

## **AValiação da Acurácia de Receptores GNSS em Condição Cinemática**

**MARCELO CAMPONEZ DO BRASIL CARDINALI<sup>1</sup>, LUIZ GUSTAVO DE GÓES STERLE<sup>2</sup>, VINICIUS BENASSI<sup>3</sup>, LEONARDO VEDOVATO GIMENEZ<sup>4</sup>, DANIEL FERREIRA AFONSO<sup>5</sup>, JOSÉ PAULO MOLIN<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e Professor EBTB do Instituto Federal de São Paulo, Campus Piracicaba, [marcelo.cardinali@usp.br](mailto:marcelo.cardinali@usp.br)

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, [gustavosterle@usp.br](mailto:gustavosterle@usp.br).

<sup>3</sup> Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, [vinicius.benassi@usp.br](mailto:vinicius.benassi@usp.br).

<sup>4</sup> Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, [leonardogimenez@usp.br](mailto:leonardogimenez@usp.br).

<sup>5</sup> Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, [danielfafonso@usp.br](mailto:danielfafonso@usp.br)

<sup>6</sup> Professor do Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, [jpmolin@usp.br](mailto:jpmolin@usp.br)

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** A utilização de receptores GNSS na agricultura moderna é essencial para diversas atividades, como planejamento de percursos, orientação de máquinas agrícolas, monitoramento de culturas e aplicação de insumos com precisão. Com a diversidade de modelos disponíveis no mercado, é importante avaliar sua acurácia em diferentes cenários. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho cinemático de quatro receptores GNSS sob duas velocidades diferentes. Foram realizados testes em campo, coletando dados de posicionamento de três receptores L1/L2 e um código C/A. Os receptores foram dispostos em uma plataforma girante em torno de um ponto georreferenciado. O erro médio dos receptores sem correção diferencial variou entre 3,93 e 8,46 m. Com a correção via Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) de Campinas (SPC1), o menor erro encontrado foi de 0,79 m. Esse valor ainda é alto para muitas aplicações no campo. De forma inesperada, os receptores sem correção apresentaram posição média deslocada do ponto georreferenciado, o que requer mais investigações.

**PALAVRAS-CHAVE:** GNSS, RBMC, acurácia

## **EVALUATION OF THE ACCURACY OF GNSS RECEIVERS IN CINEMATIC CONDITIONS**

**ABSTRACT:** The use of GNSS receivers in modern agriculture is essential for various activities, such as route planning, guidance of agricultural machinery, crop monitoring, and precise input application. With the variety of models available in the market, it is important to evaluate their accuracy in different scenarios. The objective of this study was to evaluate the kinematic performance of four GNSS receivers under two different speeds. Field tests were conducted, collecting positioning data from three L1/L2 receivers and one C/A code. The receivers were placed on a rotating platform around a georeferenced point. The average error of the receivers without differential correction ranged from 3.93 to 8.46 meters. With correction

through the Brazilian Continuous Monitoring Network of GNSS Systems (RBMC) in Campinas (SPC1), the smallest error found was 0.79 meters. This value is still high for many field applications. Surprisingly, the receivers without correction showed a displaced average position from the georeferenced point, which requires further investigation.

**KEYWORDS:** GNSS, RBMC, accuracy.

**INTRODUÇÃO:** Com os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) a coleta de dados georreferenciados evoluiu, viabilizando operações agrícolas e tornando-as rápidas e com baixo custo. Entretanto, a disseminação da tecnologia tem resultado na disponibilidade de receptores GNSS com precisão incerta, o que ressalta a importância de analisar o desempenho de novos equipamentos no contexto agrícola. Existem diversas metodologias para avaliação do desempenho de receptores GNSS, tal como as propostas por Kabir et al. (2016), Carballido et al. (2014), Maldaner (2021). Os autores vêm empregando avaliação do desempenho de receptores GNSS instalados em um veículo agrícola, com trajetórias circulares e constantes, utilizando um receptor com sinal RTK como referência para cálculos. Com informações limitadas sobre o desempenho de receptores GNSS, avaliar a metodologia para teste cinemático dos mesmos apresenta grande pertinência, onde não apenas novas metodologias podem ser abordadas como também uma real compreensão da exatidão dos novos equipamentos lançados no mercado. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a acurácia de quatro receptores GNSS (três L1/L2 e um código C/A) em condição cinemática.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Os testes foram realizados em uma área do Laboratório de Agricultura de Precisão no Departamento de Engenharia de Biossistemas da USP/Esalq, no município de Piracicaba, SP, coordenadas 22°42'47.8" S, 47°37'44.9" W, altitude de 540 m. Foram utilizados quatro receptores GNSS sendo três receptores de sinais L1/L2 e o quarto receptor foi um tablet com comunicação por código C/A. O teste cinemático foi realizado com uma metodologia similar a realizada por Maldaner et al (2021). Os receptores de GNSS, dispostos sobre a plataforma, foram posicionados a 10,23 m da extremidade de uma estrutura treliçada livre para girar em torno do pivô central georreferenciado. Foram realizadas cinco repetições para duas velocidades tangenciais de giro, sendo elas 2,5 m/s e 5,0 m/s. Todos os receptores coletaram dados na frequência de 1,0 Hz, em que cada repetição durou 1h10, descartando os 5 minutos iniciais e os 5 minutos finais. Os arquivos de saída dos receptores 1 e 2 foram convertidos do formato RTCM para RINEX por meio do software livre RTKLIB. Os dados saem no formato .POS, com as coordenadas geográficas em WGS84. Para ambos os receptores, foi realizada também a correção via Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) do IBGE. Os demais receptores forneceram um arquivo .CSV com os dados no sistema de coordenadas geográficas no datum WGS84. Todos os arquivos serviram de entrada para um script Python para conversão de coordenadas geográficas para UTM / Zona 23S por meio da biblioteca PyProj 3.5.0 e para a realização das análises e construção de gráficos. Os erros de posicionamento foram obtidos através da diferença entre a posição medida pelo receptor em cada instante e o ponto mais próximo da circunferência executada pelo receptor. Essa distância ortogonal é definida como o erro de paralelismo. Com a coordenada georreferenciada do pivô central, calcula-se o erro de paralelismo ( $E_i$ ) para cada medida  $i$  por

$$E_i = \sqrt{(CRL - PL_i)^2 + (CRN - PN_i)^2} - R \quad (1)$$

onde  $CRN$  e  $CRL$  são as coordenadas norte-sul e leste-oeste georreferenciadas do pivô,  $PN_i$  e  $PL_i$  são as posições da  $i$ -ésima medida do receptor Norte-Sul e Leste-Oeste e  $R$  o raio da

trajetória circular, todas calculadas em metros. Posteriormente, foram obtidos os erros de paralelismo com nível de confiança de 95%, a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), o coeficiente de variação (CV) e o erro de exatidão (EE). Este último está associado ao desvio do centro da nuvem de pontos com relação ao centro georreferenciado (vide figura 1). Os mesmos erros foram calculados realizando o offset dos dados com relação à média da nuvem de pontos.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A tabela 1 mostra os resultados obtidos pelos quatro receptores para as diferentes velocidades. Os resultados da análise do teste t para comparação de médias indicaram diferenças significativas entre as duas velocidades em cada receptor, com um nível de confiança de 95%. O receptor 1 foi o que apresentou melhores resultados dentre o L1/L2, com E95 entre 3,93 e 4,66 m para as diferentes velocidades. O EE variou de 2,27 a 2,79 m no sentido sudeste (4° quadrante) – vide figura 1. Aplicando a correção via RBMC, o E95 foi reduzido para valores entre 0,79 e 0,87 m e o EE entre 0,09 e 0,12 m. É interessante destacar o comportamento do erro ao longo do tempo durante as repetições. Na primeira repetição, nota-se que o erro se eleva cerca de 20 minutos após início da medição e permanece mais elevado por um intervalo de tempo e tem uma nova tendência de crescimento um tempo depois (ver figura 2). Um comportamento parecido é observado ao longo de todas as repetições. Esse fato está associado principalmente ao arranjo das constelações dos satélites.

TABELA 1. Resultados obtidos para os receptores para as duas velocidades de rotação ( $v$ ).

Receptor	$v$ m/s	Sem offset				Com offset				
		$\bar{E}$	$E_{95}$	RMSE	CV	$\bar{E}$	$E_{95}$	RMSE	CV	EE
		-----m-----	-----m-----		%	-----m-----	-----m-----		%	m
$r_1$	2,5	1,87	3,93	2,16	57,9	0,71	1,94	0,87	126,0	2,79
	5,0	1,51	4,66	1,90	76,0	0,82	2,48	1,01	124,6	2,27
$r_2$	2,5	2,08	5,24	2,49	65,3	1,28	4,47	1,62	126,8	2,71
	5,0	1,96	6,22	2,50	79,2	1,43	4,69	1,80	123,8	2,61
$r_3$	2,5	2,27	8,46	2,96	83,9	1,73	5,09	2,22	130,2	2,88
	5,0	3,08	7,56	3,69	65,7	2,10	5,03	2,45	118,3	4,03
$r_4$	2,5	0,88	2,59	1,11	75,4	0,87	2,67	1,09	123,8	0,25
	5,0	1,69	4,65	2,07	70,5	1,68	4,66	2,06	122,5	0,19
$r_1$ (IBGE)	2,5	0,27	0,79	0,34	81,6	0,27	0,83	0,34	128,2	0,09
	5,0	0,26	0,87	0,35	87,4	0,26	0,79	0,33	127,9	0,12
$r_2$ (IBGE)	2,5	0,96	6,89	1,50	120,6	0,98	6,91	1,49	156,3	0,22
	5,0	1,09	4,68	1,46	90,0	0,96	4,50	1,30	139,7	0,97

O receptor 2 apresentou valores de E95 entre 5,24 e 6,22 m e EE médio de 2,70 m, também no sentido sudeste (4° quadrante). A correção via RBMC reduziu o EE para valores entre 0,22 e 0,97 m, entretanto, o erro de dispersão (E95) não foi reduzido. O receptor 3 foi o que apresentou o maior erro, apresentando grandes diferenças na exatidão entre cada repetição. O E95 variou entre 7,56 e 8,46 m e o EE atingiu valores superiores a 4,0 m. Surpreendentemente, os erros do receptor C/A foram menores, incluindo o menor EE. Os demais apresentaram erros de exatidão superiores a 2,5 m. Com o pós-processamento do sinal dos receptores 1 e 2 via RBMC de Campinas (SPC1), os resultados para o receptor 1 foram muito superiores, reduzindo o E95 para cerca de 0,8 m e o EE para 0,1 m (vide figura 2). O receptor 2 reduziu o RMSE e o EE, porém, os demais erros não foram reduzidos. Levando em consideração a correção pela média das posições (offset), os erros médios, E95 e RMSE tiveram seus valores reduzidos, na grande maioria dos casos, em detrimento da separação do erro de exatidão (EE) do erro de dispersão dos dados. Dada a variabilidade do sinal ao longo do tempo (Fig. 2), fica clara a importância

da repetibilidade na caracterização da acurácia dos receptores. A mudança de constelação de satélites e outros fenômenos atmosféricos acarretam em alterações no erro em alguns momentos da coleta. Mais estudos serão realizados para avaliar qual o melhor intervalo de tempo de coleta e para compreender o desvio para o sudeste nos receptores L1/L2 sem correção do sinal.

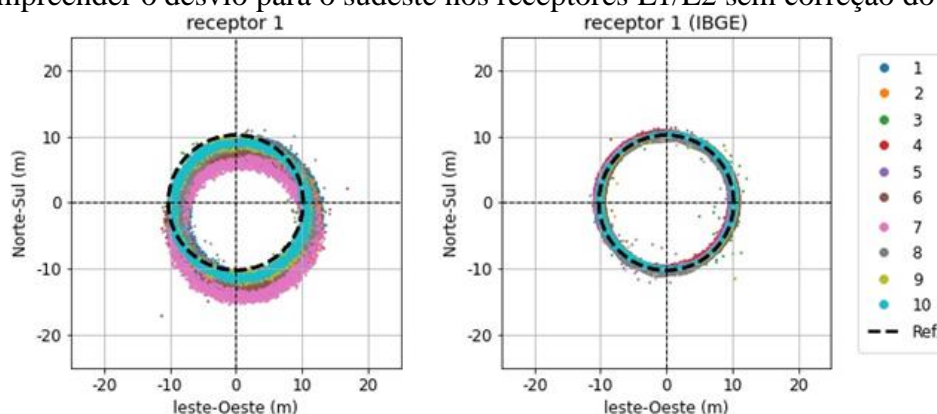


FIGURA 1. Medidas de posição obtidas para o receptor 1. O centro do gráfico indica o centro do pivô centralizado, a legenda em cores a sequência de repetições (1 a 5 para velocidade 2,5 m/s e de 6 a 10 para velocidade 5,0 m/s) e a linha pontilhada a trajetória de referência.

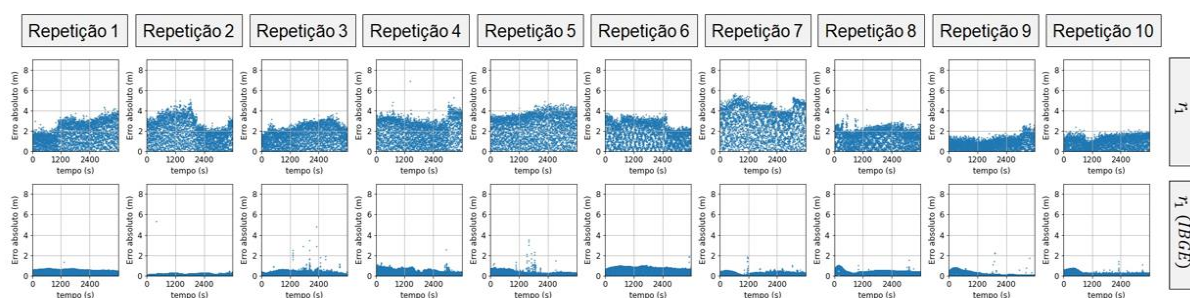


FIGURA 2. Erro absoluto (sem offset) do receptor 1 em cada repetição no ensaio cinemático.

**CONCLUSÕES:** Os experimentos conduzidos permitiram avaliar a acurácia dos receptores em condição cinemática. Conforme os resultados apresentados, o menor erro com 95% de probabilidade encontrado foi para o receptor 1, no valor de 0,79 m, quando aplicada pós processamento para correção via RBMC. Este valor é considerado elevado para grande parte das aplicações no campo. Todos os receptores sem correção de posicionamento apresentaram posição média deslocada do ponto georreferenciado, de ao menos 0,19 m. Mais investigações devem ser realizadas acerca desse fato.

## REFERÊNCIAS:

CARBALLIDO, J.; PEREZ-RUIZ, M.; EMMI, L.; AGUERA, J. Comparison of positional accuracy between RTK and RTX GNSS based on the autonomous agricultural vehicles under field conditions. **Applied Engineering in Agriculture** 30: 361- 366, 2014.

KABIR, M. S. N. et al. Performance comparison of single and multi-GNSS receivers under agricultural fields in Korea. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 9, n. 1, p. 27-35, 2016.

MALDANER, L. F., CANATA, T. F., DIAS, C. T. dos S., MOLIN, J. P. A statistical approach to static and dynamic tests for Global Navigation Satellite Systems receivers used in agricultural operations. **Scientia Agricola**, 78(5), 2021.