adequada, existem requisitos mínimos para a instalação da antena. O céu deve estar limpo e livre de obstáculos que possam bloquear a recepção do sinal dos satélites pela antena, como por exemplo edifícios, árvores, carros, etc. Também deve-se evitar a proximidade de dispositivos eletrônicos da antena, pois eles podem produzir ruídos de radiofrequência que podem causar interferência no sinal recebido. Caso não seja possível manter uma distância adequada destes dispositivos, é recomendável instalar uma chapa metálica sob a antena, de forma a gerar um plano de aterramento capaz de blindá-la e melhorar a recepção do sinal.

Basicamente, o ideal seria instalar o receptor em uma escavadeira, onde a placa ficaria fixada na parte interna do equipamento, conectado à fonte de energia existente (geralmente na fonte do isqueiro). Já a antena seria fixada na parte externa do equipamento, preferencialmente no teto.

3.2 CONFIGURAÇÃO DO DISPOSITIVO

Para conseguir acessar as configurações e assumir o controle total do Reach M+, a EMLID® disponibiliza o aplicativo ReachView, cuja interface inicial pode ser observada na Figura 14. Ele é bem intuitivo e relativamente simples de usar, porém possui vários recursos que serão detalhados nessa seção para esclarecer as funcionalidades do dispositivo. O acesso às configurações é realizado por qualquer dispositivo com um navegador (computador, *tablet*, *smartphone*) e não requer conexão com a internet. O ReachView é hospedado no próprio Reach M+ e é acessado via conexão Wi-Fi, sendo compatível com os sistemas operacionais Windows, OSX, Linux, Android e iOS.

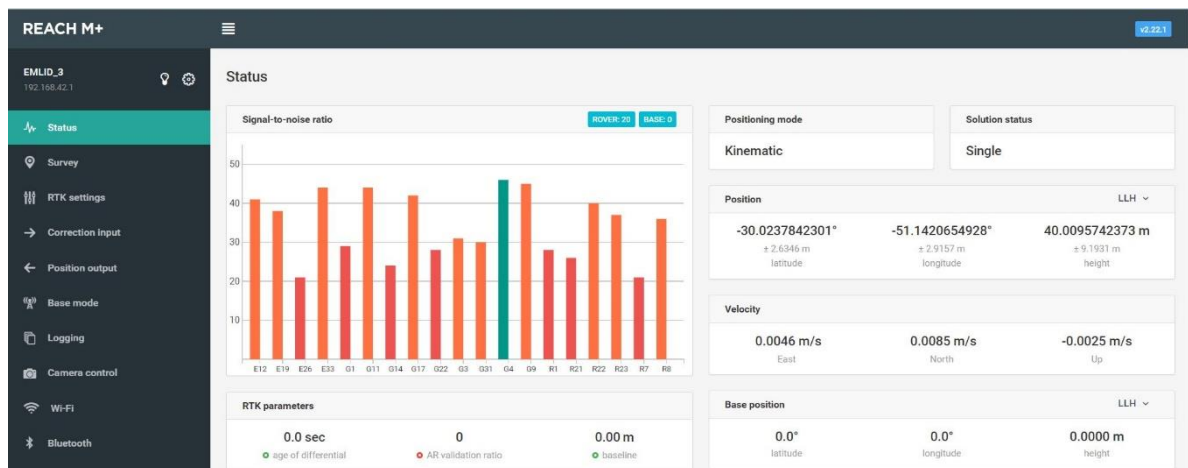


Figura 14: Interface inicial do aplicativo ReachView.

Para realizar um levantamento de coordenadas precisas pelo método de posicionamento cinemático relativo de pós-processamento, utilizam-se algumas janelas do menu listado à esquerda da Figura 14. Na janela “Status” (Figura 15), tem-se um painel com todas as informações no que diz respeito à posição e à recepção dos satélites, que podem ser observadas através de um gráfico. Esse gráfico denominado *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), apresenta os indicadores de qualidade da recepção de sinal dos satélites, com atualizações em tempo real.

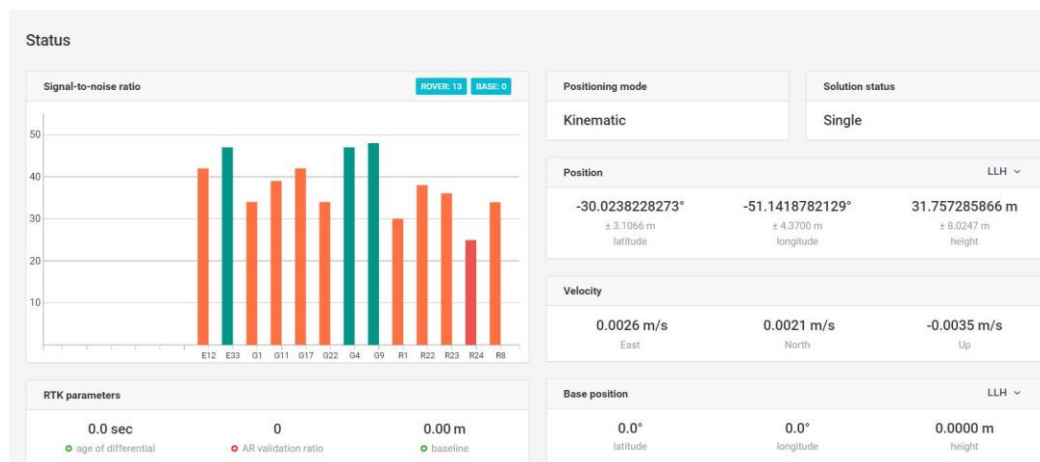


Figura 15: Janela do item “Status”.

No eixo horizontal do gráfico, cada barra vertical representa um satélite GNSS cujo sinal foi capturado pela antena do receptor e a legenda de letras representa o sistema de posicionamento aos quais os satélites pertencem (R – GLONASS, G – GPS, E – Galileo, C – BeiDou). Já o eixo vertical representa a qualidade do sinal, representado em verde por SNR superior a 45, em laranja por SNR inferior a 45 e em cinza pelo SNR da estação base. O objetivo é conseguir obter o maior número de “satélites verdes” possíveis, o que tornará as medições mais precisas e com resolução de ambiguidade rápida. No topo do gráfico SNR, é possível verificar os indicadores de números de satélites visíveis para receptores *rover* e base. O ideal é um número de satélites visíveis superior a 4 para receptores *rover*.

Ainda na janela “Status”, no item “Positioning mode” define-se qual o método de posicionamento será escolhido: (1) *Kinematic*, (2) *Static* e (3) *Single*. Já no item “Solution status”, define-se como o *software* processará as informações: (1) *Single*, o que significa que o *rover* encontrará uma solução que depende de seu próprio receptor e não há correções de nenhuma base. Essas correções serão realizadas no pós-processamento; (2) *Float*, significa que as correções da base são levadas em consideração e o posicionamento é relativo às coordenadas da base, porém sem resolução de ambiguidades; (3) *Fix*, significa que o posicionamento é relativo à base e há resolução de ambiguidades.

Na janela “RTK Settings” há diversos itens para serem configurados, como por exemplo o modo de posicionamento, a resolução de ambiguidades, o conjunto de sistemas GNSS buscados, etc. A Figura 16 apresenta a janela *RTK Settings* com seus respectivos itens.

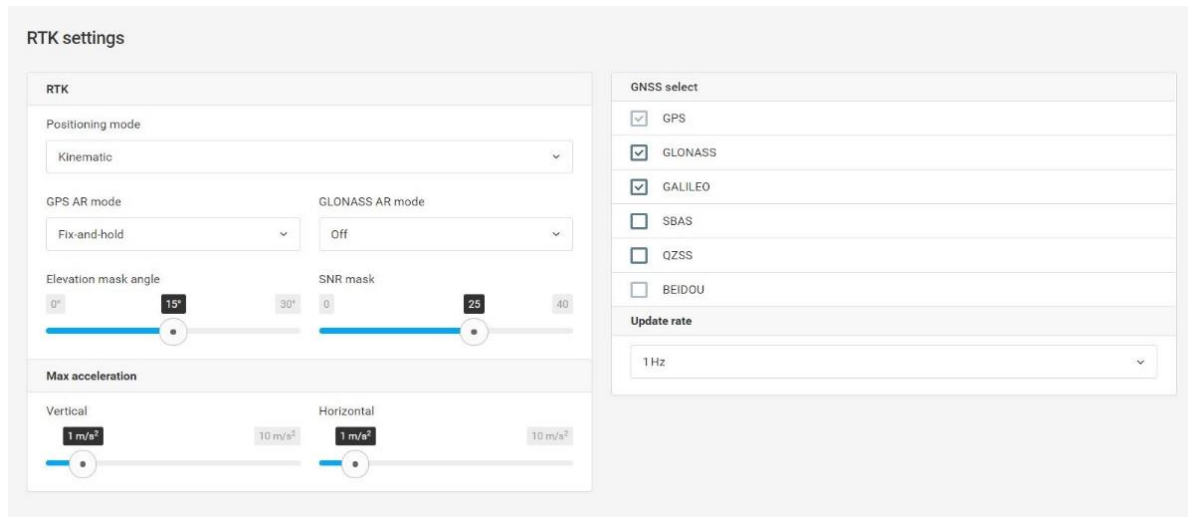


Figura 16: Janela RTK Settings.

O item “*Positioning mode*”, corresponde aos modos de posicionamento: (1) *Single* – modo de posicionamento sem fonte de correção; (2) *Kinematic* – modo de posicionamento em que pressupõe que o receptor está se movendo; (3) *Static* – método de posicionamento em que se supõe que o receptor está estático.

O item “*GPS AR mode*” corresponde às principais estratégias para a resolução de ambiguidades: (1) *Fix-and-hold* - significa que após a primeira ambiguidade fixa (resolvida), ela será mantida; (2) *Continuous* - ambiguidades são resolvidas, época por época. Já no item “*Glonass AR mode*”, a recomendação geral é para manter sempre desligado (*off*). Todos os satélites GLONASS transmitem em frequências diferentes, o que resulta em *Inter Channel Biases* (ICB) que são exclusivos para cada modelo de receptor.

No item “*Elevation mask angle*” é definido um ângulo mínimo de inclinação que o satélite forma com a antena do *rover*, para determinar quais satélites serão considerados no cálculo. Satélites com ângulos inferiores ao definido, serão excluídos do cálculo. A configuração padrão é de 15°. Geralmente os satélites com menor elevação em relação ao horizonte fornecem dados com muitos ruídos.

No item “*SNR mask*” é definido um patamar de SNR para os satélites, cujos valores abaixo desse patamar serão excluídos do cálculo. A configuração padrão é 25. No item “*Max acceleration*” a configuração padrão é de 1 m/s², tanto na vertical quanto na horizontal. No item “*GNSS select*” é definido o conjunto de sistemas GNSS que serão buscados pelo receptor para obter sinal. No item “*Update rate*” é determinada a frequência com que os dados serão coletados.

Na janela “*Logging*”, é definido o modo como os registros (*logs*) do levantamento serão armazenados. O Reach M+ pode registrar dados brutos (*raw data*), registro de posição (*position*) e correções de base (*base correction*), como pode ser observado na Figura 17.

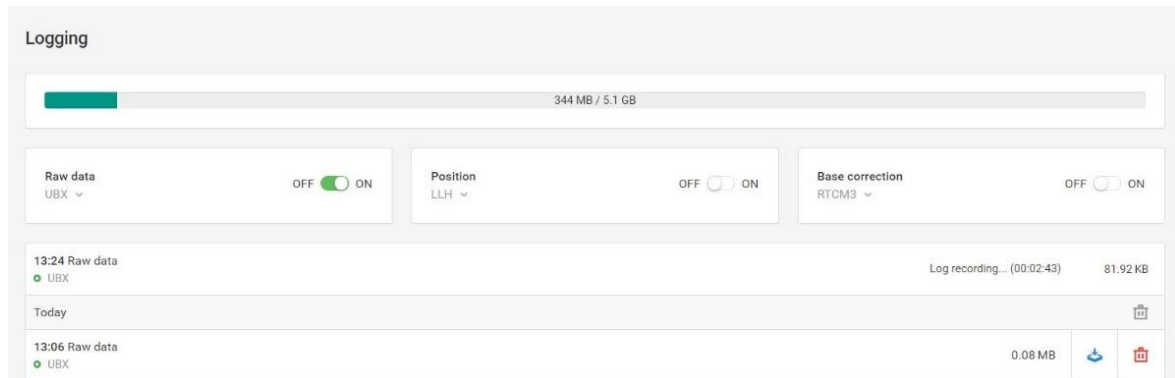


Figura 17: Janela *Logging*.

O item “*Raw data*” contém as observações GNSS do receptor, sem o cálculo de coordenadas precisas. Pode ser gravado no formato u-blox (UBX) ou diretamente no formato RINEX (padrão da indústria). No momento em que o modo “*on*” estiver acionado e o sinal dos satélites for reconhecido, os registros começam a ser armazenados. Para interromper a coleta de dados, basta acionar o modo “*off*”. Assim é possível realizar o *download* dos registros.

O item “*Position*” contém o formato de posição em que os registros podem ser armazenados: (1) LLH – Latitude, Longitude e Altitude; (2) XYZ – Coordenadas X, Y e Z; (3) ENU – Leste, Norte e Elevação; (4) NMEA - conjunto de especificações de dados que seguem um protocolo, onde geram mensagens suportadas em diferentes formatos: GPRMC, GPGGA, GPGSA, GLGSA, GAGSA, GPGSV, GLGSV, GAGSV; (5) ERB - O formato ERB é usado para comunicação com o *Ardupilot* (utilizado principalmente em levantamentos com drones).

O item “*Base correction*” contém o formato de *log* definido pelas correções que o Reach M+ recebe da base. Se o próprio Reach M+ for usado como base, esse *log* será registrado em formato RTCM3.

3.3 RASTRO DE POSICIONAMENTO

Antes de iniciar o rastro de posicionamento para a coleta de dados, o dispositivo foi inicializado, conectado à sua antena e teve-se acesso ao aplicativo ReachView, onde todas as

configurações necessárias para a realização do levantamento foram ajustadas. A Tabela 3 apresenta um resumo dos itens ajustados nas principais janelas do menu do aplicativo.

Tabela 3: Sumário das configurações usadas do Reach M+ no aplicativo ReachView.

Janela	Item	Configuração
	<i>Positioning Mode</i>	<i>Kinematic</i>
<i>Status</i>	<i>Solution Status</i>	<i>Single</i>
	<i>Position</i>	LLH
	<i>Positioning Mode</i>	<i>Kinematic</i>
	<i>GPS AR mode</i>	<i>Fix-and-Hold</i>
	<i>GLONASS AR mode</i>	<i>Off</i>
	<i>Elevation mask angle</i>	15°
<i>RTK Settings</i>	<i>SNR mask</i>	25*
	<i>Max acceleration vertical</i>	1 m/s ²
	<i>Max acceleration horizontal</i>	1 m/s ²
	<i>GNSS select</i>	GPS, GLONASS, Galileo
	<i>Update rate</i>	1 Hz
	<i>Raw data (UBX)</i>	<i>on</i>
<i>Logging</i>	<i>Position</i>	<i>off</i>
	<i>Base correction</i>	<i>off</i>

* 25 é um valor padrão. Se houver muitos problemas de ruído no sinal do satélite, esse valor deve ser aumentado, garantindo assim, melhor qualidade de sinal.

Após o ajuste das configurações necessárias, para dar início ao rastro de posicionamento com tecnologia PPK, o receptor foi conectado a um *notebook* e iniciou-se uma caminhada para o levantamento das coordenadas em um ambiente externo e durante uma tarde ensolarada, dentro de uma poligonal previamente determinada, cujas coordenadas de seus vértices já estavam devidamente georreferenciadas. Como não foi possível realizar a coleta de dados em uma operação de lavra *in loco*, onde o receptor seria instalado em uma escavadeira, o registro de posicionamento simula a movimentação da escavadeira situada sobre uma poligonal de lavra de uma mina a céu aberto.

Durante a movimentação, o registro de coordenadas foi sendo armazenado pelo

receptor, em um arquivo, a uma frequência de 1 Hz, ou seja, a cada segundo foram registradas a latitude, a longitude e a altitude de um determinado ponto. Após uma coleta suficiente de dados (durante 4 minutos de caminhada), o rastro foi encerrado e fez-se a descarga (*download*) dos registros das coordenadas, através de um arquivo em formato UBX.

3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Esta é umas das principais etapas da metodologia, uma vez que a partir do processamento dos dados coletados no rastro de posicionamento, será possível obter uma maior precisão desses dados. Para realizar o processamento foi utilizado o *software* RTKLIB, que possui um pacote de programas de código aberto para posicionamento padrão e preciso com o GNSS, através de bibliotecas capazes de realizar o processamento dos dados. No fluxo deste trabalho, os módulos empregados serão o RTKCONV e o RTKPOST.

Nesta etapa, se faz necessário o conhecimento das coordenadas da estação base. Essas coordenadas foram obtidas através da instalação de um receptor estático com uma antena em um ponto fixo, próximo ao local do levantamento. Posteriormente essas coordenadas de base foram corrigidas, sendo georreferenciadas ao *datum* SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

Iniciando a etapa de processamento, primeiramente os arquivos de dados brutos registrados pelo *rover* em formato u-blox foram convertidos para o formato RINEX, através do módulo RTKCONV. Ao executar o aplicativo, uma janela principal é aberta (Figura 18) onde foram escolhidos os dados de entrada para a conversão.

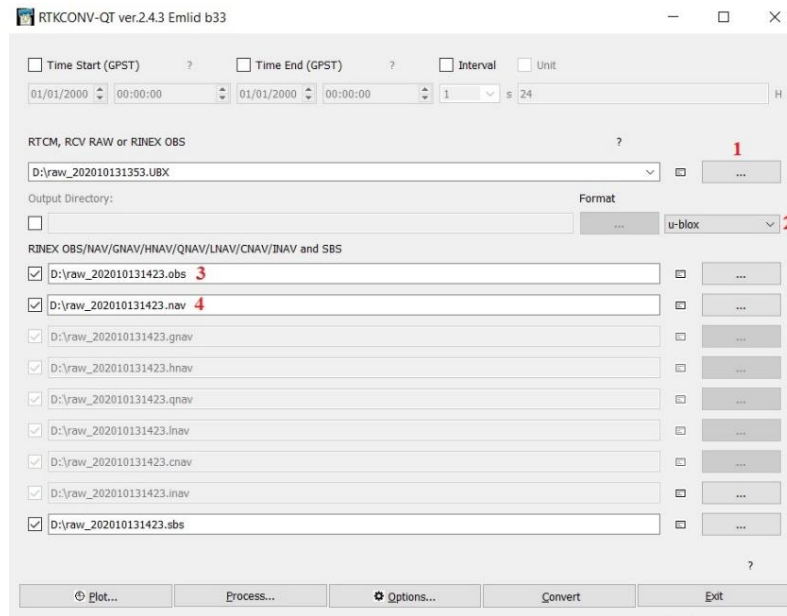


Figura 18: Janela principal do RTKCONV.

Ao selecionar o botão (1), o usuário é direcionado ao diretório onde se encontra o arquivo de entrada (dados brutos, raw_202010131423.UBX). No *drop-down Format* (2), foi escolhido o formato em que os dados brutos foram salvos, neste caso u-blox. As caixas de diálogo (3) e (4) mostram o diretório onde os arquivos de saída são armazenados. Estes arquivos de saída têm formato RINEX OBS (*observation data*, raw_202010131423.obs) e RINEX NAV (*GPS navigation messages*, raw_202010131423.nav). Selecionando o botão “Options”, uma nova janela é aberta (Figura 19), onde o usuário configura as opções de RINEX.

Figura 19: Janela *Options* do RTKCONV.

No *drop-down* “RINEX Version” (1), foi escolhida a versão RINEX, para qual os dados brutos são convertidos. Em (2), todas as *checkbox* foram marcadas. Em “*Satellite Systems*” (3), foram marcadas as *checkbox* correspondentes aos sistemas de satélite utilizados para o levantamento, neste caso GPS, GLO (GLONASS) e GAL (GALILEO). Em “*Observation Types*” (4), todas as *checkbox* foram marcadas. Em “*Frequencies*” (5), foram marcadas as frequências em que os GNSS trabalham, neste caso L1, L2 e L5/3.

Após realizar todas as configurações, o usuário seleciona o botão “OK”. Em seguida, ao voltar para a janela principal, o usuário seleciona o botão “*Convert*” e espera até que a conversão seja finalizada, onde então os arquivos de saída .obs e .nav estarão prontos para dar seguimento à próxima etapa.

Seguindo o fluxo do trabalho, tem-se a etapa onde ocorre de fato o processamento dos dados, através do aplicativo RTKPOST. Ao executar o aplicativo, uma janela principal é aberta (Figura 20) onde foram escolhidos os dados de entrada para o processamento.

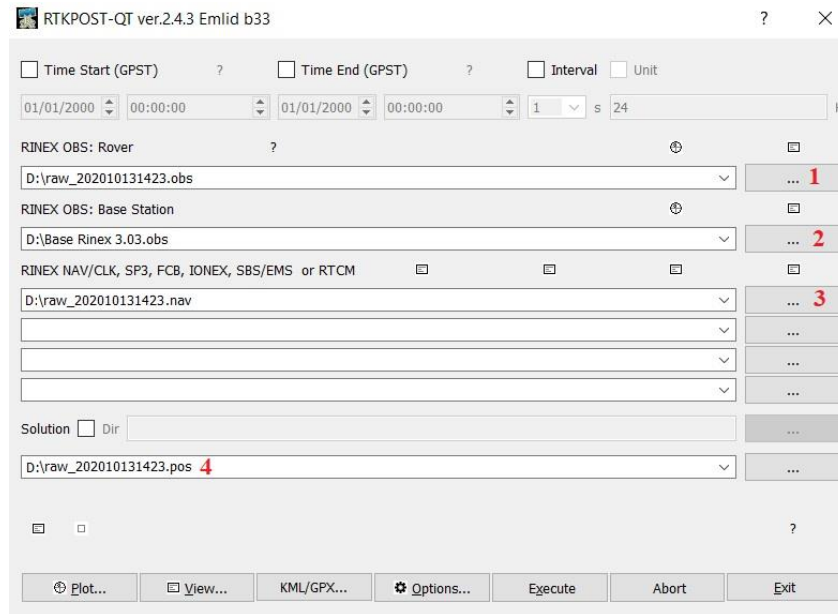


Figura 20: Janela principal do RTKPOST.

Ao selecionar o botão (1), o usuário é direcionado ao diretório onde se encontra o arquivo RINEX OBS do *rover* (raw_202010131423.obs). No botão (2), é direcionado ao diretório onde se encontra o arquivo RINEX OBS da base (Base Rinex 3.03.obs). No botão (3), será direcionado ao diretório onde se encontra o arquivo RINEX NAV do *rover* (raw_202010131423.nav). A caixa de diálogo (4) mostra o diretório onde o arquivo de saída (raw_202010131423.pos) é armazenado.

Selecionando o botão “Options”, uma nova janela será aberta, onde o usuário ajusta as opções de posicionamento, dentre as diversas abas de configurações. Na aba “Setting1”, o usuário escolhe as opções no *drop-down* dos itens (1) *Positioning Modes*, (2) *Frequencies/Filter Type*, (3) *Elevation Mask* e (4) *Rec Dynamics/Earth Tides Correction*, além de marcar as *checkbox* correspondentes aos sistemas de satélite GPS, GLO (GLONASS) e GAL (Galileo), conforme a Figura 21.

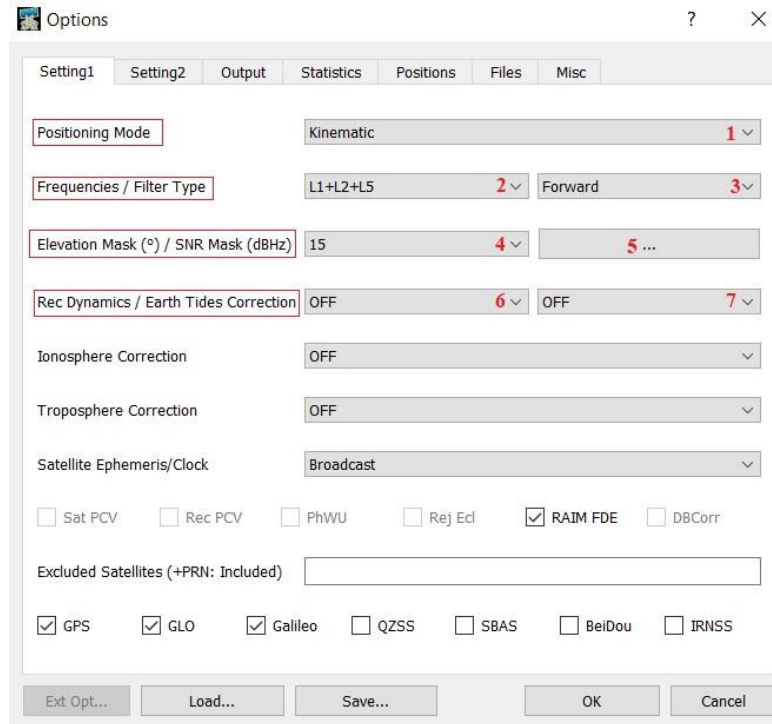


Figura 21: Aba *Setting1* da janela *Options*.

A opção escolhida no *drop-down* (1), refere-se o modo de posicionamento do *rover* (Single, DGPS/DGNSS, *Static*, *Kinematic*, *Moving-Base*, *Fixed*, *PPP Kinematic*, *PPP Static*, *PPP Fixed*). No *drop-down* (2), deve ser selecionado as frequências dos satélites (L1, L1+L2, L1+L2+L5, L1+L5). No *drop-down* (3), deve-se escolher o tipo de filtragem que será utilizado no processamento das soluções (*Forward* – começa a filtragem pela primeira solução; *Backward* – começa a filtragem pela última solução; *Combined* – combina as duas filtragens anteriores e realiza uma média). No *drop-down* (4), deve-se definir o ângulo de inclinação que o satélite faz com a antena do *rover*. No botão (...) (5), deve-se definir os limites do SNR para rejeitar os sinais dos satélites para cada 5 graus de zonas de elevação. Se ambas as máscaras do *rover* e da estação-base não forem verificadas nas *checkbox*, estas máscaras SNR não são aplicadas. A Figura 22 mostra a janela de seleção que é aberta ao selecionar o botão (...).

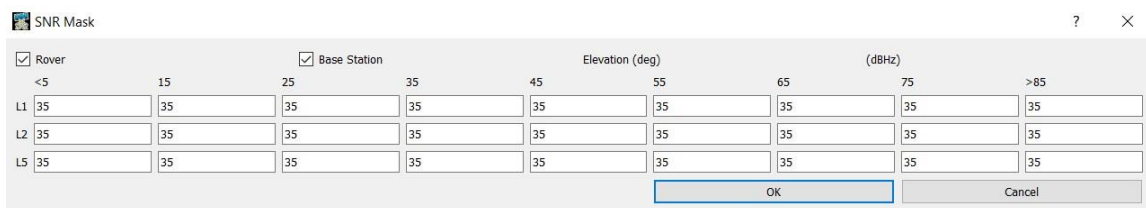


Figura 22: *SNR Mask*.

Seguindo na Figura 21, no *drop-down* (6), deve-se definir o modelo dinâmico do *rover*, ou seja, a opção ON estima a velocidade e a aceleração do *rover* e a opção OFF, não o faz. No *drop-down* (7), deve-se definir se a correção das marés terrestres é aplicada ou não (OFF – não se aplica a correção das marés terrestres; *Solid* – se aplica a correção de marés em terra; *Solid/OTL* – se aplica a correção de marés em terra, OTL (carregamento de marés oceânicas) e correções de marés polares. Nos demais itens, as opções permanecem idênticas às configurações default.

Na aba “*Setting2*” a única opção ajustada no *drop-down* é “*Integer Ambiguity Resolution Res*” (GPS/GLO/BDS). Nos demais itens, as opções permanecem idênticas às configurações “*default*”, conforme a Figura 23.

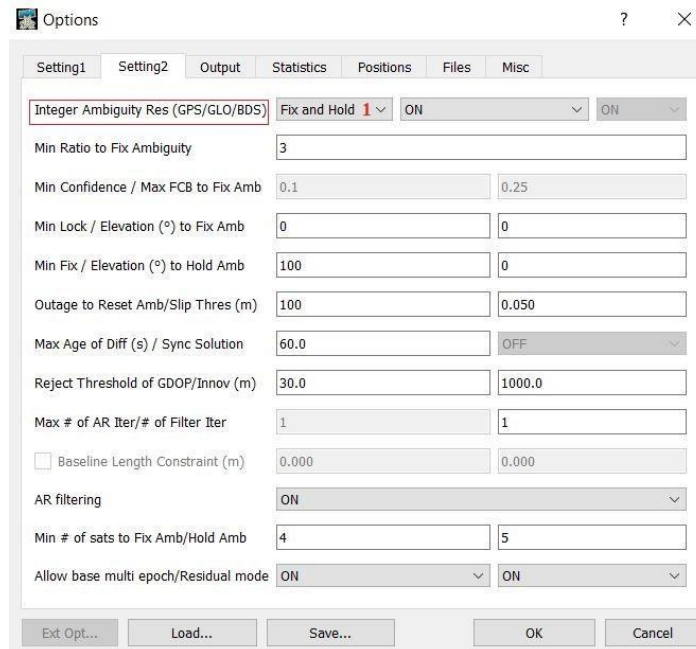


Figura 23: Aba *Setting2* da janela *Options* do RTKPOST.

No *drop-down* (1), deve-se definir a estratégia de resolução de ambiguidade inteira (OFF – sem resolução de ambiguidade; *Continuous* - as ambiguidades continuamente estáticas inteiras são estimadas e resolvidas; *Instantaneous* - as ambiguidades inteiras são estimadas e resolvidas época por época; *Fix and Hold* - as ambiguidades continuamente estáticas inteiras são estimadas e resolvidas. Se a validação estiver OK, as ambiguidades são fortemente limitadas aos valores resolvidos; *PPP AR* - resolução de ambiguidade em PPP experimental). Nos demais itens, as opções permanecem idênticas às configurações *default*.

Na aba “*Output*”, que se refere ao arquivo de saída, o usuário escolhe as opções no *drop-down* dos itens (1) “*Solution Format*”, (2) “*Output Header/Output Processing Options*”, (3) “*Time Format/# of decimals*”, (4) “*Latitude Longitude Format*” e (5) “*Output Solution Status/Output Debug Trace*”. Essas configurações podem ser visualizadas na Figura 24.

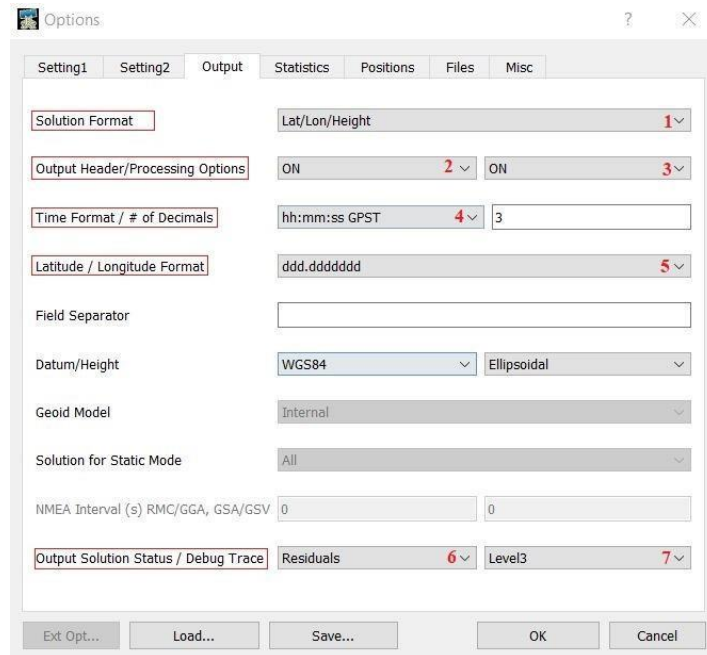


Figura 24: Aba *Output* da janela *Options*.

A opção escolhida em (1) refere-se ao formato de leitura das coordenadas do *rover* (latitude, longitude e altitude); em (2) define-se as opções de cabeçalho e de processamento; em (3) define-se o formato de hora (hora, minuto, segundo); em (4) define-se em qual sistema as coordenadas serão apresentadas (graus decimais); em (5) define-se o status do arquivo de saída (resíduo) e se a depuração do arquivo de saída será realizada (OFF). Nos demais itens, as opções permanecem idênticas às configurações “*default*”.

Na aba “*Positions*”, que se refere às coordenadas geodésicas da base, o usuário escolhe a opção no *drop-down* do item “*Base Station*”, que diz respeito ao sistema em que as coordenadas da base são inseridas, assim como a altura da antena conforme apresentado na Figura 25.

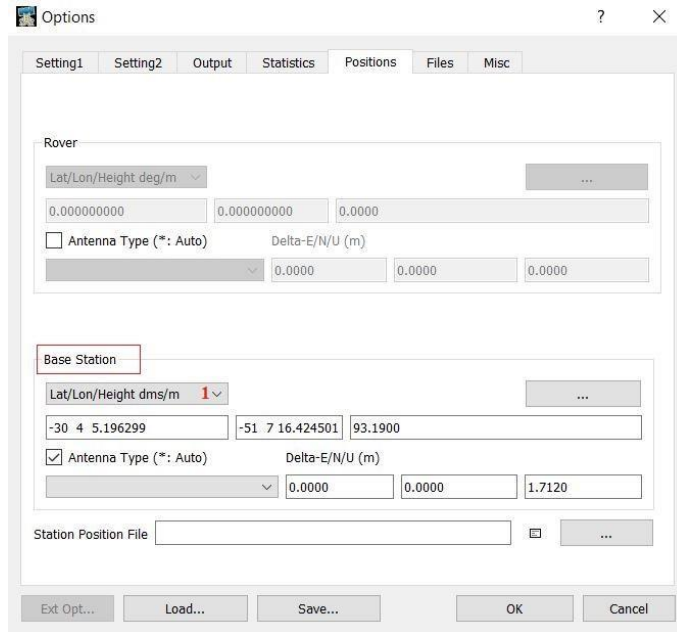


Figura 25: Aba *Positions* da janela *Options* do RTKPOST.

No *drop-down* (1), deve-se definir a posição da antena da estação-base, neste caso *Lat/Lon/Height (dms/m)* - latitude e longitude em grau, minuto, segundo e altitude em metros. A *checkbox* referente à *Antenna Type (*:Auto)* deve estar selecionada e nas caixas de diálogo de *Delta-N/E/U*, deve-se inserir a altura da antena da estação-base.

Após realizar todas as configurações de posicionamento da janela “*Options*”, o usuário seleciona o botão “*OK*”. Em seguida, ao voltar para a janela principal, seleciona o botão “*Execute*” e espera até que o processamento seja realizado. Para a metodologia proposta, serão realizados 12 processamentos, através da combinação das configurações das abas *Setting1* e *Setting2*. As configurações das demais abas permanecem iguais, conforme apresentado anteriormente.

A Tabela 4 apresenta as configurações que serão alteradas nas abas *Setting1* e *Setting2*. Já a Tabela 5, apresenta as 12 combinações propostas com os dados da Tabela 4.

Tabela 4: Configurações das abas *Setting1* e *Setting2* utilizadas nas combinações.

Settings 1	
	<i>Forward</i>
<i>Filter Type</i>	<i>Backward</i>
	<i>Combined</i>
	<i>Checkbox</i>
<i>SNR Mask</i>	<i>No checkbox</i>
Settings 2	
	<i>Fix and Hold</i>
<i>Integer Ambiguity Res</i>	<i>Continuous</i>

Tabela 5: Combinações das configurações das abas *Setting1* e *Setting2*.

Combinação	Settings 1		Settings 2
	<i>Filter Type</i>	<i>SNR Mask</i>	<i>Integer Ambiguity Res</i>
C01	<i>Forward</i>	<i>Checkbox</i>	<i>Fix and Hold</i>
C02	<i>Forward</i>	<i>Checkbox</i>	<i>Continuous</i>
C03	<i>Forward</i>	<i>No checkbox</i>	<i>Fix and Hold</i>
C04	<i>Forward</i>	<i>No checkbox</i>	<i>Continuous</i>
C05	<i>Backward</i>	<i>Checkbox</i>	<i>Fix and Hold</i>
C06	<i>Backward</i>	<i>Checkbox</i>	<i>Continuous</i>
C07	<i>Backward</i>	<i>No checkbox</i>	<i>Fix and Hold</i>
C08	<i>Backward</i>	<i>No checkbox</i>	<i>Continuous</i>
C09	<i>Combined</i>	<i>Checkbox</i>	<i>Fix and Hold</i>
C10	<i>Combined</i>	<i>Checkbox</i>	<i>Continuous</i>
C11	<i>Combined</i>	<i>No checkbox</i>	<i>Fix and Hold</i>
C12	<i>Combined</i>	<i>No checkbox</i>	<i>Continuous</i>

Os arquivos de saída podem ser facilmente abertos em formato de texto (.txt). Nas primeiras linhas de cabeçalho dos arquivos, são exibidas algumas informações que foram pré-

definidas no executável do RTKPOST. As principais informações dizem respeito às 15 colunas com os dados dos *logs* pós-processados. A Tabela 6 apresenta cada item junto a sua descrição.

Tabela 6: Descrição de cada item referente aos *logs* do arquivo de saída.

Item	Descrição
GPST	Tempo de recepção do sinal do receptor. Formato: aaaa/mm/dd e hh:mm:ss
latitude	Coordenada em graus decimais
longitude	Coordenada em graus decimais
<i>height</i>	Altitude em metros
Q	Indica o índice de qualidade do <i>log</i> . 1: <i>Fix</i> , posicionamento é relativo à base e a ambiguidade está resolvida. Precisão em nível centimétrico; 2: <i>Float</i> , correções base agora são levadas em consideração e o posicionamento é relativo às coordenadas de base, mas a ambiguidade não está resolvida. Precisão em nível submétrico; 3: <i>Reserved</i> ; 4: DGPS, baseado em posicionamento <i>single</i> com correções SBAS; 5: <i>Single</i> , depende de seu próprio receptor e não há correções de nenhuma base. Precisão em nível métrico.
ns	Número de satélites utilizados nos cálculos
sdn, sde, sdu, sdne, sdeu, sdun	Desvios-padrão estimados assumindo um modelo de erro a priori e parâmetros de erro pelas opções de posicionamento (em metros). sdn: desvio padrão da componente norte (latitude); sde: desvio padrão da componente leste (longitude); sdu: desvio padrão da componente <i>up</i> (altitude); sdne, sdeu, sdun: raiz quadrada do valor absoluto das componentes NE, EU e UN da matriz de covariância estimada. O sinal representa o sinal da covariância.
<i>age</i>	Diferença de tempo entre o período de observação dos dados do receptor móvel e da estação base, em segundos.
<i>ratio</i>	Fator de proporção para validação da ambiguidade. O valor significa a razão da soma quadrada dos resíduos com o segundo melhor vetor inteiro e com o melhor vetor inteiro.

As 12 combinações de processamento foram realizadas com o objetivo de testar qual seria a melhor configuração a ser utilizada nos possíveis processamentos futuros. Definiu-se então, que a melhor configuração seria aquela que produzisse o menor erro médio das coordenadas, após a realização da filtragem dos *logs*.

3.5 FILTRAGEM DOS LOGS

Os arquivos de saída do processamento possuem por vezes *logs* com qualidade (Q) do tipo *single* (5), em que não há correção de nenhuma base. Neste caso a precisão é baixa, logo o erro associado é maior do que se espera. Como se busca *logs* com qualidade de sinal dos tipos *fix* (1) e *float* (2), cuja precisão é maior e, conseqüentemente, há menor erro em relação à posição das coordenadas antes do processamento, é feita uma filtragem dos *logs*, onde são excluídos àqueles cujo valor de Q seja diferente de 1 e 2. Após essa filtragem, foi realizada uma análise cujo objetivo era verificar os erros associados às coordenadas, para cada uma das 12 combinações de processamento e assim definir qual delas seria considerada para o restante da metodologia.

3.6 COMPARAÇÃO DOS ERROS POSICIONAIS

Após a escolha dos *logs* da combinação com menor média de erro, foi feita uma análise comparativa entre as coordenadas corrigidas, com as coordenadas acrescidas dos erros do processamento e as coordenadas corrigidas acrescidas do erro do GPS de navegação do terminal. Como o rastro de posicionamento realizado simula a movimentação de uma escavadeira em uma frente de lavra e deseja-se comparar erros posicionais, foi necessário criar um banco de dados com coordenadas que representassem o registro de um GPS de navegação do sistema de despacho da escavadeira. Assim, pode-se comparar os registros posicionais do receptor e do GPS, para as coordenadas em um mesmo instante de tempo.

O banco de dados criado foi obtido através da soma de um valor de erro às coordenadas corrigidas. Neste caso, o valor somado foi baseado em um estudo de van Diggelen e Enge (2015), onde os autores evidenciaram que os *smartphones* habilitados para GPS têm geralmente uma precisão de 4,9 m de raio a céu aberto, mas que piora conforme o dispositivo se aproxima a obstáculos que possam interferir na recepção do sinal dos satélites do sistema GNSS utilizado. Outro estudo que avalia a qualidade das informações de receptores GPS de navegação é o de Santos *et. al* (2016), o qual indica que estes receptores possuem erros da ordem de 3,0 m a 9,0 m em relação às informações obtidas por um receptor GPS geodésico.

Baseados nestes estudos então, por padronização e arredondamento, a precisão atribuída foi de 5 m, ou seja, o maior erro admitido foi de 5 m. A soma dos erros foi realizada através de

um processo aleatório, onde para cada par de coordenadas corrigidas (x, y) foi gerado um erro que variava de -5 m a 5 m (raio máximo), uma vez que essa variação pode ser longitudinal em Leste-Oeste (x) e latitudinal em Norte-Sul (y). Desta forma, é garantido que a nova coordenada somada ao erro estará respeitando os 5 m de raio e não haverá enviesamento do banco de dados. Como o processo utilizado é aleatório, foram criados oito arquivos distintos para fins de comparação.

3.7 MUDANÇA DE ESCALA

Além da criação de um novo banco de dados, também foi necessário realizar uma mudança de escala para que a área da poligonal onde foi realizado o rastro de posicionamento, pudesse ser alocada sobre um modelo de blocos teórico. Como a área da poligonal era relativamente pequena comparada ao tamanho dos blocos (10 m x 10 m x 10 m, respectivamente, nas direções x, y e z), definiu-se uma mudança de escala de modo que contemplasse 5 blocos na direção x e 6 blocos na direção y, para posteriormente fosse possível analisar a diluição dos teores nesses blocos. Sendo assim, a mudança de escala foi baseada conforme o esquema representado na Figura 26.

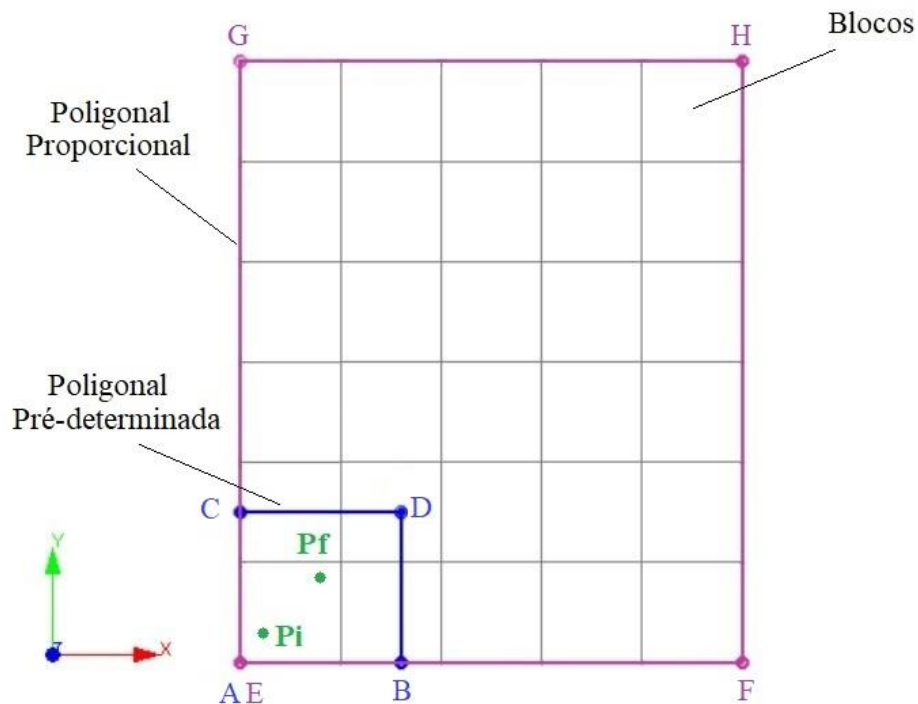


Figura 26: Representação esquemática da mudança de escala.

A partir do desenho da Figura 26, foram realizados cálculos para representar a mudança de escala. Esses cálculos são demonstrados nas Equações 4 e 5.

$$\begin{aligned}
 \frac{\text{dist}(P_i, \overline{AC})}{\text{dist}(P_f, \overline{EG})} &= \frac{\text{dist}(P_i, \overline{BD})}{\text{dist}(P_f, \overline{FH})} \\
 &\therefore \\
 \frac{x_{P_i} - x_{\overline{AC}}}{x_{P_f} - x_{\overline{EG}}} &= \frac{x_{\overline{BD}} - x_{P_i}}{x_{\overline{FH}} - x_{P_f}} \\
 &\therefore \\
 x_{P_f} &= \frac{x_{\overline{AC}} \cdot (x_{P_i} - x_{\overline{BD}} + x_{\overline{FH}}) - x_{P_i} \cdot x_{\overline{FH}}}{x_{\overline{AC}} - x_{\overline{BD}}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\text{dist}(P_i, \overline{AB})}{\text{dist}(P_f, \overline{EF})} &= \frac{\text{dist}(P_i, \overline{CD})}{\text{dist}(P_f, \overline{GH})} \\
 &\therefore \\
 \frac{y_{P_i} - y_{\overline{AB}}}{y_{P_f} - y_{\overline{EF}}} &= \frac{y_{\overline{CD}} - y_{P_i}}{y_{\overline{GH}} - y_{P_f}} \\
 &\therefore \\
 y_{P_f} &= \frac{y_{\overline{AB}} \cdot (y_{P_i} - y_{\overline{CD}} + y_{\overline{GH}}) - y_{P_i} \cdot y_{\overline{GH}}}{y_{\overline{AB}} - y_{\overline{CD}}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Onde:

P_i : Ponto inicial;

P_f : Ponto final;

x_{P_i} : Coordenada x de P_i ;

x_{P_f} : Coordenada x de P_f ;

$x_{\overline{AC}}$: Coordenada x da reta \overline{AC} ;

$x_{\overline{BD}}$: Coordenada x da reta \overline{BD} ;

$x_{\overline{EG}}$: Coordenada x da reta \overline{EG} ;

$x_{\overline{FH}}$: Coordenada x da reta \overline{FH} ;

y_{P_i} : Coordenada y de P_i ;

y_{P_f} : Coordenada y de P_f ;

$y_{\overline{AB}}$: Coordenada y da reta \overline{AB} ;

$y_{\overline{CD}}$: Coordenada y da reta \overline{CD} ;

$y_{\overline{EF}}$: Coordenada y da reta \overline{EF} ;

$y_{\overline{GH}}$: Coordenada y da reta \overline{GH} ;

Na Figura 26, em azul tem-se a poligonal pré-determinada e em rosa, a poligonal em uma escala maior. Os pontos em verde P_i e P_f representam, respectivamente, um par de coordenadas do rastro de posicionamento original e um par de coordenadas do rastro em uma escala maior. Cada ponto coletado no rastro, foi modificado através dos cálculos das Equações 4 e 5, assim como os vértices da poligonal planejada.

3.8 POLIGONAL PLANEJADA X POLIGONAIS DOS ERROS

Depois de terem sido criados 8 bancos de dados que representam os registros do GPS de navegação do sistema de despacho da escavadeira, juntamente com o arquivo que acrescentava os erros do processamento, realizou-se uma análise utilizando o *software* Studio OP, da Datamine®. A partir das coordenadas dos erros do GPS, foram criadas novas poligonais que contemplam todos os *logs* e que representam os limites dos blocos lavrados além da poligonal planejada (limites dos blocos de um plano de curto prazo), uma vez que a adição dos erros às coordenadas corrigidas foi realizada em um raio de 5 m. Da mesma forma, a partir das coordenadas dos erros do processamento, foi criada uma outra poligonal, que representa a área de influência em torno dos limites dos blocos lavrados além da poligonal planejada.

3.9 ANÁLISE DAS DIFERENÇAS

Nesta etapa ainda será necessário a criação de um sólido para cada uma das poligonais, cujo volume é representado pela projeção da poligonal em uma cota determinada (da base ao topo do bloco). Desta forma é possível realizar uma análise das diferenças, com o objetivo de identificar as divergências de aderência entre os planos e quantificar possíveis perdas de minério e a diluição dos teores. Esta análise também foi realizada utilizando o *software* Studio OP, da Datamine®. A partir do sólido que representa a poligonal planejada alocada sobre um modelo de blocos teórico, tem-se a massa total e o teor médio dos blocos planejados, além da tipologia das rochas, classificadas como minério ou estéril.

Os outros sólidos desenhados que representam as poligonais, tanto as que se referem aos erros do GPS, quanto a que se refere aos erros do processamento, extrapolam os limites da poligonal planejada e incorporam blocos não planejados a essas poligonais. Esses blocos, que estão em contato com os blocos dos limites da poligonal planejada, são os que possivelmente provocarão a diluição.

A partir do sólido da poligonal dos erros do processamento, considerou-se os blocos inseridos dentro do sólido e calculou-se a massa total e o teor médio. Dessa forma, pode-se dimensionar a diluição total do planejado. Todo esse processo foi repetido, agora considerando os sólidos das poligonais dos erros do GPS.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROCESSAMENTO E FILTRAGEM DOS DADOS

Os dados coletados no rastro de posicionamento foram baixados e, em seguida, processados. Como dito anteriormente, foram realizados 12 processamentos com diferentes combinações. Após a análise de cada um dos processamentos e de uma filtragem dos *logs*, obteve-se a média dos erros das coordenadas, conforme é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Erros médios das coordenadas das combinações de processamento.

Combinação	Antes da filtragem			Após a filtragem		
	Média dos erros (m)			Média dos erros (m)		
	Latitude	Longitude	<i>Logs</i>	Latitude	Longitude	<i>Logs</i>
C01	1,371370	1,739360	82	0,651900	1,088951	79
C02	1,358420	1,722366	83	0,647459	1,079450	80
C03	4,883797	6,538419	112	0,593144	0,930430	82
C04	4,460717	6,222405	112	0,552139	0,963023	82
C05	1,433722	1,561326	82	0,702677	0,903537	79
C06	1,487987	1,583563	82	0,753559	0,947391	79
C07	4,606362	6,144659	112	0,543705	0,812947	82
C08	4,833091	6,357654	112	0,568792	0,812947	82
C09	0,854446	0,979851	83	0,347490	0,516144	80
C10	0,860467	0,985643	82	0,347323	0,516286	79
C11	3,342221	4,375128	112	0,285670	0,414783	82
C12	3,368795	4,792981	112	0,297093	0,414783	82

A partir destes resultados, fez-se a escolha da combinação que apresentou a menor média dos erros entre as coordenadas. Neste caso, a menor média de erro é observada na coordenada de latitude da combinação C11, no valor de 0,285670 m e justamente essa combinação foi a escolhida para dar seguimento à metodologia.

4.2 MUDANÇA DE ESCALA

Para poder alocar as coordenadas sobre um modelo de blocos teórico com dimensões de 10 x 10 x 10 m (nos eixos x, y e z), se fez necessário uma mudança de escala. Assim, os arquivos utilizados na metodologia que foram modificados são: (1) coordenadas corrigidas - C11; (2) coordenadas dos vértices da poligonal planejada.

A Figura 27 mostra um comparativo entre as coordenadas originais e as coordenadas em uma escala maior de C11 distribuídas em um plano. Já a Figura 28 comparara as coordenadas originais e as coordenadas em uma escala maior dos vértices da poligonal pré-determinada, distribuídas em um plano.

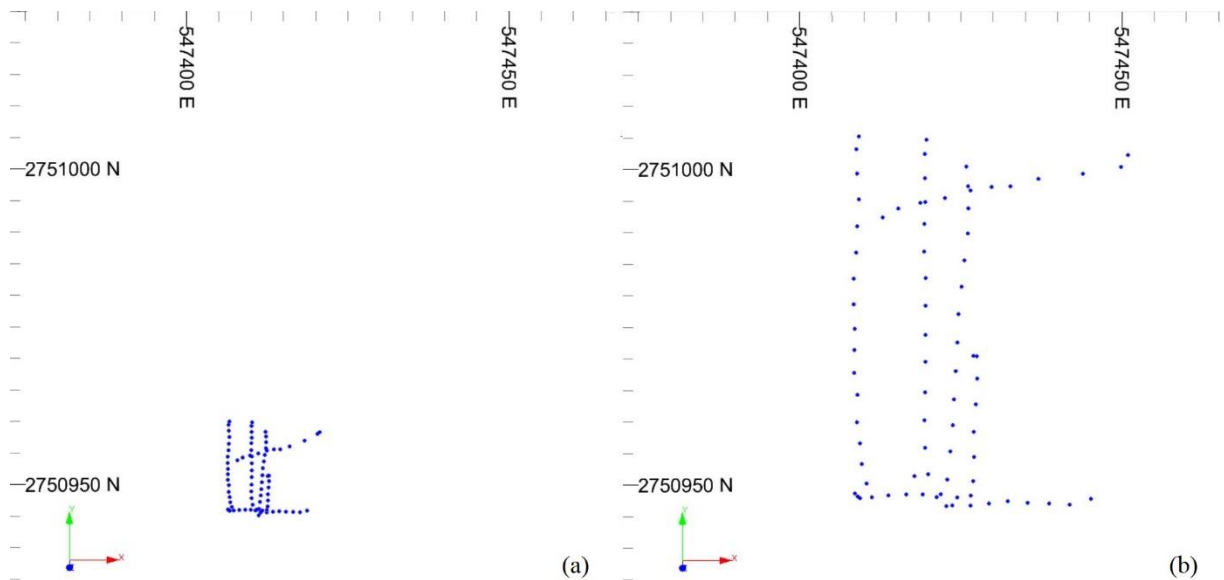


Figura 27: Distribuição dos logs de C11 no plano. (a) C11 original e (b) C11 em escala maior.

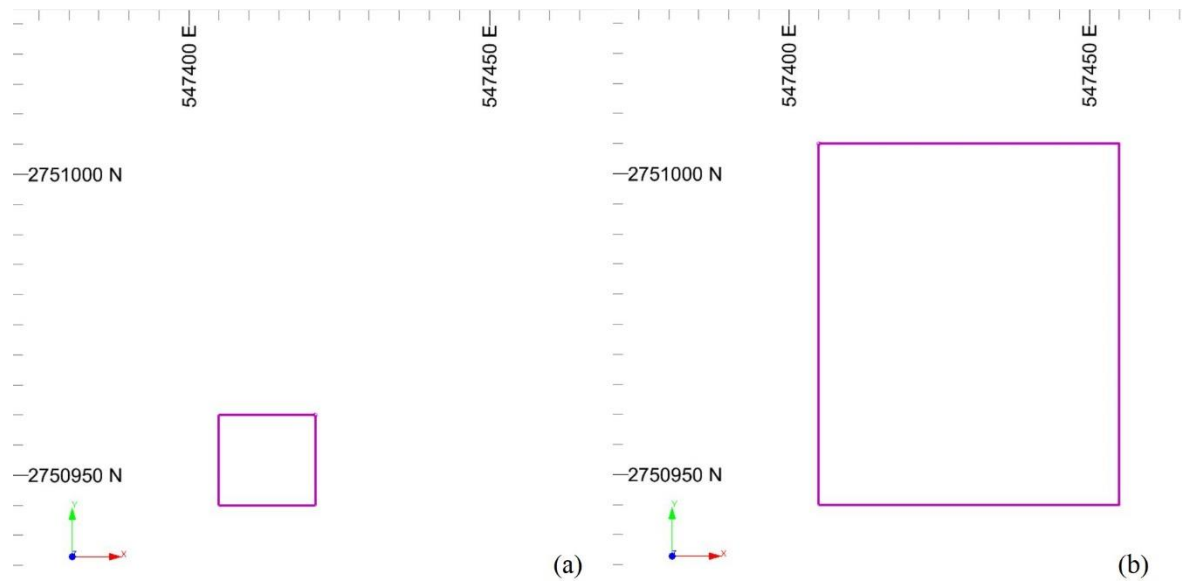


Figura 28: Distribuição dos vértices da poligonal no plano. (a) vértices originais e (b) vértices em escala maior.

A poligonal original possui dimensões de 16 m no eixo x e de 15 m no eixo y. Com a mudança de escala, a poligonal passou a ter dimensões de 50 m no eixo x e de 60 m no eixo y.

4.3 CRIAÇÃO DAS POLIGONAIS DOS ERROS

Cada uma das coordenadas do rastros apresenta erro posicional do processamento em módulo. Para representar esse erro, foram adicionados a cada coordenada o desvio padrão das componentes longitude (tanto para leste quanto para oeste) e latitude (tanto para norte quanto para sul), resultando assim, em quatro novos rastros com os erros associados. Esses novos rastros formaram uma nuvem de pontos no entorno das coordenadas corrigidas e, a partir deles, foram criadas quatro novas poligonais. Ao juntar as quatro poligonais, foi gerada uma única poligonal que representasse os erros do processamento, denominada poligonal da área de influência dos erros do processamento.

A Figura 29 apresenta a nuvem de pontos dos erros posicionais no plano, juntamente com a poligonal da área de influência dos erros do processamento.

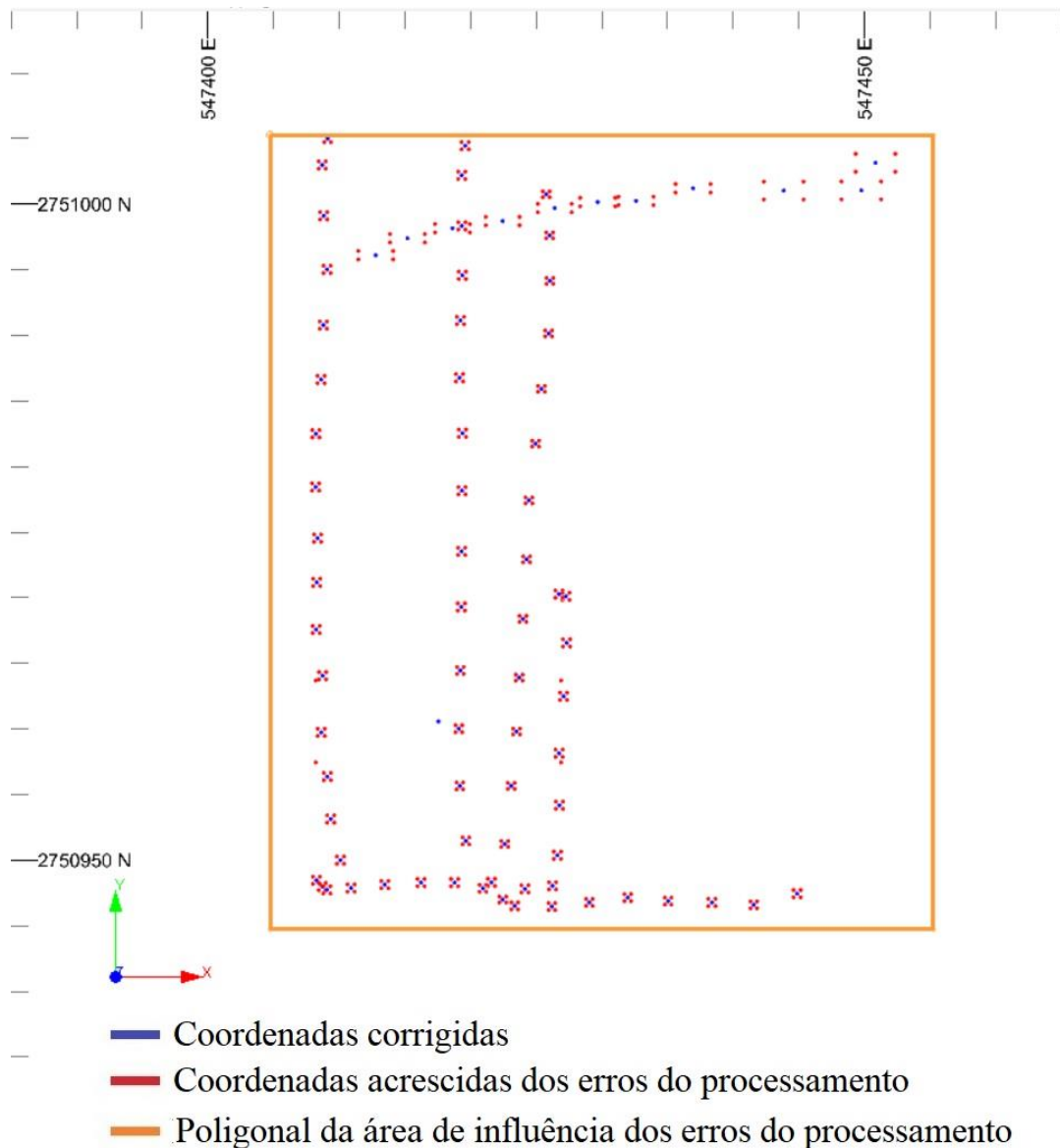


Figura 29: Nuvem de pontos dos erros do processamento e poligonal da área de influência dos erros.

Para representar os erros do GPS, foram acrescidos às coordenadas corrigidas, valores aleatórios numa variação de -5 m a 5 m (dentro de um raio máximo de 5 m). Em virtude de o processo utilizado ser aleatório, criou-se oito arquivos distintos para fins de comparação. As Figuras 30, 31, 32 e 33 apresentam as coordenadas com os erros e as poligonais (dispostos no plano) dos oito arquivos criados.

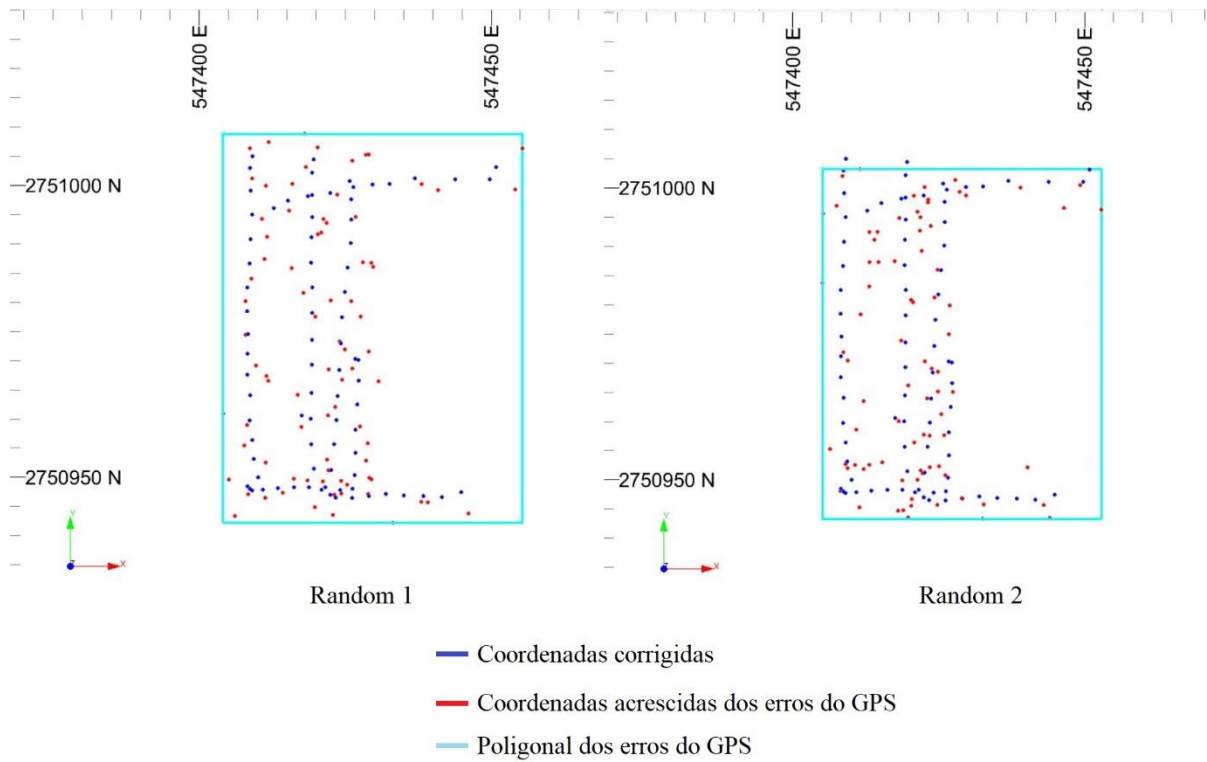


Figura 30: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados Random 1 e Random 2.

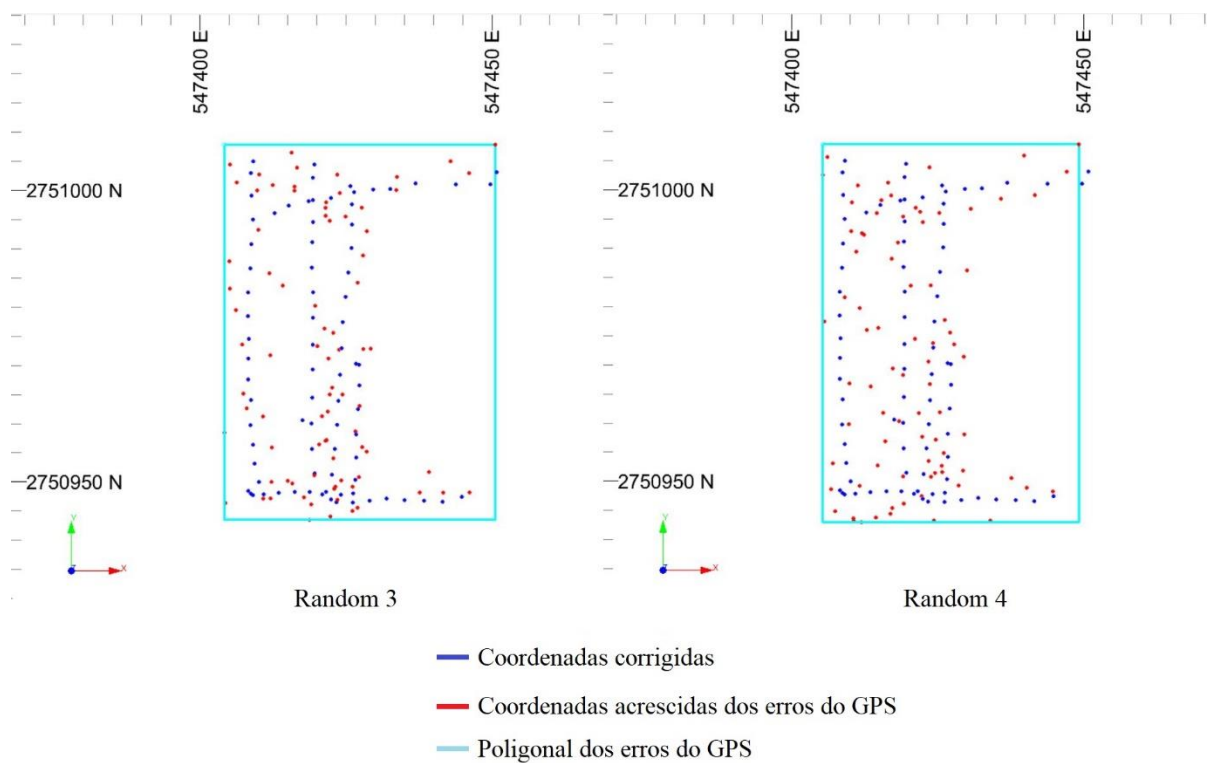


Figura 31: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados Random 3 e Random 4.

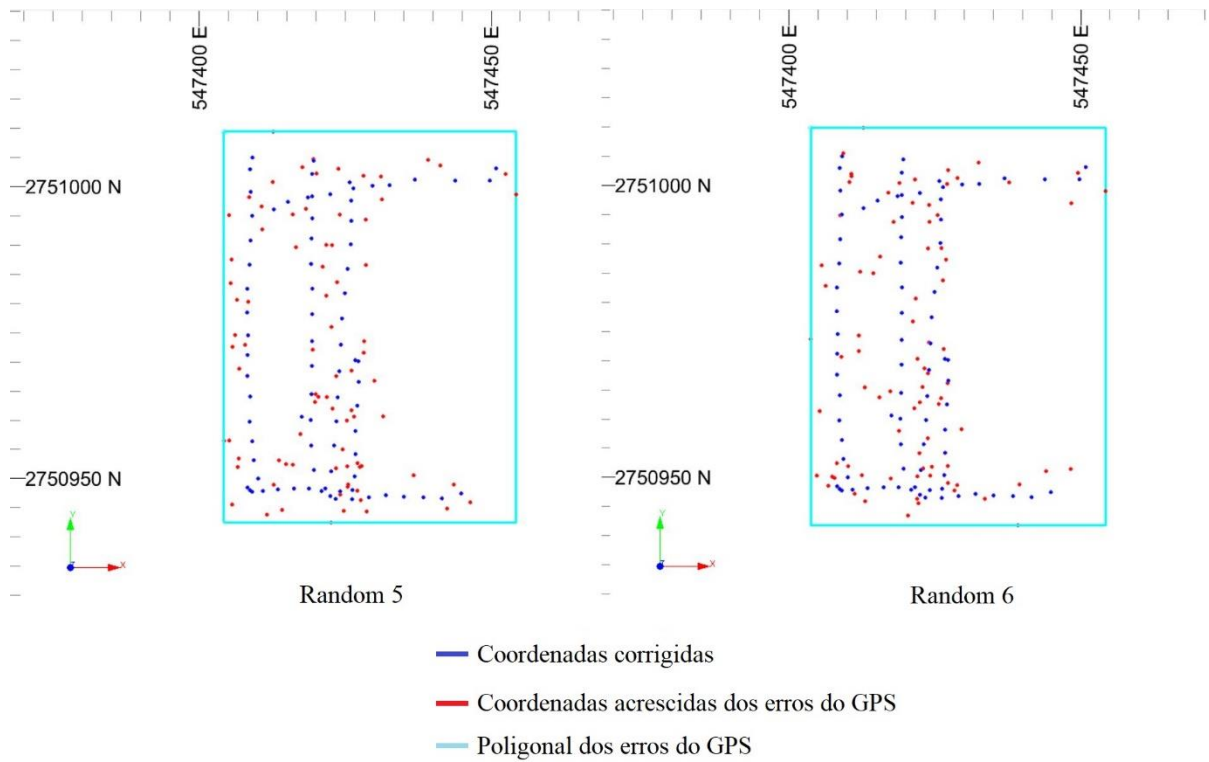


Figura 32: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados *Random 5* e *Random 6*.

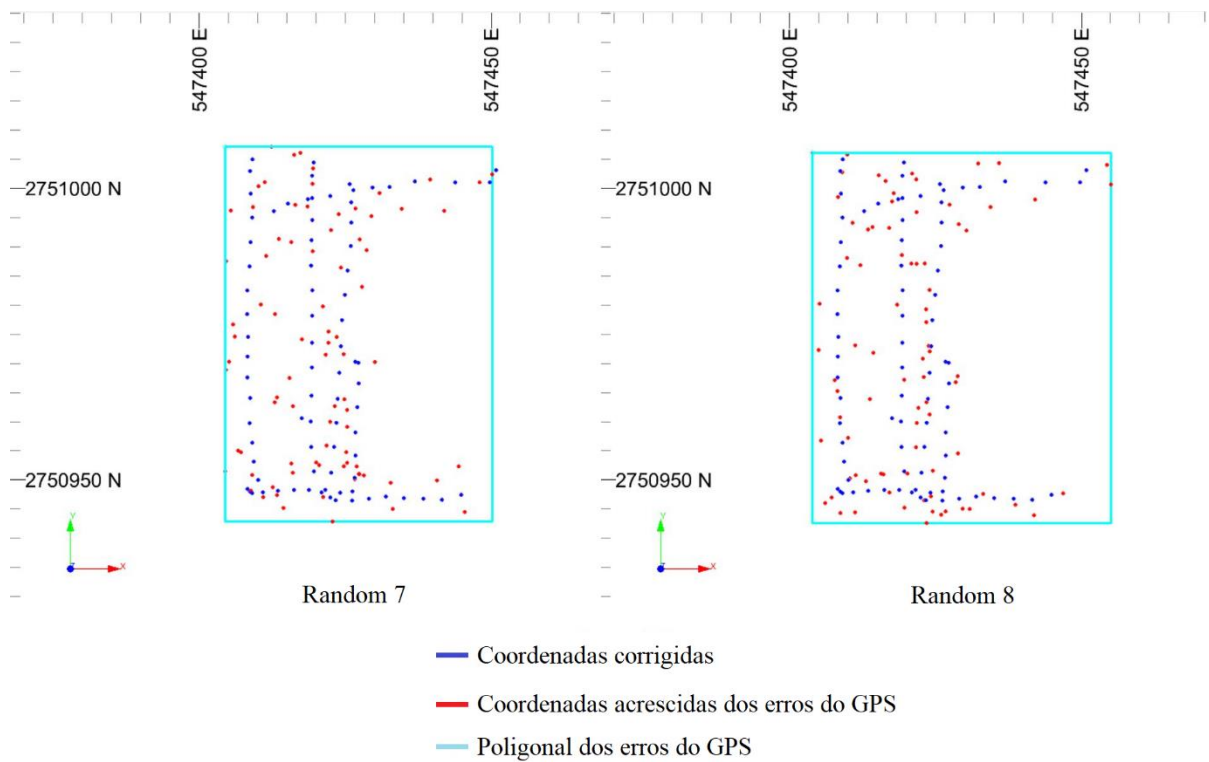


Figura 33: Comparativo entre as coordenadas corrigidas e as coordenadas dos erros do GPS geradas a partir dos processos aleatórios denominados *Random 7* e *Random 8*.

A partir das poligonais dos erros, é possível analisar as diferenças em relação à poligonal planejada. Através deste comparativo, serão identificados os possíveis problemas de aderência entre os planos, cuja finalidade é quantificar prováveis perdas de minério e diluição dos teores.

4.4 ANÁLISE DAS DIFERENÇAS

No planejamento de curto prazo, uma poligonal de lavra geralmente é definida para delinear os locais onde a operação de escavação será realizada, respeitando os requisitos exigidos pela planta de beneficiamento, como por exemplo o teor médio de minério e a massa total dos quais a planta tem capacidade de processar. Normalmente a poligonal segue um plano de referência que é associado à base dos blocos do modelo e é então projetada a uma distância que equivale à altura da bancada de operação (ou à altura dos blocos). A união dessas duas poligonais (de base e topo) representa um sólido cujo volume configura os blocos a serem lavrados e torna possível determinar a massa e o teor médio que se espera que sejam cumpridos.

Sendo assim, primeiramente foram selecionados os blocos inseridos dentro da poligonal planejada. Em seguida, foram identificados os tipos de rocha presentes nessa poligonal. O modelo de blocos é referente a um depósito de ouro, cujo teor de corte definido pelo planejamento é de 0,390 g/t. Os tipos de rocha foram classificados como indefinido, estéril, minério de baixo teor e minério de alto teor. A Figura 34 apresenta o modelo de blocos em uma seção plana, com diferentes cores representando as diferentes tipologias, conforme a legenda.

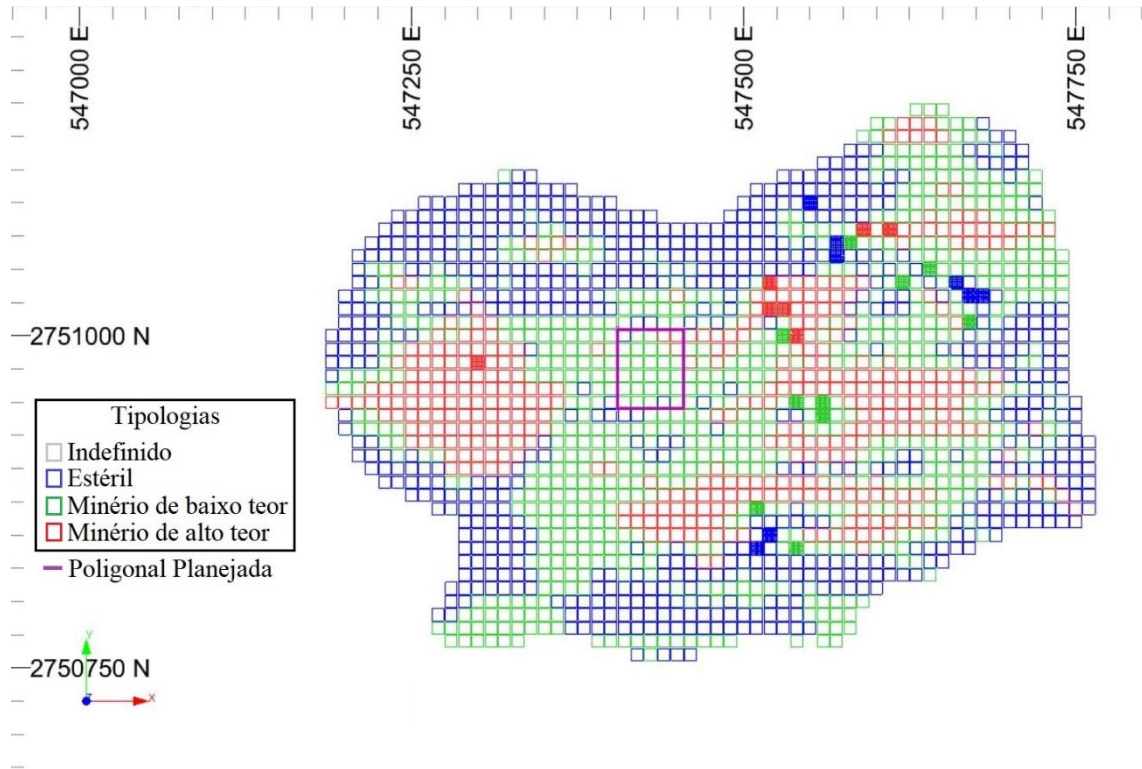


Figura 34: Seção plana do modelo de blocos com a poligonal planejada.

Após a criação do sólido através da poligonal planejada, algumas premissas foram assumidas, como a consideração de que os blocos analisados são blocos homogêneos, ou seja, assume-se que o teor do bloco é igual em toda a sua extensão. Como dito anteriormente, as dimensões dos blocos nas direções x, y e z são iguais e correspondem a 10 m. A densidade das tipologias é constante e equivale a $2,65 \text{ t/m}^3$.

A partir dessas informações, foi possível calcular a massa dos blocos da poligonal planejada e ponderar o teor médio de minério. Como a disposição dos blocos contidos na poligonal representam 5 blocos na direção x e 6 blocos na direção y, há um total de 30 blocos planejados. Esses blocos apresentam um teor médio de ouro de $0,503 \text{ g/t}$ para uma massa total de 79.500 t .

Para realizar a análise das diferenças, primeiramente foi feita uma comparação entre a poligonal planejada e a poligonal dos erros do processamento. Como a poligonal dos erros extrapola a poligonal planejada, acrescentou-se os blocos de contato dos limites da poligonal planejada que estão inseridos no interior da poligonal dos erros do processamento. A Figura 35 apresenta as duas poligonais em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

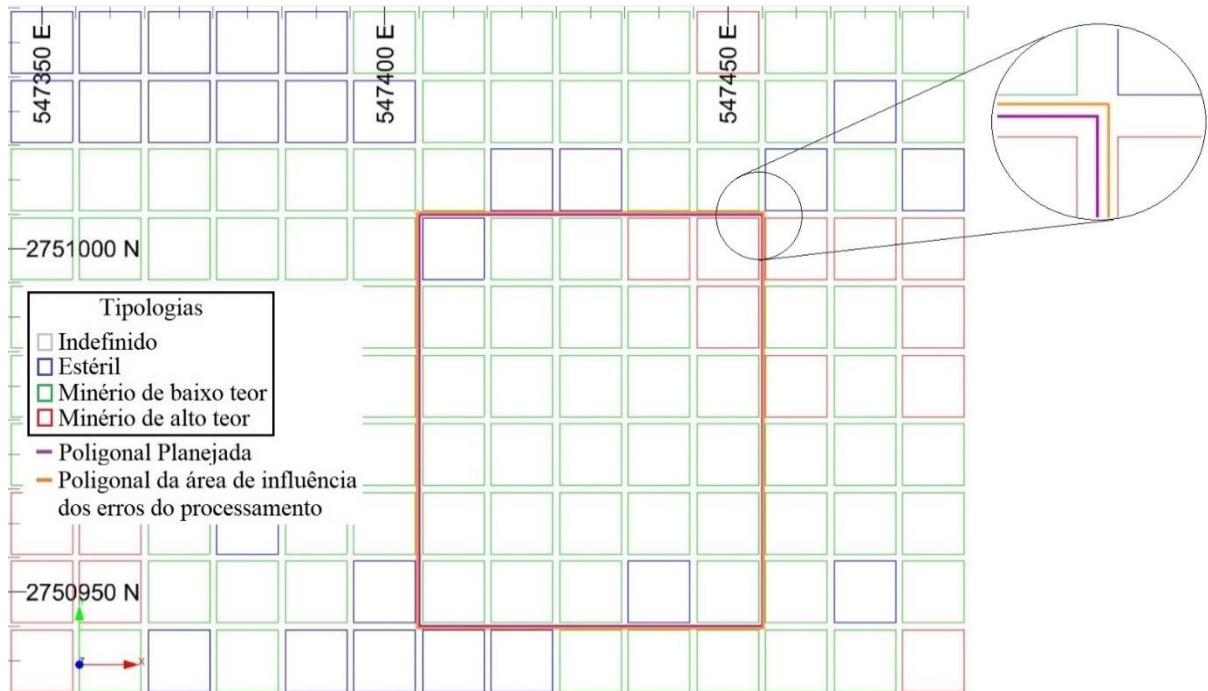


Figura 35: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal da área de influência dos erros do processamento em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

Pela análise visual das poligonais, é possível perceber que a poligonal da área de influência dos erros do processamento praticamente aderiu à poligonal planejada. Os quantitativos de massa de minério, massa de estéril e teor médio dos blocos inseridos nesta poligonal serão apresentados posteriormente.

A segunda análise das diferenças foi realizada comparando a poligonal planejada com as oito diferentes poligonais dos erros do GPS gerados através do processo aleatório. Da mesma forma, também foram acrescentados os blocos de contato dos limites da poligonal planejada. As Figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43 apresentam cada uma das poligonais dos erros plotadas sobre o modelo de blocos em uma seção plana.

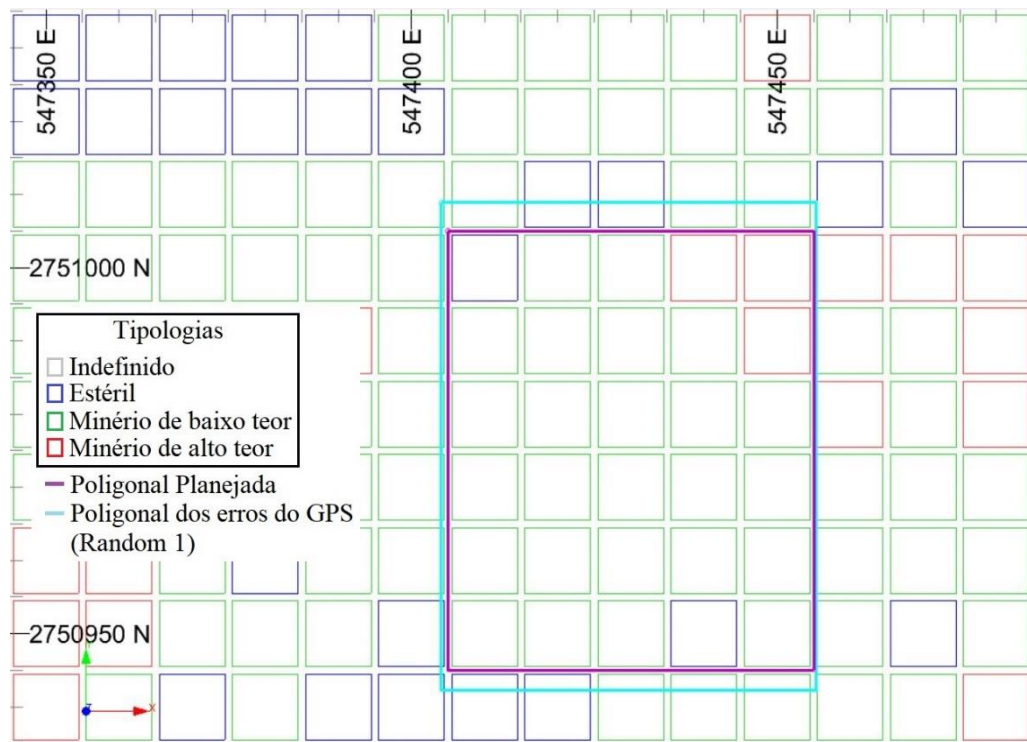


Figura 36: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 1) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

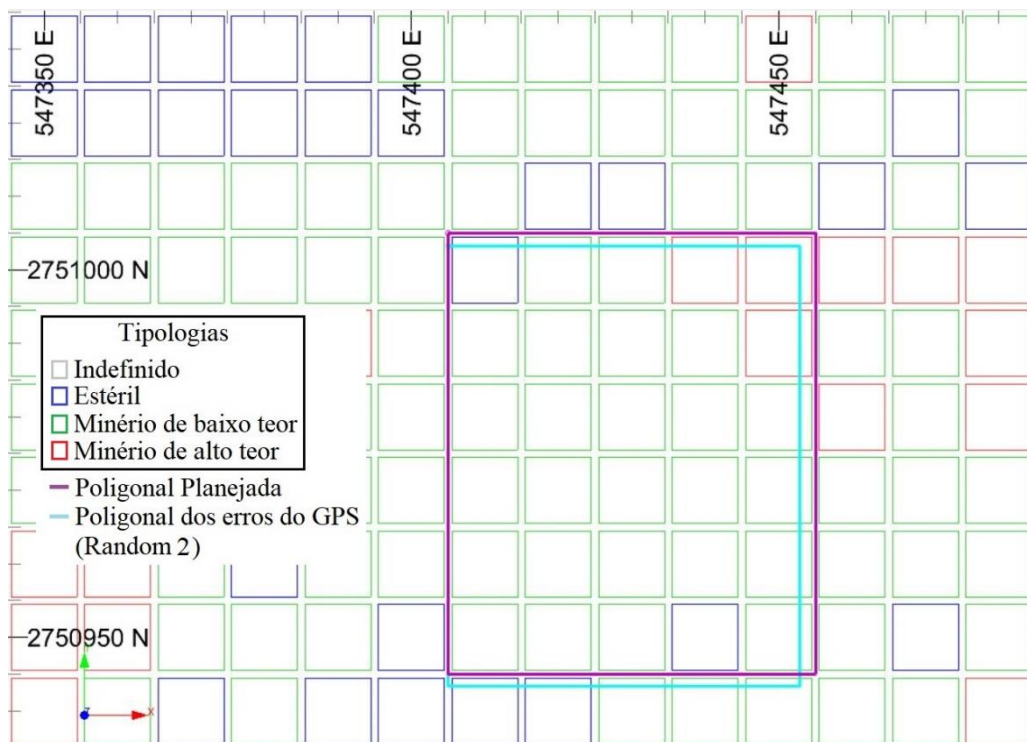


Figura 37: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 2) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

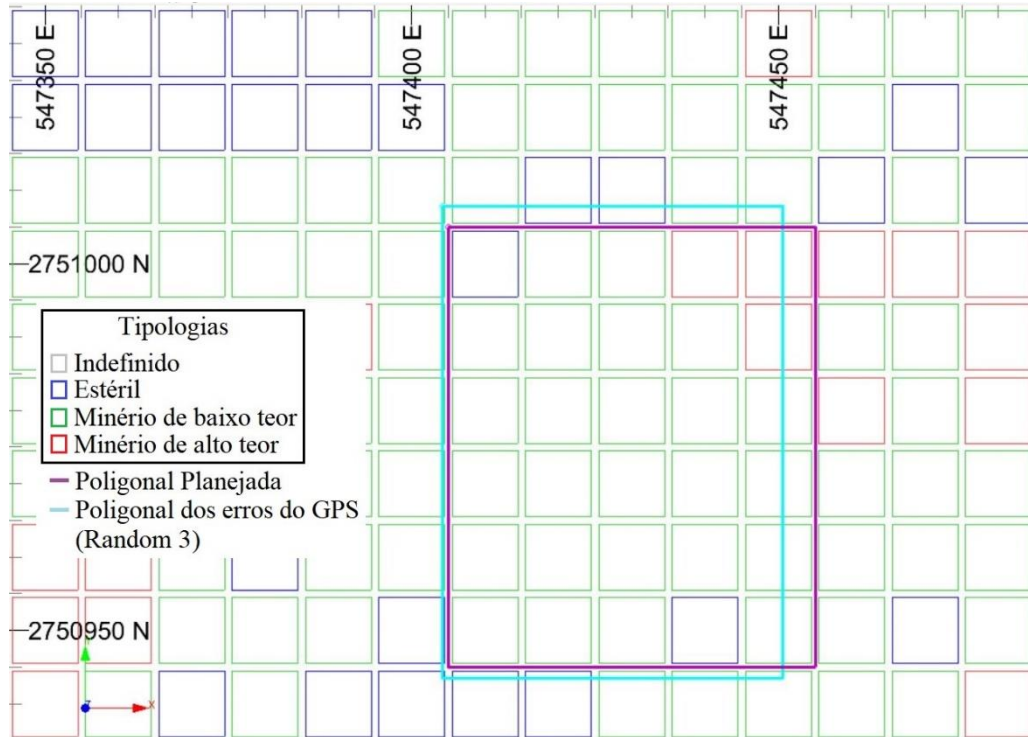


Figura 38: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 3) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

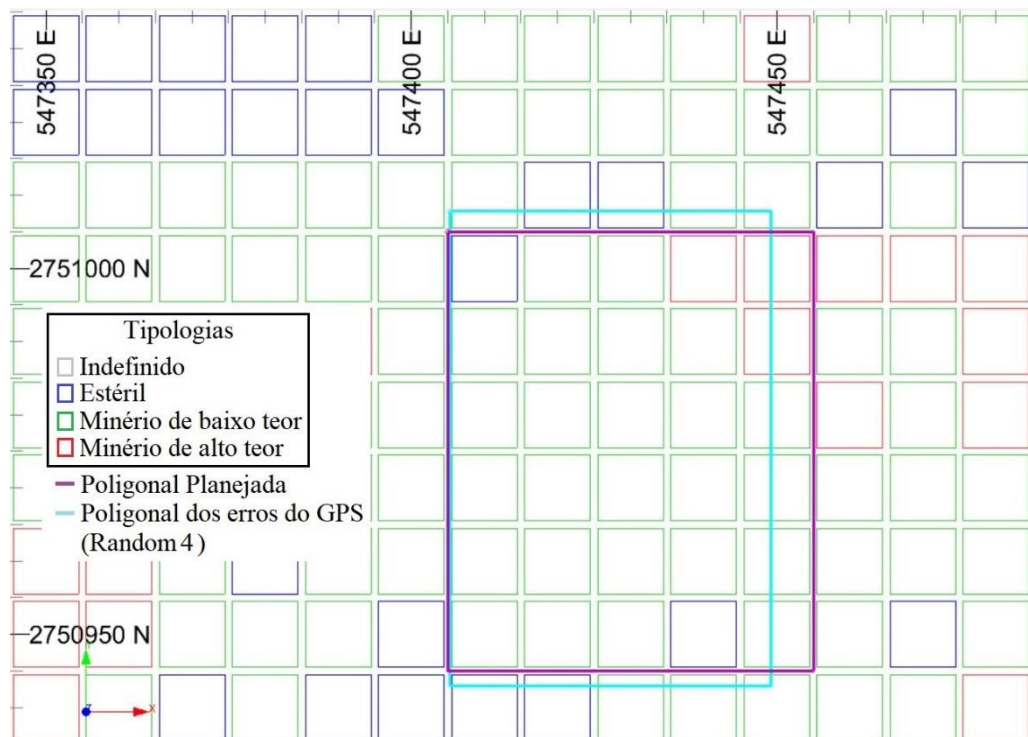


Figura 39: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 4) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

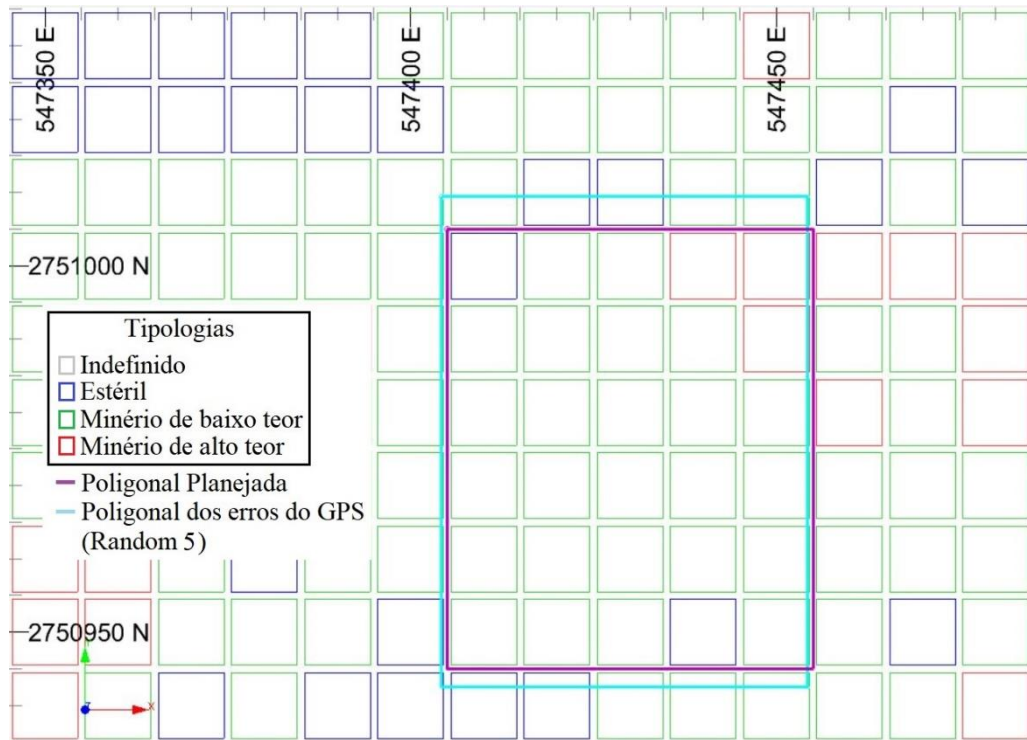


Figura 40: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 5) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

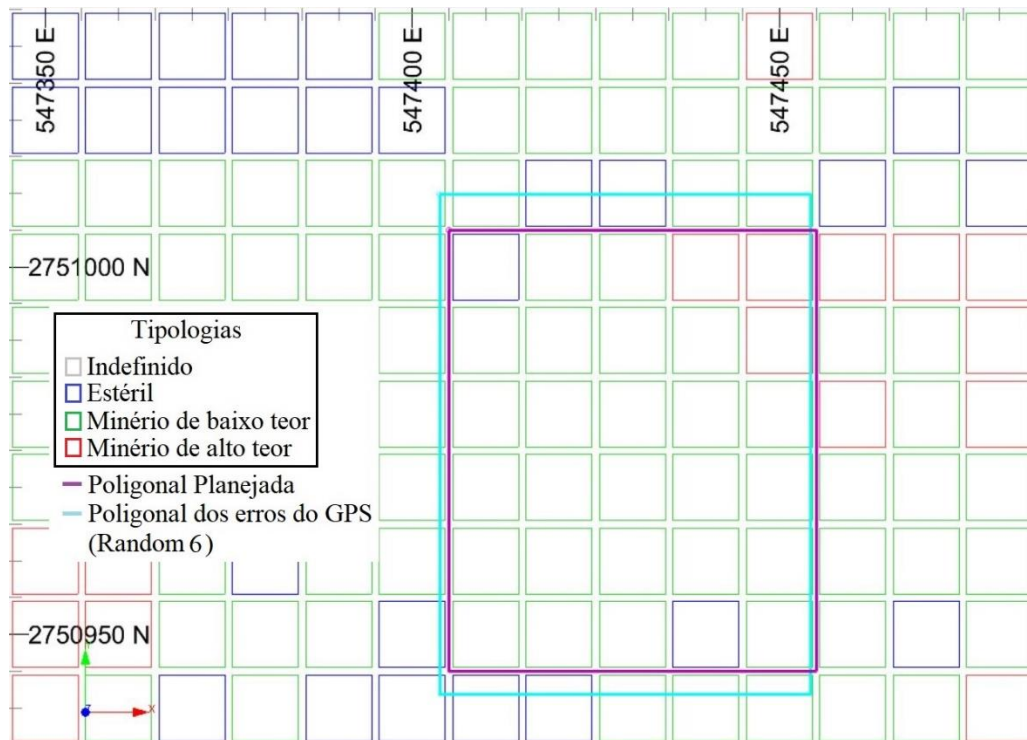


Figura 41: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 6) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

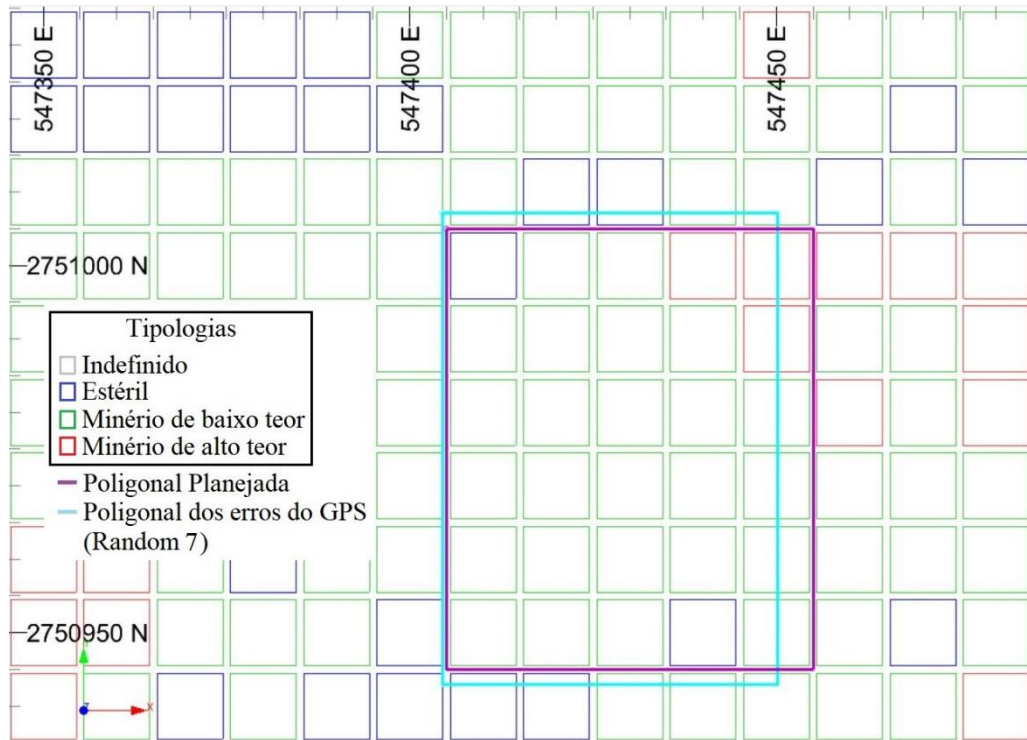


Figura 42: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 7) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

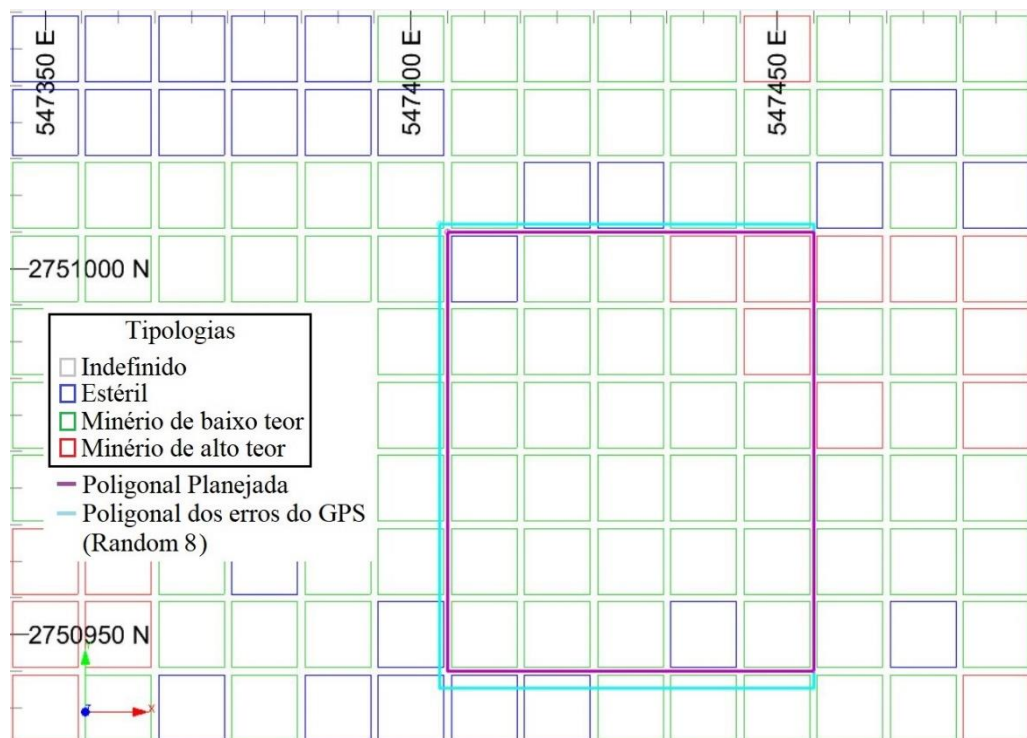


Figura 43: Comparativo da Poligonal planejada com a Poligonal dos erros do GPS (RANDOM 8) em uma seção plana sobre o modelo de blocos.

Através da análise visual das Figuras 36 a 43, é possível observar de imediato os problemas de aderência entre a poligonal planejada e as poligonais dos erros. Com o acréscimo dos blocos e/ou das porções de blocos contemplados nas poligonais dos erros ou com o não cumprimento de blocos planejados em alguns dos casos, é possível realizar uma reconciliação dos dados e, então, dimensionar o quanto de estéril foi incorporado à lavra ou o quanto de minério deixou de ser lavrado. Da mesma forma, pode-se determinar o teor médio de cada uma das poligonais e, assim, calcular a diluição.

Como dito anteriormente, o teor de um bloco foi considerado homogêneo, portanto, uma porção do mesmo bloco possui o mesmo teor que um bloco inteiro. A Tabela 8 apresenta os valores de massas de minério e de estéril das poligonais dos erros em relação à poligonal planejada e a Figura 45 mostra um gráfico destes valores para ilustrar um comparativo visual, juntamente com a relação estéril-minério (REM) dos blocos das poligonais.

Tabela 8: Massas de minério e de estéril referente às poligonais.

Poligonal	Massa de minério (t)	Massa de estéril (t)
Planejada	74.200,00	5.300,00
Erros do processamento	75.418,49	5.666,52
Erros do GPS - RANDOM 1	81.379,61	9.158,26
Erros do GPS - RANDOM 2	70.160,02	5.692,39
Erros do GPS - RANDOM 3	71.394,50	7.872,29
Erros do GPS - RANDOM 4	67.636,05	7.755,45
Erros do GPS - RANDOM 5	79.576,40	9.229,48
Erros do GPS - RANDOM 6	81.096,82	10.010,70
Erros do GPS - RANDOM 7	70.124,61	7.733,33
Erros do GPS - RANDOM 8	78.524,34	7.504,14

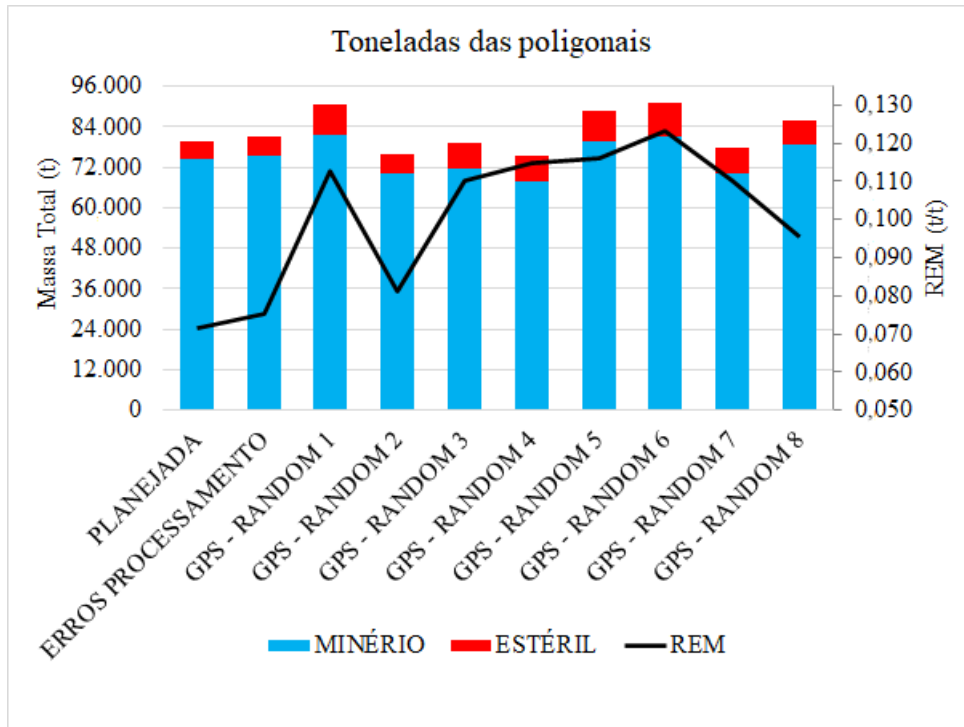


Figura 44: Toneladas das poligonais.

Os valores de diluição foram obtidos conforme definição apresentada na seção 2.2 deste trabalho, expressa pela Equação 1. Tomando-se como base a poligonal planejada, a partir dos valores de massa de estéril de cada uma das poligonais dos erros, o valor excedente em relação à poligonal planejada foi considerado no numerador da Equação 1 e a massa total (minério e estéril) de cada uma das poligonais, no denominador. Utilizando como exemplo a poligonal RANDOM 5, tem-se a massa de estéril de 9.229,48 t, com um valor excedente de 3.929,48 t de estéril. Portanto, para essa massa de estéril excedente e para uma massa total de 88.805,88 t, tem-se uma diluição de 4,42 % nos blocos da poligonal RANDOM 5. A Tabela 9 apresenta o teor médio dos blocos para todas as poligonais, assim como a diluição dos teores.

Tabela 9: Teor médio e diluição referente às poligonais

Poligonal	Teor Médio (g/t)	Diluição (%)
Planejada	0,503	-
Erros do processamento	0,501	0,45
Erros do GPS - RANDOM 1	0,483	4,26
Erros do GPS - RANDOM 2	0,495	0,52
Erros do GPS - RANDOM 3	0,486	3,25
Erros do GPS - RANDOM 4	0,483	3,26
Erros do GPS - RANDOM 5	0,482	4,42
Erros do GPS - RANDOM 6	0,479	5,17
Erros do GPS - RANDOM 7	0,485	3,13
Erros do GPS - RANDOM 8	0,492	2,56

Começando pela análise dos erros do GPS, pelos dados obtidos na Tabela 8, é possível separar as poligonais em dois grupos: (A) RANDOM 2, RANDOM 3, RANDOM 4 e RANDOM 7; (B) RANDOM 1, RANDOM 5, RANDOM 6 e RANDOM 8. Os grupos são divididos em relação a acréscimo de estéril e perda de minério e acréscimo de ambos minério e estéril.

Nas poligonais do grupo A, houve perda de minério e acréscimo de estéril. Com exceção da poligonal RANDOM 2, que teve a menor taxa de acréscimo de estéril, nos demais cenários, o acréscimo de estéril acabou aumentando significativamente a REM em relação à poligonal planejada, como pôde ser observado na Figura 44. Devido ao baixo valor de REM (0,081 t/t), a poligonal RANDOM 2, dentre os oito cenários, foi a que apresentou a menor diluição (0,52 %) das listadas na Tabela 9.

Já nas poligonais do grupo B, houve acréscimo tanto de minério, quanto de estéril, em relação à poligonal planejada. Com exceção da poligonal RANDOM 8, que teve um acréscimo de minério praticamente duas vezes maior que o acréscimo de estéril, nos demais cenários o acréscimo de estéril também acabou aumentando significativamente a REM em relação à poligonal planejada, como pôde ser observado na Figura 44. Como a poligonal RANDOM 8, dentre os oito cenários, apresentou o segundo menor valor de REM (0,096 t/t), também apresentou o segundo menor valor de diluição (2,56 %) dos listados na Tabela 9. Em todas as

poligonais deste grupo, a massa total executada foi superior em até 15 % a massa total planejada.

Por fim, fazendo a análise dos resultados obtidos da poligonal da área de influência dos erros do processamento, percebe-se através da Tabela 8 que houve um acréscimo de minério praticamente quatro vezes maior que o acréscimo de estéril, resultando na menor REM (0,075 t/t) da Figura 44 e, conseqüentemente, na menor diluição (0,45 %) apresentada na Tabela 9. O teor médio de 0,501 g/t é praticamente idêntico ao da poligonal planejada (0,503 g/t), para uma massa total executada 2 % mais elevada que a massa total planejada.

Esta análise quantitativa, juntamente com a análise visual das poligonais, permite que sejam realizadas algumas ações de maior controle sobre a lavra, para que agora a execução da operação obtenha resultados mais próximos do que foi planejado, uma vez que a metodologia proposta mostrou que é possível diminuir a diluição. Como o método necessita que as coordenadas sejam processadas, sempre haverá uma defasagem de tempo entre a análise e as ações, provavelmente de um turno de operação.

Visto que os problemas de aderência foram apresentados basicamente nas fronteiras da poligonal planejada, a partir dos resultados da metodologia, foi possível identificar potenciais padrões de erro do GPS. Logo, as ações de correção de posicionamento podem ser realizadas de forma que se consiga obter uma espécie de calibração do GPS de navegação, para que os novos posicionamentos da escavadeira não extrapolem os limites da poligonal planejada ou até mesmo, para que se determine um limite aceitável dentro de um intervalo de diluição.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O capítulo final desta dissertação apresenta as conclusões sobre a metodologia proposta e os resultados obtidos. Também são realizadas algumas considerações finais, bem como sugestões de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação propôs como meta realizar um diagnóstico e análise dos problemas de aderência entre os planos de lavra e a produção, através da reconciliação, com o intuito de minimizar as perdas de minério e a diluição dos teores. Para tanto, utilizou-se um receptor GNSS de baixo custo, com tecnologia de pós-processamento, para avaliação de sua precisão posicional. A metodologia foi aplicada em um estudo de caso teórico para que pudessem ser avaliados os resultados, cumprindo todos os seguintes objetivos específicos previamente definidos no primeiro capítulo:

- O receptor GNSS foi especificado considerando múltiplas opções no mercado. Como critério principal de escolha, foram considerados o custo de aquisição, o tamanho do dispositivo e a conectividade para configuração e coleta de dados;
- O banco de dados do rastro de posicionamento foi analisado realizando a exportação dos dados e a transformação de coordenadas;
- O pós-processamento dos dados brutos para correção das coordenadas foi realizado utilizando os pacotes de livre distribuição da RTKLIB, permitindo que os dados ficassem disponíveis em formatos adaptados para *softwares* de geoprocessamento e de planejamento de mina;
- Ao comparar os erros do processamento e os erros do GPS de navegação, foi verificada uma baixa precisão no posicionamento dos equipamentos que utilizaram GPS e uma melhora de precisão no posicionamento dos equipamentos que utilizaram o receptor Reach M+;
- Foram simulados problemas de aderência entre a poligonal planejada e as poligonais dos erros, que causaram divergências na reconciliação com o uso de sistemas de posicionamento de navegação. Esses dispositivos são comumente utilizados com a

suposição de garantirem posicionamento preciso, mas que nem sempre entregam a precisão necessária para garantir o cumprimento de planos;

- Os ganhos potenciais obtidos com o uso da metodologia proposta foram mensurados através de uma análise quantitativa detalhada das diferenças de massas e de teores oriundas de erros posicionais de dispositivos GNSS de navegação.

A utilização do receptor GNSS - modelo Reach M+ da EMLID® - para o rastreamento de posicionamento se mostrou bastante eficaz, uma vez que após o processamento dos dados brutos, apresentou média de erro inferior a 1 m. Se compararmos essas coordenadas corrigidas com as coordenadas dos registros do GPS de navegação, há uma evidência de melhora na precisão posicional.

A criação dos oito cenários para demonstrar o rastro posicional do GPS de navegação, serviu para expor que utilizar este tipo de dispositivo móvel embarcado em escavadeiras pode gerar divergências na reconciliação, observadas pela aderência visual e quantitativa entre a poligonal planejada e a poligonal executada (representada pelas poligonais dos erros). Através da análise das diferenças, pode-se observar que ao utilizar um dispositivo terminal com GPS de navegação embarcado em escavadeiras, podem ser encontradas diluições da ordem de 0,84 % a 4,32 %, enquanto que utilizar o receptor GNSS Reach M+, de maior precisão, mostrou que a diluição pode ser minimizada, chegando a 0,32 %.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar mais testes e considerar a possibilidade de aprimorar a metodologia, utilizando o método de posicionamento com a tecnologia RTK, para conseguir a correção do rastro de posicionamento em tempo real e realizar as análises e ações de correção em um intervalo de tempo menor;
- Aplicar a metodologia em um cenário real, instalando o receptor em uma escavadeira de uma operação de lavra a céu aberto;
- Após a aplicação em um cenário real, considerar os parâmetros que possam afetar no rastro de posicionamento, como por exemplo o braço da escavadeira, uma vez que o receptor será instalado em uma posição central da escavadeira e o registro posicional será deste ponto. Nas regiões de fronteira da poligonal planejada, a

concha da escavadeira estará em uma posição à uma distância equivalente ao comprimento do braço da escavadeira em relação ao receptor;

- Desenvolver uma rotina de processamento e de filtragem dos dados que seja menos laboriosa, pois em um cenário real de mina, o rastro posicional de um turno deverá conter milhares de dados. Assim, a defasagem de tempo entre a análise das diferenças e as ações de correção tende a diminuir;
- Adaptar a metodologia em diferentes etapas do processo produtivo que utilizam, outros equipamentos de mineração, como por exemplo perfuratriz, caminhão, motoniveladora, etc.;
- Considerar a possibilidade de buscar parcerias com empresas que desenvolvem *softwares* de despacho e gerenciamento de equipamentos de mineração, para integração da metodologia com módulo de precisão em sistema de controle de equipamentos móveis.

REFERÊNCIAS

- ALARIE, S. e GAMACHE, M. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, London, v. 16, n.1, p. 59–76, 2002.
- ALVES, Daniele Barroca Marra. **Posicionamento GPS utilizando o conceito de estação virtual**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/100264>>. Acesso em 11 fev. 2020.
- ASHKENAZI, V. **Geodesy and satellite navigation**. Inside GNSS, v. 1, n. 3, p. 44–49, apr. 2006.
- BARBOSA, E.; MONICO, J.; ALVES, D.; CASTRO, L. **Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 16, n. 4, p. 589-605, out.-dez. 2010.
- CÂMARA, T. R.; **Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em lavra a céu aberto**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- CÂMARA, T. R.; **Diluição operacional em lavra a céu aberto: quantificação, controle e minimização utilizando ferramentas computacionais e incertezas geológicas**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- CÂMARA, T. R.; PERONI, R. P. Quantifying dilution caused by execution efficiency. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 69, n. 4, p. 487-490, dec., 2016.
- CEPURITIS, P.M.; VILLAESCUSA, E. Back analysis techniques for assessing open stope performance. *In: Australian Mining Technology Conference, 2006, Hunter Valley. Proceedings [...]* Carlton: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2006.
- CHINA SATELLITE NAVIGATION OFFICE. **BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard**. 1 ed. China: CSNO, 2013.
- CHIRONIS, N. P. **Computer monitors and controls all truck-shovel operations**, Coal Age, v. 90, n. 3, p. 50-55, mar. 1985
- CLARK, L. M. **Minimizing dilution in open stope mining with a focus on stope design and narrow vein longhole blasting**. 1998. Dissertation (MAsc in Mining Engineering) - Department of Mining and Mineral Processing Engineering, University of British Columbia, Vancouver, 1998.

COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F.; PINTO, L. R. Um modelo de alocação dinâmica de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade. *In: III Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas*, 3., 2004, Belo Horizonte. **Anais** [...] Brasília: IBRAM, 2004.

COSTA, S. M. A.; LIMA, M.A.; JUNIOR, N. J.M.; ABREU, M. A.; SILVA, A. L.; FORTES, L. P. S. RBMC em tempo real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. *In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, 2., 2008, Recife. **Anais** [...] Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

COSTA, F. V.; **Análise dos principais indicadores de desempenho usados no planejamento de lavra**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

DAI, L.; WANG, J.; RIZOS, C.; HAN, S. Predicting atmospheric biases for real-time ambiguity resolution in GPS/GLONASS reference station networks. **Journal of Geodesy**, Berlin v. 76, n. 11/12, p. 617-628, 2003.

EBRAHIMI, A. An attempt to standardize the estimation of dilution factor for open pit mining projects. *In: 23rd World Mining Congress (WMC)*, 23., 2013, Montreal. **Proceedings** [...] Montreal: X-CD Technologies Inc., 2013.

EL-RABBANY, A. **Introduction to GPS: The Global Positioning System**. 1 ed. Norwood: Artech House, 2002.

EMLID. Reach M+ docs – Especificações – Especificações mecânicas – Dimensões. Disponível em: <<https://doc.emlid.com.br/reachm-plus/specs/>>. Acesso em 09 ago. 2021.

EMLID. Especificações - Reach M+. Disponível em: <<https://emlid.com/br/reach/>>. Acesso em 15 mai. 2020.

EMLID Brasil. Acessórios – Antena multi-GNSS Tallysman. Disponível em: <<https://loja.emlid.com.br/product/tallysman-multi-gnss-antenna/>>. Acesso em 09 ago. 2021.

ERCELEBI, S. G.; BASCETIN, A. Optimization of shovel-truck system for surface mining. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 109, n. 7, p. 433–439, jul. 2009.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary Surveying: An introduction to geomatics**. 13 ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2012.

GLACKEN, I.; MORLEY, C. **Leading practice in resource and reserve reconciliation**. 2003. Unpublished paper prepared for Placer Dome Inc.

GUIER, W. H.; WEIFFENBACH, G. C. **Genesis of satellite navigation**. Johns Hopkins APL Technical Digest, v. 18, n. 2, p. 178–181, apr.-jun. 1997.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: theory and practice**. 5 ed. New York: Springer, 2001.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more**. 1 ed. New York: Springer, 2008.

KAPLAN, E. D.; HERGARTY, C. J. **Understanding GPS: principles and applications**. 2 ed. Norwood: Artech House, 2006.

KOLONJA, B.; KALASKY, D. R.; MUTMANSKY, J. M. Optimization of dispatching criteria for open-pit truck haulage system design using multiple comparisons with the best and common random numbers. *In: 1993 Winter Simulation Conference (WSC'93)*, 5., 1993, Los Angeles. **Proceedings** [...] New York: IEEE, 1993.

LOCH, C.; CORDINI, J. **Topografia Contemporânea – Planimetria**. 1 ed. Florianópolis: EDUFSC, 1995.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Unesp, 2008.

MORLEY, C. Beyond reconciliation — A proactive approach to using mining data. *In: 5th Large Open Pit Mining Conference*, 5., 2003, Kalgoorlie. **Proceedings** [...] Carlton: AusIMM, 2003.

MUNIRATHINAM, M., YINGLING, J. C. A review of computer-based truck dispatching strategies of surface mining operations. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, London, v. 8, n. 1, p. 1-15, 1994.

PAKALNIS, R. T. **Empirical stope design at the Ruttan Mine, Sherritt Gordon Mines Ltd.** 1986. Thesis (PhD in Mining Engineering) - Department of Mining and Mineral Processing Engineering, University of British Columbia, Vancouver, 1986.

PINTO, L. R.; MERSCHMANN, L. H. Planejamento operacional da lavra de mina usando modelos matemáticos. **REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 54, n. 3, p. 211-214, jul., 2001.

POTVIN, Y. **Empirical open stope design in Canada**. 1988. Thesis (PhD in Mining Engineering) - Department of Mining and Mineral Processing Engineering, University of British Columbia, Vancouver, 1988.

RISKE, R.; DE MARK, P.; HELM, S. Reconciliation mine – for better or worse! *In: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) Conference*, 2010, Vancouver. **Proceedings** [...] Montreal: CIM, 2010.

ROBAINA, A.D.; CATEN, A.T. **Caderno didático: Fundamentos do Sistema de Posicionamento Global - GPS**. Santa Maria: Colégio Politécnico da UFSM, 2006.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RODRIGUES, L. F.; PINTO, L. R. Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 3, p. 377-384, set., 2012.

ROSSBACH, U. **Positioning and navigation using the Russian Satellite System GLONASS**. 2000. Thesis (Doctorate in Civil Engineering and Surveying) - Department for Geodesy, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2000.

RUSSIAN SPACE SYSTEMS. **GLONASS ICD - General Description of Code Division Multiple Access Signal System**. 1 ed. Moscow: PKC, 2016.

SANTOS, R. de S.; BRAGA, J. O. F.; GUEDES, C. R. R.; LANÇAS, K. P. Utilização de Receptor de Sinal de GPS de Navegação Como Ferramenta de Apoio à Atividade Agropecuária. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 31, n. 1, p. 97–101, abr-2016.

SCOBLE, M. J., MOSS, A. Dilution in underground bulk mining: implications for production management. *In*: WHATELEY, M. K. G; HARVEY, P. K. **Mineral Resource Evaluation II: Methods and Case Histories**. 79 ed. Londres: Geological Society, 1994. p. 95-108.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SEGANTINE, P. **GPS: Sistema de Posicionamento Global**. São Carlos, SP: Editora EESC/USP, 2005.

SHAW, W. J.; WEEKS, A.; KHOSROSHAHI, S.; GODOY, M. Reconciliation – delivering on promises. *In*: 36th APCOM Symposium Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, 36., 2013, Porto Alegre. **Proceedings [...]** Porto Alegre: Fundação Luiz Englert, 2013.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Applied mineral inventory estimation**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.

STEWART, P. C. **Minimising dilution in narrow-vein mines**. 2005. Thesis (PhD in Mining Engineering) - Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, Brisbane, 2005.

TATMAN, C. R. Mining Dilution in Moderate – to narrow – width deposits. *In*: HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. L. **Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies**. 1 ed. Colorado: SME, 2001. cap. 70, p. 615-626.

THOMPSON, R. J.; PERONI, R.; VISSER, A. T. **Mining Haul Roads: Theory and Practice**. 1 ed. London: CRC Press, 2018.

TU, J. H.; HUCKA, V. J. Analysis of open-pit truck haulage system by use of computer model. **CIM Bulletin**, Westmount, v. 78, n. 879, p. 53-59, 1985.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Global Positioning System - Standard Positioning Service**: performance standard. 4 ed. Arlington County: DoD, 2008.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Global Positioning System - Standard Positioning Service**: performance standard. 5 ed. Arlington County: DoD, 2020.

VAN DIGGELEN, F.; ENGE, P. The World's first GPS MOOC and Worldwide Laboratory using Smartphones. *In*: 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), 28., 2015. **Proceedings** [...] Tampa: ION, 2015.

VILLAESCUSA, E. Geotechnical design for dilution control in underground mining. *In*: 7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 7., 1998. **Proceedings** [...] Rotterdam: Balkema, 1998.

VILLAESCUSA, E. **Geotechnical design for sublevel open stoping**. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

WANG, Q.; ZHANG, Y.; CHEN, C.; XU, W. Open-pit mine truck real-time principle under macroscopic control. *In*: First International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 1., Beijing, 2006. **Proceedings** [...] Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2006.

WHITE, J. W.; OLSON, J. P. Computer based dispatching in mines with concurrent operating objectives. **Mining Engineering**, Littleton, v. 38, n. 11, p. 1045-1054, nov., 1986.

WHITE, J. W.; OLSON, J. P.; VOHNOUT, S. I. On improving truck/shovel productivity in open pit mines. **CIM Bulletin**, Westmount, v. 86, n. 973, p. 43-49, 1993.

ZIEDAN, N. I. **GNSS receivers for weak signals**. 1 ed. Norwood: Artech House, 2006.