UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DIMAGHI SCHWAMBACK

Concepção, dimensionamento e calibração de básculas para monitoramento
contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais

São Carlos

2020

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

DIMAGHI SCHWAMBACK

Concepção, dimensionamento e calibração de básculas para monitoramento
contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e
Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Edson Cezar Wendland

Versão Corrigida

São Carlos

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S291c Schwamback, Dimaghi
 Concepção, dimensionamento e calibração de
básculas para monitoramento contínuo do escoamento
superficial em parcelas experimentais / Dimaghi
Schwamback; orientador Edson Cezar Wendland. São
Carlos, 2020.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e
Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2020.

 1. escoamento superficial. 2. monitoramento in
situ. 3. parcela experimental. 4. uso e cobertura do
solo. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **DIMAGHI SCHWAMBACK**.

Título da dissertação: "Concepção, dimensionamento e calibração de básculas para monitoramento contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais".

Data da defesa: 07/01/2020.

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Ademir Paceli Barbassa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Fernando Mainardi Fan**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendingo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus em reconhecimento de que Nele estão escondidos todos os tesouros da sabedoria e do conhecimento (Colossenses 2:3).

Ao professor Edson Wendland pela orientação e dedicação.

Aos meus pais, Darli Schwambach e Dalva Alves Schwambach, que embora cursaram não mais que a quarta série e estando a mais de 1.000 km de distância, são meu apoio e incentivo.

Aos trabalhadores da oficina mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pelas dicas de utilização de materiais e construção dos equipamentos.

Ao técnico Roberto Bérghamo pela paciência, alegria e prontidão em ensinar e ajudar quando necessário.

Ao Jamil Anache e Livia Rosalem pela idealização e orientação do projeto, dicas utilização de softwares, análises estatísticas e “gambiaras” necessárias.

Aos colegas do laboratório pela companhia diária, risadas e idas a campo.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS-USP) e da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pelo carinho dado durante os serviços prestados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos auxílios concedidos através do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio à pesquisa concedido (processo FAPESP 2015/03806-1).

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

RESUMO

SCHWAMBACK, Dimaghi. Concepção, dimensionamento e calibração de básculas para monitoramento contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

A degradação do solo e água são listados como os principais problemas ambientais no mundo. Para alcançar um uso eficiente dos recursos naturais, é necessário um completo entendimento do ciclo hidrológico mediante as alterações de cobertura do solo. Para isso, faz-se necessário obter informações em diferentes escalas espaciais e temporais, sendo imprescindível o monitoramento *in situ*. Este trabalho teve como objetivo principal conceber, dimensionar e calibrar básculas para o monitoramento contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais sob quatro condições de usos do solo comuns na região Sudeste do Brasil (Cerrado *stricto sensu*, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto). Os equipamentos foram dimensionados por meio do método racional e possuem as seguintes resoluções volumétricas: 11,63mL (cerrado), 64,16mL (cana-de-açúcar), 139,86mL (pastagem) e 660,95mL (solo exposto). Cada equipamento foi submetido a testes em laboratório (calibração dinâmica) sob dez intensidades de escoamento, distribuídas uniformemente até uma vazão correspondente a uma chuva com período de retorno superior a 100 anos. Cada vazão foi registrada ao longo de seis intervalos de tempos de amostragens (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos) em regime de cinco replicatas. Os equipamentos foram testados em laboratório sob altas intensidades de escoamento e tiveram desempenho satisfatório. Após realização dos testes dinâmicos, foram verificados ajustes a partir de quatro diferentes curvas de calibração, utilizando equações dos tipos: linear, potencial, inverso da vazão e quadrática. Dentre as alternativas, a regressão linear foi a que apresentou melhor correlação (R^2 acima de 0,99) com os dados medidos. Com o uso dessa curva para calibração, o erro residual encontrado foi estimado em -1,35%, 0,04%, 3,18% e 3,73%, para as básculas a serem instaladas na parcela de cerrado, cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto, respectivamente. Uma vez constatada a ocorrência de erros sistemáticos, foi investigado como as diferentes variáveis (intervalo de análise, velocidade de basculada, vazão de entrada e dimensão da cavidade da báscula) influenciam no erro de medição do equipamento. Apenas a variável dimensão da cavidade possui correlação positiva significativamente estatística, enquanto as demais influenciam de forma não linear e não significativa. Futuramente, por meio do uso desse equipamento em parcelas experimentais, será possível identificar o comportamento de escoamento superficial em ambiente não antropizado (Cerrado *stricto sensu*) e em condições de modificação do uso do solo (cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto). A caracterização de como as atividades antrópicas influenciam no ciclo hidrológico permitirá a proposição de técnicas mitigadoras dos impactos resultantes dessas atividades, promovendo a perpetuação das atividades econômicas em consórcio com a manutenção da qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Por fim, a metodologia empregada nesse trabalho poderá ser facilmente reproduzida, tanto para a calibração quanto para a construção de equipamentos aplicados a outras condições de escoamento superficial.

Palavras-chave: escoamento superficial. monitoramento *in situ*. parcela experimental. uso e cobertura do solo.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

ABSTRACT

SCHWAMBACK, Dimaghi. Design, dimensioning and calibration of tipping buckets for continuous monitoring of runoff in experimental plots. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Soil and water degradation are listed as major environmental problems in the world. Achieving efficient use of natural resources requires a complete understanding of the water cycle through changes in land cover. Thus, information at different spatial and temporal scales, as well as *in situ* monitoring, are necessary. Our main goal was to design, size and calibrate tipping buckets for continuous runoff monitoring in experimental plots under four common land use conditions in Southeastern of Brazil (Cerrado *stricto sensu*, pasture, sugar cane and bare soil). The equipment was designed using the rational method and has the following volumetric resolutions: 11.63mL (Cerrado), 64.16mL (sugarcane), 139.86mL (pasture) and 660.95mL (bare soil). Each equipment was subjected to laboratory tests (dynamic calibration) under ten flow intensities, evenly distributed until a maximum flow corresponding to a rainfall with a return period greater than 100 years. Each flow rate was recorded over six sampling times (1, 2, 5, 10, 20 and 30 minutes) under five replicates. The equipment was tested in lab under high flow intensities and performed satisfactorily. After performing the dynamic tests, adjustments were verified using four different calibration curves: linear, potential, flow inverse and quadratic. Among the alternatives, the linear regression had the best correlation (above 99%) with the monitored data. Using these curves for calibration, the residual errors were -1,35%, 0,04%, 3,18%, and 3,73% for the tipping buckets to be installed in the Cerrado, sugarcane, pasture, and bare soil, respectively. Once the occurrence of systematic errors was verified, it was investigated how the different variables (sampling time, tipping speed, inlet flow rate and size of the weighing cavity) influenced the measurement error. Only the 'cavity size' variable has a statistically significant positive correlation, while the others influenced nonlinearly and non-significantly. In the future, by using this equipment in experimental plots, it will be possible to identify runoff behavior in non-anthropized environment (Cerrado *stricto sensu*) and under conditions of land use modification (sugar cane, pasture and exposed soil). The characterization of how anthropic activities influence the hydrological cycle will allow the proposition of techniques that mitigate the impacts resulting from these activities, promoting the perpetuation of consortium economic activities with the maintenance of the quality and quantity of water resources. Finally, the methodology employed in this work can be easily reproduced for calibration and construction tipping buckets applied to other runoff conditions.

Keywords: surface runoff. in situ monitoring. experimental plot. land use and cover.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico e seus componentes.....	28
Figura 2: Localização da área de estudo (parcelas experimentais).	38
Figura 3: Variáveis medidas na área de estudo 1 e 2, em que: (1) escoamento superficial;	39
Figura 4: Histograma de eventos de precipitação monitorados entre 2011 e 2018 com MIT de 60 minutos.	41
Figura 5: Histograma da concentração de sedimentos com base no monitoramento realizado entre os anos de 2011 – 2017.	44
Figura 6: Ilustração (a) e registro fotográfico (b) do processo de calibração estática realizado.	45
Figura 7: Ilustração (a) e registro fotográfico (b) do processo de calibração dinâmica realizado.....	46
Figura 8: Ilustração da balança a ser utilizada na quantificação do escoamento superficial em perspectiva (a) e vista lateral (b).....	52
Figura 9: Esquema de funcionamento da parcela experimental após instalação das balanças.	54
Figura 10: Registro fotográfico das balanças 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).	55
Figura 11: Erros percentuais nas medições durante a calibração estáticas nas balanças 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).....	57
Figura 12: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 1 (cerrado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	60
Figura 13: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	61
Figura 14: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	62

Figura 15: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	63
Figura 16: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 1 (fechado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	66
Figura 17: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	67
Figura 18: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	68
Figura 19: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	69
Figura 20: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 1 (fechado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	72
Figura 21: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	73
Figura 22: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	74
Figura 23: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.....	75
Figura 24: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 1 (fechado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	78

Figura 25: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	79
Figura 26: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	80
Figura 27: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	81
Figura 28: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 1 (cerrado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	84
Figura 29: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	85
Figura 30: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	86
Figura 31: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.	87
Figura 32: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) obtidos com adoção do volume nominal aferido, minimizado e maximizado nas balanças 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).	92
Figura 33: Curvas de ajuste ligando os pontos de volume nominal aferido, minimizado e maximizado nas balanças 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).	94
Figura 34: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) com coeficiente angular igual a 1 e PBIAS igual a 0 nas balanças 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).	95
Figura 35: Identificação de zonas de comportamento do erro percentual médio ao longo de diferentes velocidades de basculadas nas balanças 1, 2, 3 e 4, considerando um tempo de análise de 30 minutos.	97

Figura 36: Gráficos dos efeitos principais do tempo de análise no erro percentual médio medido nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c), e 4 (d).....	98
Figura 37: Erros percentuais médios considerando diferentes intervalos de registro de dados nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).....	99
Figura 38: Gráfico dos efeitos principais das variáveis velocidade de basculamento, volume de cavidade e tempo de análise nos erros percentuais médios.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplos de aplicações de básculas no monitoramento hidrológico.....	35
Tabela 2: Instrumentação nas áreas de monitoramento.....	39
Tabela 3: Volumes nominais aferidos durante a calibração estática nas diferentes básculas. .	56
Tabela 4: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.	60
Tabela 5: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na báscula 2 em diferentes tempos de análise.	61
Tabela 6: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na báscula 3 em diferentes tempos de análise.	62
Tabela 7: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.	63
Tabela 8: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.	66
Tabela 9: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 2 em diferentes tempos de análise.	67
Tabela 10: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 3 em diferentes tempos de análise.	68
Tabela 11: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.	69
Tabela 12: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste linear para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.	70
Tabela 13: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.	72
Tabela 14: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na báscula 2 em diferentes tempos de análise.	73
Tabela 15: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na báscula 3 em diferentes tempos de análise.	74
Tabela 16: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.	75

Tabela 17: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste potencial para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.....	76
Tabela 18: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.....	78
Tabela 19: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 2 em diferentes tempos de análise.....	79
Tabela 20: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 3 em diferentes tempos de análise.....	80
Tabela 21: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.....	81
Tabela 22: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.	82
Tabela 23: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.	84
Tabela 24: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na báscula 2 em diferentes tempos de análise.	85
Tabela 25: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na báscula 3 em diferentes tempos de análise.	86
Tabela 26: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.	87
Tabela 27: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste quadrática para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.....	88
Tabela 28: Resumo das métricas estatísticas considerando diferentes métodos de regressão nas básculas 1, 2, 3 e 4.	89
Tabela 29: Equações a serem utilizadas no processo de calibração das básculas 1 a 4.....	90
Tabela 30: Volumes nominais aferidos, minimizados e maximizados para as básculas 1, 2, 3 e 4.....	91

Tabela 31: Métricas estatísticas com variação do volume nominal para a balança 1, 2, 3 e 4 com base em medições de intervalo de 30 minutos.	93
Tabela 32: Volumes nominais em mL aferidos (nom.) e para que a ocorra a minimização do erro com utilização da porcentagem de viés (PBIAS) e coeficiente angular (m) como função objetivo considerando diferentes tempos de amostragem (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos).	95
Tabela 33: Correlação de Pearson e P-valor entre as variáveis erro percentual e velocidade de basculamento considerando um tempo de análise de 30 min.	96
Tabela 34: Correlação de Pearson e P-valor entre as variáveis tempo de análise e erro percentual médio.	98
Tabela 35: Resultado do teste ANOVA entre as variáveis volume da cavidade, tempo de análise, velocidade de basculamento e erro percentual médio medidos nas balanças....	102
Tabela 36: Exemplos de erros sistêmicos e aleatórios ocorrentes em balanças utilizadas em campo.	103

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	OBJETIVOS	26
2.1	Objetivo geral.....	26
2.2	Objetivos específicos.....	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	O ciclo hidrológico e seus componentes.....	27
3.1.1	Escoamento superficial.....	28
3.2	Uso e cobertura do solo atual e potenciais alterações	29
3.3	Técnicas e métodos de medição e estimativa do escoamento superficial.....	31
3.3.1	Estimativa empírica: Método racional.....	31
3.3.2	Monitoramento <i>in situ</i> : Básculas	32
4	MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1	Descrição da área de aplicação.....	37
4.2	Concepção e dimensionamento do equipamento	40
4.3	Calibração	43
4.3.1	Calibração estática.....	44
4.3.2	Calibração dinâmica	45
4.3.3	Curvas de calibração.....	48
4.3.3.1	Regressão linear.....	48
4.3.3.2	Regressão potencial	48
4.3.3.3	Regressão pelo inverso da vazão	49
4.3.3.4	Regressão quadrática	49
4.4	Análise estatística.....	50

5	RESULTADOS.....	52
5.1	Equipamento.....	52
5.2	Calibração.....	55
5.2.1	Estática	55
5.2.2	Dinâmica	57
5.2.3	Curvas de ajuste	64
5.2.3.1	Regressão linear	64
5.2.3.2	Regressão potencial.....	70
5.2.3.3	Regressão pelo inverso da vazão	76
5.2.3.4	Regressão quadrática.....	82
5.2.3.5	Determinação da curva de calibração a ser utilizada	88
5.2.4	Cenários hipotéticos de investigação do erro.....	91
5.2.4.1	Super e subestimação do volume nominal	91
5.2.4.2	Minimização do erro	94
5.2.5	Testes de causalidade	96
5.2.5.1	Velocidade de basculada	96
5.2.5.2	Tempo de análise	97
5.2.5.3	Dimensão da cavidade da balança.....	100
5.2.5.4	Análise conjunta de fatores	101
5.2.6	Fatores que afetam a calibração e erros	102
5.3	Considerações finais quanto ao dimensionamento, instalação, operação e manutenção do equipamento	103
6	CONCLUSÃO.....	105
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
	APÊNDICES.....	115

1 INTRODUÇÃO

Quais são os impactos da mudança das características e da cobertura do solo nos fluxos de água e energia na superfície terrestre e na recarga de água subterrânea resultante? Esse é um dos 23 questionamentos elencados por Blöschl et al. (2019) com o objetivo de direcionar as pesquisas em hidrologia no mundo.

Estudos de projeções populacionais preveem que a população global atingirá 9,5 bilhões de pessoas até 2050 (COSTA et al., 2018). Consequentemente, será exigido um aumento correspondente da produção global de alimentos, estimada em 40% (OCDE, 2015). Nesse cenário, o Brasil destaca-se como produtor agrícola e pecuário. Em 2010, o país foi o quinto maior produtor de cereais e oleaginosas, e o segundo maior produtor de cítricos e carne bovina (COSTA et al., 2018). Esse estágio produtivo foi obtido, dentre outros motivos, devido à intensificação das atividades agrícolas na porção central do Brasil (bioma Cerrado), o qual sustenta 55% da produção nacional de carne (VENDRAME et al., 2010) e mais de 50% das áreas agricultáveis para produção vegetal (SPERA, 2017), destacando-se a cana-de-açúcar, soja, milho e feijão.

O bioma Cerrado localiza-se na porção central do Brasil, cobrindo cerca de 25% da área nacional (~2 milhões de km²), além de uma pequena porção na Bolívia e Paraguai (EITEN, 1972). Como resultado da ampliação das fronteiras agrícolas, cerca de 50% da vegetação natural do Cerrado foi convertida em pastagem e agricultura, e menos de 3% estão conservadas dentro de áreas protegidas (GARCIA; FERREIRA; LEITE, 2011), o que ameaça não apenas a flora, mas a fauna que nele se abriga.

Wang et al. (2018) citam que as condições da superfície (uso e cobertura do solo) têm forte sinergia com os processos hidrológicos. Segundo Moraes (2012) e Sussha Lekshmi, Singh e Shojaei Baghini (2014), a cobertura vegetal é o fator mais importante a influenciar na taxa de infiltração e escoamento superficial. As folhas, caules e matéria orgânica superficial protegem a camada superficial do solo do impacto das gotas de chuvas, evitando a desagregação de partículas, compactação e encrostamento. As raízes penetram as diferentes camadas, servindo como caminho preferencial para a água. Por fim, a cobertura vegetal serve como proteção contra a ação direta do Sol, impedindo a conversão rápida da umidade em vapor d'água. Além da cobertura vegetal, outras características pedológicas (textura, estrutura, porosidade, tortuosidade, conectividade dos poros, grau de compactação e umidade), geomorfológicas

(curvatura de perfil e plano) e climáticas (distribuição, volume e intensidade das chuvas) também influenciam no percentual de escoamento superficial e infiltração (GUZHA et al., 2018).

O escoamento superficial é um processo natural que associado às práticas antrópicas desordenadas repercute em danos ao meio ambiente. Perdas de solo e elementos associados (nutrientes), além de representar perdas econômicas, causam assoreamento, impactam negativamente a qualidade das águas superficiais (eutrofização) e subterrâneas (contaminação do aquífero), desequilibram a quantidade de nutrientes do solo, dificultam o crescimento de espécies vegetais nativas na área erodida e promovem a proliferação de espécies exóticas na área de deposição (BRAMORSKI; TRIVELIN; CRESTANA, 2015).

Anache et al. (2017) citam que para alcançar um uso eficiente da água, conservação dos recursos naturais e minimização dos impactos antrópicos, é crucial um melhor entendimento dos processos físicos que compõem o ciclo hidrológico sob diferentes condições de uso do solo (natural e antrópico). Nesse sentido, o monitoramento é uma etapa fundamental. Há uma vasta gama de técnicas e metodologias para estudo e mensuração do escoamento superficial, as quais diferem quanto a finalidade e aplicabilidade na área de estudo. Cada uma apresentando vantagens e limitações intrínsecas.

O uso de parcelas experimentais é umas das técnicas mais convencionais para estudo do escoamento superficial e erosão (GUO; HAO; LIU, 2015). Apesar da necessidade de alto investimento financeiro e temporal para instalação e manutenção dessas estruturas (SUN et al., 2014), em uma pequena área podem ser monitoradas com precisão as variáveis hidrológicas sob diferentes coberturas vegetais, práticas de cultivo e manejo do solo. Os principais exemplos de sucesso de uso dessa tecnologia são os Estados Unidos da América com o desenvolvimento da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e suas variações (RUSLE e MUSLE).

Harmel et al. (2006) apresentam uma série de instrumentos para a quantificação do escoamento superficial em pequenas áreas. Dentre elas, a utilização de caixas de armazenamento é citada como a tecnologia mais comumente utilizada em parcelas experimentais. Seu uso reduz os erros decorrentes do uso do particionamento do volume total e, conseqüentemente, reduz incertezas nos resultados finais. Entretanto, seu uso demanda constantes viagens a campo para coleta de dados, esvaziamento e coleta de amostras (KHAN; ONG, 1997). Há de se considerar ainda que sob grandes eventos de precipitação, pode haver

um extravasamento dos recipientes de armazenamento e perda de dados únicos e importantes para descrição do fenômeno hidrológico. Tendo isso em mente, muitos pesquisadores optam pelo uso de divisores do escoamento total e armazenamento de apenas uma parcela do volume escoado (BONILLA et al., 2006).

As básculas são dispositivos robustos de baixo custo aquisitivo, fácil manutenção e instalação e com capacidade de funcionamento sob um amplo espectro de intensidades de escoamento. Além dessas, sua principal vantagem é a capacidade de monitoramento contínuo do fenômeno hidrológico, diferentemente do uso de caixas de armazenamento do volume total. Blöschl et al. (2019), em mais um de seus direcionamentos para as pesquisas em hidrologia, citam que são fundamentais o desenvolvimento e uso de tecnologias para quantificação das propriedades, estados e fluxos de superfície e subsuperfície em diferentes escalas espaciais e temporais. Nesse sentido, a identificação do hidrograma sob diferentes condições de uso do solo propiciará a investigação dos processos hidrológicos sob uma nossa perspectiva temporal.

Desta forma, baseando-se na crescente demanda por alimentos, fibras e energia, bem como nas consideráveis alterações ambientais decorrentes da conversão de ambientes naturais em áreas agricultáveis, são fundamentais pesquisas que busquem a compreensão de como as mudanças antrópicas, por meio da mudança do uso e cobertura do solo, afetam os processos hidrológicos (YU et al., 2019). A quantificação do escoamento superficial é um passo importante para o desenvolvimento de estratégias de restauração e preservação da vegetação natural e garantia da sustentabilidade dos ecossistemas (WANG et al., 2018).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Conceber e avaliar a aplicabilidade do uso de básculas para o monitoramento contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais sob quatro condições de usos do solo comuns na região Sudeste do Brasil (Cerrado *stricto sensu*, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto).

2.2 Objetivos específicos

- i. Conceber equipamento que possibilite o monitoramento contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais sob diferentes usos do solo;
- ii. Dimensionar e construir o equipamento visando seu funcionamento adequado sob eventos frequentes de escoamento superficial;
- iii. Aplicar diferentes técnicas de calibração: estática e dinâmica;
- iv. Encontrar uma curva de regressão que apresente melhor ajuste aos dados observados, para a calibração dos equipamentos;
- v. Avaliar como as diferentes variáveis (tempo de análise, velocidade de basculada, vazão de entrada e dimensão da cavidade da báscula) influenciam no erro de medição do equipamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O ciclo hidrológico e seus componentes

A água faz parte de diferentes processos biológicos e reações químicas de quase todos os componentes do planeta Terra. Está presente na superfície, subsolo e atmosfera, armazenada em diferentes estados físicos: líquido, sólido e gasoso. Movimenta-se constantemente através da litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera, num processo conhecidamente denominado ciclo hidrológico (TUCCI, 2013).

Impulsionado pela energia solar associada à gravidade e à rotação da terra, o ciclo hidrológico se caracteriza pela mudança de fases da água, tendo os seguintes componentes: Precipitação, evaporação, transpiração, escoamento superficial e subsuperficial, infiltração, condensação, escoamento de base, sublimação e interceptação (Figura 1). Por meio da absorção de energia proveniente da radiação solar, a água passa do estado líquido ao gasoso, sendo transportada pelas massas de ar, dando origem a nevoeiros, nuvens e precipitação. A precipitação pode ocorrer sob formas tradicionais, líquida (chuva) e sólida (neve e granizo), ou formas menos representativas no ciclo hidrológico, como as geadas e orvalhos (TUCCI, 2013).

Após precipitada, a água pode tomar vários destinos: parte pode voltar rapidamente para a atmosfera por evaporação; parte pode escoar superficialmente, se concentrando em sulcos, córregos e rios, e parte pode ser absorvida pelo solo, podendo ficar disponível para as plantas, ou ao final, contribuir na recarga de aquíferos. Ao contrário do escoamento superficial, que representa a resposta mais rápida ao evento de precipitação, o escoamento subterrâneo é lento e dependente da porosidade do solo (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

Da parcela que precipita sobre o continente, a determinação da parcela a ser armazenada no solo por meio da infiltração ou escoada superficialmente depende de fatores pedológicos (textura, estrutura, porosidade etc.), cobertura do vegetal e características da chuva (intensidade e duração). Assim, um solo com bons índices de permeabilidade e sob cobertura de vegetação nativa, quando submetido a uma chuva com duração e intensidade média, expressará menor parcelas de escoamento superficial e maior infiltração (MIYATA et al., 2019). De forma oposta, solos sob longos cultivos intensivos com pouca adoção de práticas conservacionistas, quando submetidos a uma chuva de alta intensidade, expressarão altas parcelas de escoamento superficial (ŞEN, 2015).

Figura 1: Ciclo hidrológico e seus componentes.

Fonte: Adaptado de FAO (2018).

3.1.1 Escoamento superficial

A componente escoamento superficial reflete a parcela de água decorrente da precipitação ou derretimento da neve que se desloca livremente sobre a superfície. O escoamento ocorre quando a quantidade de água disponível sobre a superfície é maior que a taxa de infiltração do solo. Inicialmente, acumula-se uma fina camada de água sobre o solo, a qual é transportada devido ao desnível topográfico (quando existente). Enquanto é transportada, a camada de água aumenta de acordo com a área superficial contribuinte, dando origem aos canais, córregos e rios (HILLEL, 2003).

O escoamento superficial em determinada área é função de dois grupos de variáveis, as quais possuem diferentes níveis de relevância de acordo com as condições locais. O primeiro grupo é composto por fatores climatológicos, sendo eles: intensidade, duração, distribuição e tipologia de precipitação; e condição de umidade antecedente. O segundo grupo, por sua vez,

refere-se aos fatores geomorfológicos: uso e cobertura do solo, tipo de solo, área contribuinte, declividade, relevo, elevação e rede de drenagem (HILLEL, 2003; NEARING et al., 2017).

3.2 Uso e cobertura do solo atual e potenciais alterações

Primeiramente, é importante elucidar a definição do termo uso e cobertura do solo. O termo refere-se à junção de dois conceitos: cobertura do solo, referindo-se ao estado físico da superfície da terra e seus atributos naturais, tais como biota, pedologia e topografia, considerando também a presença de estruturas humanas; e uso do solo, denotado pelas atividades humanas, como a manutenção de terras agrícolas, pastagens e moradias. Assim, o uso do solo representa a exploração humana da cobertura deste, em que a exploração causaria a modificação de um tipo de cobertura em favor de um tipo de uso, por exemplo a substituição de florestas naturais em benefício da implantação agrícola (ROBINSON et al., 2013).

Mudanças nos ambientes naturais causadas pelas atividades humanas através do uso da terra aumentaram significativamente durante os últimos três séculos, sendo a revolução industrial no século XVIII o marco mais evidenciável (FRANK et al., 2017; ROBINSON et al., 2013). Atualmente, as principais forças motrizes são o crescimento populacional e a demanda por terras agrícolas, pecuária e produção de cereais, que ocorrem em várias escalas e dimensões espaciais e temporais sob os diversos biomas do mundo (SMITH et al., 2014).

A mudança de uso e cobertura do solo no Brasil é caracterizada principalmente pela conversão de vegetação natural em agricultura e pastagem (CARVALHO; DOMINGUES; HORRIDGE, 2017). A aptidão nacional pela agricultura é fundamentada pelas condições climáticas favoráveis (baixa variação de temperatura anual, precipitação pluviométrica satisfatória, alta incidência solar e baixa susceptibilidade à eventos climáticos extremos), associada à demanda nacional e internacional por alimentos, fibras e biocombustíveis (ARIAS et al., 2017). É importante também ressaltar que várias outras tipologias de vegetação natural foram convertidas, em menor escala, em outros usos, tais como zonas urbanas e industriais.

Até meados do século XIX, a ocupação do território nacional limitava-se ao sul, sudeste e litoral do Brasil, concentrando-se em centros urbanos isolados e cultivo agrícola e agropecuária de subsistência (MACHADO, 1992). Nas últimas décadas, esse processo de mudança no uso e cobertura da terra seguiu um novo padrão: os altos investimentos em

tecnologias agrícolas, melhoramento genético, técnicas de irrigação, correção nutricional, calagem e práticas de manejo alavancaram o setor agrícola brasileiro e consolidaram as regiões centro-oeste e norte do Brasil, tornando a Amazônia e Cerrado as principais fronteiras agrícola (OCDE, 2015).

Atualmente, a agricultura ocupa cerca de 65,4 milhões de hectares do território nacional (LOSSAU et al., 2015), sendo 14% deste total destinado ao cultivo de cana-de-açúcar (VALDES; HJORT; SEELEY, 2016). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, registrando um total estimado em 5,38 trilhões de toneladas no ano de 2016 (CONAB, 2016). O estado de São Paulo é o maior produtor nacional, responsável por 52,30% da produção brasileira, ocupando 4,74 milhões de hectares (CONAB, 2016).

Ainda no setor no agrícola, o Brasil tem cerca de 1,12 milhões de km² ocupados por pastagens, as quais sustentam mais de 217 milhões de bovinos (BRASIL, 2018). Embora as pastagens nacionais apresentem sérios níveis de degradação, uma possível substituição do pasto por cana-de-açúcar aumentaria o escoamento e a erosão do solo devido aos distúrbios que ocorrem no solo ocorrente durante o plantio (YOULTON et al., 2016).

Espera-se que a demanda por alimentos cresça para subsidiar uma população que atingirá cerca de 9 bilhões de pessoas em todo o mundo até 2050 (BOMMARCO; VICO; HALLIN, 2018). Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor agrícola do mundo e espera-se que ele contribua com 40% para a demanda global de alimentos até 2050 (OCDE, 2015). O crescimento populacional exigirá mais alimentos e, conseqüentemente, um aumento da produtividade das plantações, maior consumo de nutrientes e possível expansão de terra agrícolas, resultando em impactos ambientais decorrentes da mudança do uso e cobertura do solo (BOMMARCO; VICO; HALLIN, 2018).

Embora a agricultura brasileira seja historicamente conhecida por sua expansão sobre a vegetação natural, especialmente sob o Cerrado e Amazônia, dados dos últimos anos indicam que o desmatamento abrandou e foi substituído por uma forte tendência de intensificação dos cultivos existentes (GARRETT et al., 2018). Outra questão importante a ser considerada na discussão é a modernização agrícola implantada no Brasil a partir da década de 1970, que contribuiu para a concentração da terra em grandes latifundiários, substituição do trabalho manual por maquinários e aumento da exigência por mão de obra qualificada (LASCHEFSKI,

2019). Esse processo vem a culminar no êxodo rural de pequenos agricultores e trabalhadores, aumentando a pressão de zonas urbanas sob o ambiente.

3.3 Técnicas e métodos de medição e estimativa do escoamento superficial

3.3.1 Estimativa empírica: Método racional

A quantificação do escoamento superficial é de extrema importância. Além de promover um melhor entendimento do ciclo hidrológico em determinada região, tem diversas aplicações práticas: identificação de períodos de enchentes e secas visando a redução de danos materiais e imateriais, diagnóstico quanto a necessidade de regularização de vazão por meio de barragens, caracterização do potencial hidrelétrico, reconhecimento da capacidade de armazenamento de água na bacia e análise da aptidão agrícola regional (XU et al., 2018).

Considerando que grande parte das bacias possuem baixo ou nenhum monitoramento superficial (SIVAPALAN et al., 2003), hidrólogos têm desenvolvido e utilizado técnicas empíricas (método racional e curva SCS - *Soil Conservation Service*) e modelos hidrológicos (SWAT, HBV, MGB-IPH, HEC-HMS e MODFLOW) de estimação do escoamento superficial em bacias hidrográficas.

O método racional é um dos métodos mais antigos para determinação da vazão (Q) decorrente de um evento de precipitação. Para isso, o método faz a simples correlação da intensidade de precipitação (I) em determinada área (A) com um coeficiente de escoamento superficial (C), como apresentado por meio da Equação 1.

$$Q = I \cdot C \cdot A / 1000 \quad \text{Equação 1}$$

Em que: Q é a vazão de escoamento superficial (m^3/h); I é a intensidade de precipitação ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); C é o coeficiente de escoamentos superficial (adimensional) e A é a área de contribuição para o escoamento sob ação da precipitação (m^2).

O primeiro parâmetro de entrada na estimativa do escoamento superficial é a intensidade da chuva i (intensidade) que pode ser obtida a partir de uma curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência). A curva IDF é um gráfico com duração plotada como abcissa, intensidade como ordenada e uma série de curvas para cada período de retorno. A frequência é expressa em termos

de período de retorno (TR), que é a duração média entre eventos de precipitação que igualam ou excedem a magnitude de precipitação relacionada (Equação 2 e Equação 3).

$$TR = [(N + 1)/m] \quad \text{Equação 2}$$

$$TR = 1/P \quad \text{Equação 3}$$

Em que: N é a quantidade de eventos da série histórica; m é a posição do evento no ranking; TR é o tempo de retorno de um evento de precipitação; P é a probabilidade de ocorrência do evento.

O fator C indica a taxa de escoamento superficial, variando entre 0, apontando completa infiltração, a 1, indicando que toda a água precipitada resulta em escoamento. Por fim, a área é a superfície de captação da precipitação. Dentre as desvantagens do uso desse método estão o uso limitado às pequenas áreas e a desconsideração que a capacidade de infiltração atual do solo depende de seu teor de umidade (RAMKE, 2019).

Apesar de ser considerada uma técnica simples, o método racional ainda é utilizado por hidrólogos em pesquisas publicadas nas mais renomadas revistas científicas. Devido à reduzida rede de monitoramento da região da Etiópia, Erena e Worku (2019) aplicaram o método racional para investigar a dinâmica de alterações da vazão e potencial risco de enchente do rio local mediante alterações do uso do solo entre os anos 1953 e 2016.

3.3.2 Monitoramento *in situ*: Básculas

Apesar dos benefícios de métodos empíricos, uma compreensão clara dos processos de erosão do solo, escoamento superficial e o desenvolvimento de modelos que descrevam tais processos exige medições precisas e controladas, as quais são somente alcançadas por meio do uso de equipamentos de monitoramento *in situ*.

O primeiro registro de báscula para medição de escoamento superficial em parcelas experimentais data de 1928 (NEBOL'SIN, 1928) e, desde então, vem sendo utilizada como ferramenta de monitoramento hidrológico. O uso de básculas utiliza a massa da água como princípio de funcionamento. Uma vez atingida a capacidade de funcionamento determinada, o centro de massa do equipamento é deslocado para a extremidade em enchimento, liberando o líquido e iniciando o enchimento da segunda cavidade. A quantificação do escoamento ocorre

por meio do registro do número de basculadas, o qual pode ser mecânico ou automatizado com uso de *reed switch*.

O uso de básculas tem diferentes aplicações de monitoramento, desde a quantificação do escoamento superficial em parcelas (CALDER; KIDD, 1978; ELDER et al., 2014; HOLLIS; OVENDEN, 1987; JOHNSTON, 1942; KHAN; ONG, 1997; KLIK; SOKOL; STEINDL, 2004; LANGHANS et al., 2019; NEHLS; RIM; WESSOLEK, 2011 e WHIPKEY, 1965) e bacias experimentais (CHOW, 1976), quantificação do escoamento subsuperficial (PEYRARD et al., 2016) ou quantificação da precipitação interna ou escoamento fustal (IIDA et al., 2012; TAKAHASHI et al., 2010 e SHIMIZU et al., 2018). Quanto ao uso do solo, foram reportadas aplicações sobre diferentes coberturas, tais como florestas nativas (CHOW, 1976; ELDER et al., 2014; IIDA et al., 2012; SUN et al., 2014 e WHIPKEY, 1965), pastagem (PILLSBURY et al., 1962 e SUN et al., 2014), plantações agrícolas (SUN et al., 2014; BASHAGAKULE et al., 2018 e LANGHANS et al., 2019), áreas em degelo (HELVEY; FOWLER, 1980) e superfícies impermeáveis (HOLLIS; OVENDEN, 1987; NEHLS; RIM; WESSOLEK, 2011).

Edwards, Jackon e Fleming (1974) realizaram um dos trabalhos mais citados no estudo de básculas para monitoramento hidrológico. Seu alto reconhecimento não se deve apenas a ser um dos trabalhos mais antigos nessa temática, mas por idealizar e dimensionar uma báscula com uma das maiores capacidades volumétricas de armazenamento: 12 litros. Apesar da grande dimensão do equipamento projetado por Edwards, Jackon e Fleming (1974), grande parte das básculas possuem capacidade volumétrica menor que 1L, podendo chegar a até 15mL (SOMAVILLA; GUBIANI; ZWIRTZ, 2019).

Klik, Sokol e Steindl (2004) projetaram um dispositivo automatizado para medir o escoamento e a perda de solo em parcelas experimentais de até 60 m². A roda de erosão automatizada (AEW), assim denominada pelos autores, é semelhante a uma roda giratória com eixo horizontal composto por quatro cavidades iguais. Cada cavidade possui uma capacidade de armazenamento de cinco litros de escoamento, sendo capaz de medir uma taxa máxima de escoamento superficial de 75 L/min.

Sun et al. (2014) apresentam a maior aplicação de básculas para mensuração do escoamento superficial registrada na literatura. Os autores citam o desenvolvimento de um equipamento para coleta de amostras de escoamento superficial para quantificação da erosão acoplado com uma báscula de base triangular metálica com capacidade volumétrica de 2,5 L.

O conjunto já foi aplicado em mais de 100 parcelas experimentais entre 100 e 10.000 m² sob diferentes usos do solo (floresta, soja, pasto, milho e solo exposto) e possui erro percentual médio estimado em cerca de 2,1%.

No Brasil, o trabalho desenvolvido por Somavilla, Gubiani e Zwirtz (2019) no Laboratório de Ciências do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (Rio Grande do Sul) é notório, apesar da dimensão reduzida quando comparado com outras básculas utilizadas para monitoramento do escoamento superficial. Estes projetaram e construíram uma báscula de cavidade retangular (110 mm x 40 mm) com volume nominal de 15 mL, erro estimado em 2,27% e aplicabilidade a uma vazão máxima de 750 mL por minuto.

A Tabela 1 apresenta uma lista com 37 menções a básculas como ferramenta de monitoramento hidrológico. Nesses trabalhos são apresentados exemplos de dimensionamento, investigação de erros, desenvolvimento de técnicas de calibração e aplicação de básculas no monitoramento hidrológico.

Apesar de sua reconhecida aplicabilidade, o uso de básculas repercute em erros sistêmicos que necessitam de correção, a partir de calibração, para uma estimação mais precisa dos volumes de escoamento superficial em diferentes vazões. Edwards, Jackson e Fleming (1974) e Calder e Kidd (1978) foram os pioneiros em estudos de erros e desenvolvimento de curvas de calibração para básculas de grande porte. Edwards, Jackson e Fleming (1974) investigaram os erros registrados e citam o efeito da água e o volume de água dispensado no intervalo de tempo de movimento das básculas como as principais fontes de erros. Calder e Kidd (1978), a partir da identificação de uma não-linearidade dos erros com aumento da vazão, propuseram uma nova forma de construção de curva de calibração por meio da correlação da vazão de entrada com o intervalo temporal entre basculadas. Baseada na mesma ideia central de descrição dos erros considerando o intervalo entre basculadas, outros autores também propuseram curvas de calibração para básculas (SHIRAKI e YAMATO, 2004; TAKAHASHI et al., 2011; IIDA et al., 2012 e SHIMIZU et al., 2018).

Como ressaltado pelo vasto número de trabalhos, o uso de básculas para medição de escoamento superficial constitui-se como uma técnica consolidada de monitoramento. Entretanto, poucos trabalhos dedicaram-se ao dimensionamento e análise de erros em básculas de grandes dimensões e nenhum aplicou diferentes técnicas de calibração visando a redução dos erros sistêmicos inerentes.

Tabela 1: Exemplos de aplicações de básculas no monitoramento hidrológico.

Referência	Localização	Monitoramento hidrológico ¹	Etapas realizadas ²	Volume da cavidade da báscula (mL)	Área de captação	Uso do solo	PBIAS estimado (%)
Nebol'Sin (1928)	Rússia	SUP	NI*	NI*	NI*	NI*	NI*
Johnston (1942)	NI*	SUP	A	142 280	Parcela experimental (15m ²)	NI*	NI*
Pillsbury et al. (1962)	Estados Unidos da América	SUP	A	NI*	NI*	Pastagem	NI*
Whipkey (1965)	Estados Unidos da América	SUP	A	500	Parcela experimental (42m ²)	Floresta densa	NI*
Monke et al. (1967)	Estados Unidos da América	SUB	A	889	NI*	Milho	NI*
Bentz e Amerman (1968)	NI*	SUP	A	450	NI*	NI*	NI*
White e Rhodes (1970)	Inglaterra	SUB	A	100	Escoamento fustal	NA*	NA*
Edwards, Jackon e Fleming (1974)	Austrália	SUP	D, C	12000	NI*	NI*	NI*
Calder e Kidd (1978)	Inglaterra	SUP	DC, C	1200	Parcela experimental	NI*	NI*
Chow (1976)	Canadá	SUP	D, C, A	750	Microbacia experimental (NE*)	Floresta densa	3,00
Helvey e Fowler (1980)	Estados Unidos da América	SUP	D, A	300	Parcela experimental (4,79m ²)	Neve	NI*
Barfield e Hirschi (1986)	Estados Unidos da América	SUP	D, C	356	NA*	NA*	1,61
				708			2,32
				916			1,69
				1.284			1,71
Hollis e Ovenden (1987)	Inglaterra	SUP	D, C, A	1.000	Parcelas experimentais (101m ² , 194m ² , 195m ² , 276m ² , 327m ² e 449m ²)	Pavimento urbano	8
Khan e Ong (1997)	Quênia	SUP	D, C	3.000	Parcela experimental (50m ²)	NI*	2,00
Klik, Sokol e Steindl (2004)	Áustria	SUP	D, A	5.000	Parcela experimental (60m ²)	NI*	NI*
Yahava et al. (2009)	Nigéria	SUP	D, C	140	NA*	NA*	4,10
Takahashi et al. (2010)	Estados Unidos da América	VEG	C, A	150	Escoamento fustal	NA*	NI*

Referência	Localização	Monitoramento hidrológico ¹	Etapas realizadas ²	Volume da cavidade da balsa (mL)	Área de captação	Uso do solo	PBIAS estimado (%)
Nehls, Rim e Wessolek (2011)	Alemanha	SUP	D, A	98	Parcela experimental (1m ²)	Pavimento urbano	11
Iida et al. (2012)	Japão e Camboja	VEG	A, DC, C	3,73 15,7 200 200 400	Escoamento fustal e precipitação interna	Floresta decídua	NI*
Black e Luce (2013)	Estados Unidos da América	SUP	D, A	NI*	NI*	NI*	NI*
Elder et al. (2014)	Estados Unidos da América	SUP	D, A	500	Parcela experimental (5,7m ²)	Floresta densa	NI*
Sun et al. (2014)	China	SUP	D, C, A	2.500	+100 parcelas experimentais (100m ² - 10.000m ²)	Floresta, soja, pastagem, milho e solo exposto	2,1
Egorov et al. (2015)	Rússia	SUP	D, C	5.000	Laboratório	NA*	1,5
Peyrard et al. (2016)	França	SUB	A	100	Bacia experimental (8 km ²)	NI*	NI*
Bashagakule et al. (2018)	Gana	SUP	A	NI*	Parcela experimental (36m ²)	Milho e soja	NI*
Shimizu et al. (2018)	Japão	VEG	DC, C	500 200	Escoamento fustal Escoamento fustal	NA* NA*	1,00
Langhans et al. (2019)	Bélgica	SUP	C, A	100 2.000	Parcela experimental (5m ²) Parcela experimental (30m ²)	Milho e trigo	NI*
Somavilla, Gubiani e Zwirtz (2019)	Brasil	SUP	D, C	15	NI*	NI*	2,27

* Não informado (NI) ou Não aplicável (NA).

¹ SUP é a aplicação da balsa no monitoramento do escoamento superficial; ¹ SUB é a aplicação da balsa no monitoramento do escoamento subsuperficial; e VEG é a aplicação da balsa no monitoramento da precipitação interna em vegetações e escoamento fustal.

² D é a descrição do dimensionamento da balsa; DC é o desenvolvimento de uma metodologia de calibração; C é a calibração e investigação dos erros; A é a aplicação da balsa no monitoramento hidrológico.

Fonte: Autor.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de aplicação

O experimento será implementado no Instituto Arruda Botelho (IAB), na fazenda São José em Itirapina, região central do Estado de São Paulo (latitude 22°10'S, longitude 47°52'O, elevação de 790m). A região apresenta precipitação média anual de cerca de 1500 mm, com período chuvoso entre os meses de outubro e março (CABRERA et al., 2016), e de acordo com a classificação de Köppen, o clima é considerado como subtropical úmido, com verão quente e úmido e inverno frio e seco (Cwa) (ALVARES et al., 2013). O solo característico da área de estudo é o Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), o qual possui textura arenosa, boa drenagem, ácido e pobre em nutrientes (EMBRAPA, 1997).

O monitoramento dos processos hidrológicos será realizado em duas áreas de estudo. Nessas áreas foram instaladas parcelas experimentais em 2011 (OLIVEIRA et al., 2015; YOULTON et al., 2016) e, desde então, é realizado o monitoramento contínuo do escoamento superficial, umidade do solo e erosão (ANACHE et al., 2018, 2019). Área 1 é composta por parcelas experimentais sob três usos do solo: (i) pastagem (*Brachiaria decumbens*), presente na área por 20 anos consecutivos de altura entre 5 e 30 cm, a qual é utilizada para alimentação bovina sob sistema de rotação animal (10 animais a cada 30 dias); (ii) cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) implantada em 2011 sob técnica de curva de nível com espaçamento entre linhas de 1,5 m. No estágio maduro, a cana chega a atingir dois metros de altura, sendo colhida anualmente no mês de novembro e replantada a cada quatro anos; (iii) solo exposto é mantido sob aplicação de glifosato e capina manual. A área 2 está inserida dentro de uma região remanescente de Cerrado *sensu stricto* de aproximadamente 330 hectares. Embora as investigações sejam realizadas em triplicatas para cada uma das coberturas vegetais (pastagem, cana-de-açúcar, solo exposto e Cerrado), o monitoramento por uso das básculas será, inicialmente, em apenas uma das parcelas de cada uso do solo. A Figura 2 apresenta a disposição geográfica e imagens aéreas das áreas de estudo.

Figura 2: Localização da área de estudo (parcelas experimentais).

Fonte: Autor.

As áreas 1 e 2 possuem equipamentos em funcionamento e ainda outros a serem instalados em função do presente projeto (básculas automáticas de medição de escoamento). Ambas as áreas possuem estações meteorológicas (tripé de 2 e 11 metros de altura, respectivamente) programadas para registrar e armazenar dados em intervalos de 10 minutos, em um *datalogger* modelo CR1000 (*Campbell Scientific*). As variáveis meteorológicas monitoradas são: precipitação, temperaturas do ar, radiação solar, direção e velocidade do vento e pressão atmosférica. A Tabela 2 apresenta o detalhamento (tipo de sensor utilizado, altura/profundidade e localização) acerca das variáveis medidas nas áreas de estudos, enquanto a Figura 3 apresenta uma ilustração da disposição espacial dos equipamentos existentes.

Figura 3: Variáveis medidas na área de estudo 1 e 2, em que: (1) escoamento superficial; (2) umidade do solo; (3) temperatura e umidade relativa; (4) fluxo de radiação solar; (5) direção e velocidade do vento; (6) precipitação e (7) saldo de radiação.

Fonte: Autor.

Tabela 2: Instrumentação nas áreas de monitoramento.

Variável monitorada	Sensor	Altura ou profundidade (m)	Área experimental
Temperatura (°C) e Umidade relativa (%) do ar	Termo-higrômetro HMP45C	2,0	1
	Termo-higrômetro HC2S3	9,5 e 11,0	2
Precipitação (mm)	Pluviômetro Hydrological Services TB4	1,5 e 11,0	1 e 2
Pressão atmosférica (mbar)	Barômetro Vaisala CS106	1,0	1
Direção (°) e velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Anemômetro Young 05103	2,0 e 11,0	1 e 2
Fluxo de radiação solar (MJ.m ⁻²)	Piranômetro Kipp & Zonen CMP3	2,0	1
Umidade do solo	Sensor Environscan Sentek	-0,3; -0,6 e -0,9	1
		-0,1; -0,5; -0,7; -1,0 e -1,5	2

Fonte: Adaptado de Anache (2017).

4.2 Concepção e dimensionamento do equipamento

O volume de escoamento superficial em determinada área pode ser quantificado por meio de diferentes tecnologias, tais como sensores de massa, sensores de pressão, caixas volumétricas, vertedores e básculas volumétricas. Dentre as opções citadas, optou-se pelo uso da báscula por ser uma alternativa simples, duradoura e baixo custo (BASHAGAKULE et al., 2018). Desta forma foram construídas quatro básculas a serem instaladas na saída das parcelas experimentais de cada uma das coberturas vegetais. Admitiu-se a seguinte nomenclatura de acordo com o uso do solo: Báscula 1 (cerrado *sensu stricto*), báscula 2 (cana-de-açúcar), báscula 3 (pastagem) e báscula 4 (solo exposto).

O primeiro passo no dimensionamento do equipamento foi a determinação do volume a ser quantificado. Dentre os diferentes métodos a serem utilizados, foi adotado nesse trabalho o método racional, representado pela Equação 4.

$$Q = I \cdot C \cdot A \cdot 1000 \quad \text{Equação 4}$$

Em que: Q é a vazão de escoamento superficial (m^3/h); I é a intensidade de precipitação ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); C é o coeficiente de escoamentos superficial (adimensional) e A é a área de contribuição para o escoamento sob ação da precipitação (m^2).

Em estudos hidrológicos, a quantidade, intensidade e duração de um evento de precipitação são as principais variáveis a serem analisadas. Entretanto, a definição do início e término de um evento não é fácil, visto que a precipitação é um processo dinâmico. Molina-Sanchis et al. (2016) citam diferentes metodologias que possibilitam a identificação de eventos independentes, tais como determinação de um intervalo mínimo de tempo entre precipitações denominado MIT (do acrônimo em inglês *Minumum Inter-event Time*), a imposição de um coeficiente de correlação ou aplicação de curva exponencial.

Segundo Molina-Sanchis et al. (2016), o MIT é o método mais utilizado para separação de eventos independentes de precipitação. No entanto, diferentes valores de intervalo podem ser utilizados, desde três minutos a 24 horas, de acordo com o objetivo da análise que se é proposto (DUNKERLEY, 2008). Molina-Sanchis et al. (2016) monitoraram o escoamento superficial em 16 parcelas experimentais por 37 meses e, ao correlacionarem com diferentes valores de MIT entre 30 minutos e 24 horas, encontraram o valor de 60 minutos como sendo o intervalo ótimo para a análise hidrológica do escoamento superficial.

Com base no exposto acima, os dados de precipitação coletados entre novembro de 2011 e outubro de 2018, pela estação automática localizada na área de estudo, foram fracionados em eventos independentes de precipitação com intervalo mínimo entre precipitações de 60 minutos. Por meio da adoção do critério de separação de eventos, foram identificados 1845 eventos independentes. A Figura 4 apresenta o histograma de eventos independentes de precipitação registrados na área de estudo.

Figura 4: Histograma de eventos de precipitação monitorados entre 2011 e 2018 com MIT de 60 minutos.

Fonte: Autor.

Na etapa de concepção de um novo equipamento, deve-se buscar maior abrangência de aplicação e de informações que podem ser coletadas por este equipamento. Entretanto, é necessária a estipulação de uma faixa ótima de atuação, visto que uma báscula de baixa capacidade de armazenamento de água quando submetida à elevados eventos de precipitação terá elevado erro devido ao efeito cinético da água. Semelhantemente, uma báscula de elevada capacidade de armazenamento quando submetida à eventos de precipitação com baixa produção de escoamento poderá não bascular, também resultando em erros de medição.

O uso do histograma possibilita a compreensão da dispersão dos dados da área de estudo, em que se observa uma maior ocorrência de eventos de baixa (menor que 0,3mm/10min.) e média (0,3 a 1,3mm/10min.) intensidade. Com base no exposto, o dimensionamento das básculas teve como objetivo a coleta de dados de escoamento superficial decorrentes desses eventos. Assim foi adotada a intensidade de 3 mm/10 minutos (18 mm/h) como intensidade padrão para o dimensionamento das cavidades das básculas, valor que representa aproximadamente 85% das ocorrências acumuladas registradas no período de análise.

A segunda variável na determinação do escoamento superficial são coeficientes que correlacionam a precipitação com a produção de escoamento superficial, sendo estes função da cobertura vegetal e classe pedológica. Anache et al. (2019) compilaram dados de monitoramento pluvial e produção de escoamento superficial nas parcelas experimentais da área de estudo entre os anos de 2011 e 2018 e obtiveram o fator C para as diferentes coberturas vegetais existentes: 0,001 (cerrado), 0,007 (cana-de-açúcar), 0,029 (pastagem) e 0,063 (solo exposto).

A área de contribuição para a produção de escoamento superficial a ser monitorado é a área de cada parcela construída, com dimensão de 20 metros de comprimento por 5 de largura, que totalizam 100 m² cada parcela.

Uma vez determinadas todas essas variáveis, foi possível a determinação da vazão, por meio da Equação 4, a ser monitorada em cada parcela sob os diferentes usos do solo. Com base em pluviômetros, determinou-se uma velocidade ótima de operação entre três e quatro basculadas por minuto, seguindo a indicação de que o número de basculadas fosse maior que um (BARFIELD; HIRSCHI, 1986). Assim, uma vez determinada a vazão de saída das parcelas experimentais e a velocidade de operação do equipamento, foi possível a determinação do volume de escoamento armazenado nas cavidades de cada uma das básculas: 11mL (báscula 1), 73mL (báscula 2), 219mL (báscula 3) e 635mL (báscula 4). É importante citar que o volume obtido não é o volume útil da cavidade, sendo adicionada uma margem de 30% a esse valor para que possíveis adequações do volume de operação possam ser realizadas caso necessárias.

Após a determinação do volume de operação, identificou-se que a vazão de operação da báscula 1 era muito baixa e que seu processo construtivo demandaria um design especial. Assim, em vez de construir um novo equipamento, optou-se pela adequação de um pluviômetro

comercial para que sua resolução volumétrica se aproximasse àquela estimada pelo método racional.

4.3 Calibração

Assim como os pluviômetros de báscula, a medição do escoamento superficial com o uso de básculas também está sujeita a erros de medição entre a vazão real e a aferida pelo equipamento, fazendo-se necessária a construção de curvas de calibração.

A calibração pode ser realizada por meio de duas formas: estática (volumétrica) e dinâmica. A calibração estática consiste na determinação do volume de líquido necessário para que o centro de massa seja deslocado em direção à extremidade em enchimento, levando ao seu basculamento. O volume determinado nessa etapa corresponde ao volume de referência do equipamento. Por outro lado, a calibração dinâmica consiste na criação de curvas de ajuste para correção dos erros entre o volume estimado pelo equipamento mediante um fluxo constante de entrada de líquido (SHEDEKAR et al., 2016). Maior detalhamento acerca de ambas as metodologias citadas é dado por Humphrey et al. (1997), enquanto a seguir será apresentado o procedimento utilizado em sua realização.

Para a construção de uma curva de calibração adequada é necessária uma avaliação das condições a serem encontradas em campo, uma vez que o equipamento será aplicado na determinação do escoamento superficial em áreas naturais e assim sujeito ao aporte de sedimentos. Uma elevada concentração de sedimentos pode alterar a densidade da água, bem como se acumular nas cavidades do equipamento, em ambos os casos resultando em um mau funcionamento e erros de medição.

A Figura 5 apresenta um histograma da concentração de sedimentos com base no monitoramento das parcelas experimentais sob diferentes usos (locais de instalação dos equipamentos) entre os anos de 2011 e 2017. Nota-se que a maior concentração registrada no período foi de 10,2 gramas por litro, enquanto a maior parte dos eventos monitorados (95%) tem concentração em torno de 3,0 gramas por litro.

Figura 5: Histograma da concentração de sedimentos com base no monitoramento realizado entre os anos de 2011 – 2017.

Fonte: Autor.

Barfield e Hirschi (1986) realizaram o processo de calibração de quatro básculas utilizadas para a medição do escoamento superficial sob diferentes concentrações de sedimentos e concluíram que a uma concentração inferior a 20 g/L, o efeito da presença de sedimentos pode ser desprezado. Desta forma, foram desconsiderados os efeitos adversos citados anteriormente em função da presença de sedimentos no líquido a ser monitorado e foi utilizada água do sistema público de abastecimento ao invés de uma mistura de água e solo.

4.3.1 Calibração estática

Anteriormente à etapa de calibração, é importante que ambas as cavidades possuam a mesma, ou a mais similar possível, capacidade de armazenamento de água. Desta forma, foram realizados testes preliminares para garantir tal consideração por meio do aumento ou decréscimo da altura da barra de ajuste.

Para determinação da resolução volumétrica ou volume nominal (VN) foram utilizadas uma pipeta graduada e uma pera de sucção. A água foi gotejada lentamente (intervalo maior que 1 segundo) para que o efeito cinético não interferisse no processo até que uma das cavidades

da bscula basculasse e fosse identificado o volume. O procedimento foi realizado dez vezes em cada cavidade e ento aplicada a mdia entre as medies para determinao da resoluo volumtrica do equipamento. A Figura 6 apresenta uma ilustrao e registro fotogrfico do processo de calibrao esttica realizado.

Figura 6: Ilustrao (a) e registro fotogrfico (b) do processo de calibrao esttica realizado.

Fonte: Autor.

Com o objetivo de realizar uma anlise de sensibilidade da calibrao esttica, foram criados trs cenrios de anlise: nominal - considerando o volume seguindo os procedimentos citados anteriormente; minimizao e maximizao do volume nominal - obtidos pela reduo/adico de 10% ao VN determinado, respectivamente.

4.3.2 Calibrao dinmica

Durante o processo de calibrao dinmica necessria a utilizao de um sistema de abastecimento que bombeie uma vazo constante de gua ao equipamento. O uso do sistema pblico de abastecimento foi descartado devido s oscilaes na presso da rede decorrentes do uso da gua em propriedades prximas. Outra possibilidade foi o uso de bombas dosadoras, porm essa opo foi tambm desconsiderada devido grande dimenso e volume esttico da

báscula 4. Por fim, foi utilizado um tubo de PVC de 250 mm de diâmetro e 1,5 metros de altura mantido a nível constante como sistema de abastecimento de água.

No aparato utilizado para calibração dinâmica, a água proveniente do sistema público de abastecimento fornecia água ao interior do tubo de PVC, mantendo-se o nível de água constante por meio de extravasamento no tubo. Uma torneira na base do tubo permitia a saída de água e entrada nas cavidades do equipamento. O *reed switch* previamente instalado nas básculas, acoplado a um *datalogger* (CR10 e intervalo de medição de 1 minuto) e bateria 12 V, permitia a contagem e o registro automático do número de basculadas, sendo posteriormente coletado em um notebook. A Figura 7 apresenta uma ilustração (a) e registro fotográfico (b) do processo descrito.

Figura 7: Ilustração (a) e registro fotográfico (b) do processo de calibração dinâmica realizado.

Fonte: Autor.

De forma a testar a aplicação do equipamento sob condições extremas, o equipamento foi testado mediante vazões decorrentes de precipitações de diferentes períodos de retorno. As vazões foram estimadas por meio da utilização de uma curva Intensidade-Duração-Frequência – IDF (Equação 5) construída por Rosalem (2017). A curva IDF foi obtida a partir de uma série de 40 anos de dados de precipitação diária da estação meteorológica do Centro de Recursos

Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA) da Universidade de São Paulo, localizado a 5km da área em que futuramente serão instaladas as básculas.

$$I = 1249 \cdot \frac{TR^{0,15}}{(t + 11,39)^{0,81}} \quad \text{Equação 5}$$

Em que: I é a intensidade média de precipitação (mm.h^{-1}) associada a um tempo de retorno TR (anos) e tempo t (minutos) adotados.

Para a construção da curva de calibração dinâmica de cada báscula, foram calculados dez pontos de amostragem (vazões) com base em diferentes períodos de retorno e distribuídos uniformemente, sendo o último ponto de vazão amostrado decorrente de uma precipitação com tempo de retorno maior que 100 anos.

A vazão de entrada nas básculas (vazão de referência) foi determinada por gravimetria, em que a massa de água reservada ao longo de um minuto foi medida em uma balança de precisão ou balança eletrônica, quando atingido o limite máximo de medida da balança de precisão. Esse procedimento era realizado em triplicata, anterior e posteriormente ao início do experimento, sendo aplicada a média entre os seis valores para a determinação final da vazão de referência.

De forma a propiciar a investigação da interferência do tempo de análise na análise final, foi feita a análise dos dados mediante a consideração de seis intervalos de tempo: 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos. Para reduzir a possibilidade de interferência de efeitos adversos, foram realizadas medições em cinco replicadas para cada intervalo de tempo, sendo posteriormente calculada a média das replicatas. A coleta de dados para cada vazão foi realizada interruptamente ao longo de 180 minutos.

Para a elaboração da curva de calibração, é necessária a determinação do volume e vazão medidos pelo equipamento (aqui denominados volume e vazão simulados). O volume simulado é o produto entre o volume nominal e o número de basculadas medido no intervalo de tempo em análise, enquanto a vazão simulada é o quociente entre o volume simulado e o tempo de análise.

4.3.3 Curvas de calibração

A segunda parte do processo de calibração dinâmica consiste na aplicação de técnicas matemáticas e estatísticas na busca por equações que melhor ajustem a vazão simulada à vazão de referência. Foram utilizadas quatro técnicas de representação dos dados, as quais foram aplicadas a cada uma das quatro básculas, seguindo os diferentes intervalos de tempos de registro, totalizando 96 curvas de ajuste.

4.3.3.1 Regressão linear

Uma simples regressão linear foi a primeira opção utilizada para o estabelecimento de uma relação entre a vazão de referência (eixo das abcissas) e a vazão simulada (eixo das ordenadas). Do ponto de vista físico, uma constante de interceptação na equação de uma curva linear representaria uma vazão simulada associada a uma vazão de referência nula. Uma vez que esta consideração não faria sentido, a interceptação da curva foi assumida com valor zero na tentativa de melhor representar o fenômeno físico. Desta forma, a Equação 6 dispõe a equação de regressão linear utilizada.

$$Q_{bas} = mQ_{ref} \quad \text{Equação 6}$$

Em que: Q_{bas} é a vazão medida pela báscula; Q_{ref} é a vazão de referência; e m é o coeficiente angular da curva de regressão.

4.3.3.2 Regressão potencial

Outros autores, por exemplo Shimizu et al. (2018), ao analisarem a relação entre a vazão de referência e a simulada em básculas, citam que a correlação entre as duas variáveis não é linear. Desta forma, foi verificada a possibilidade de correlação de acordo com funções não lineares, sendo a potencial uma delas.

Na regressão potencial, a vazão de referência (eixo das abcissas) foi plotada contra a vazão simulada (eixo das ordenadas). Para obtenção da curva de ajuste, adotou-se o mesmo pressuposto utilizado durante a regressão linear, isto é, de que não deveria existir um coeficiente de interceptação. Desta forma, a Equação 7 dispõe a representação matemática da regressão potencial utilizada.

$$Q_{bas} = aQ_{ref}^b \quad \text{Equação 7}$$

Em que: Q_{bas} é a vazão medida pela báscula; Q_{ref} é a vazão de referência; a e b são constantes de ajuste da curva de regressão, sendo a o ponto de intercessão em $Q_{sim}=1$ e b inclinao da curva.

4.3.3.3 Regressão pelo inverso da vazão

A terceira curva de regressão consistiu na representao gráfica do tempo entre basculadas (T) em funo do inverso da vazão de referência (Q_{ref}^{-1}), como sugerido por Calder e Kidd (1978). O tempo entre basculadas foi calculado pelo quociente entre o tempo de análise e o número de basculadas registrado (Equao 8), o qual foi plotado contra o inverso da vazão de referência, resultando na representao matemática da regressão utilizada dada pela Equao 9.

$$T = \Delta t / n \quad \text{Equao 8}$$

$$T = V_{basc} Q_{ref}^{-1} + c \quad \text{Equao 9}$$

Em que: T é tempo entre basculadas; Δt é o tempo de análise (1, 2, 5, 10, 20 ou 30 minutos); n é o número de basculadas registradas; V_{basc} é o coeficiente angular da curva de regressão indicando o volume de cada cavidade da báscula; c é a constante de ajuste da curva, indicando o tempo necessário para que a báscula saia do ponto estável, se movimento e depois volte ao ponto estável .

4.3.3.4 Regressão quadrática

Por fim, foi aplicada uma regressão quadrática do volume de basculadas (V_{basc}) em funo da vazão de referência (Q_{ref}), como proposto por Costello e Williams (1991). Essa técnica de regressão parte do pressuposto de que há uma alterao do volume nominal da báscula de acordo com a vazão de referência, estimado pela Equao 10. Uma vez calculado o volume de basculada, a Equao 11 dispõe a representao matemática da regressão utilizada.

$$V_{basc} = (Q_{ref} * \Delta t) / n \quad \text{Equao 10}$$

$$V_{basc} = b_0 + b_1 Q_{Basc} + b_2 Q_{Basc}^2 \quad \text{Equao 11}$$

Em que: V_{basc} é o volume acumulado em cada cavidade da báscula; Q_{ref} é a vazão de referência durante a simulao; Q_{Basc} é a vazão medida pela báscula durante a simulao; Δt é o tempo de análise (1, 2, 5, 10, 20 ou 30 minutos); n é o número de basculadas registradas; e b_0 , b_1 e b_2 são constantes de ajuste da curva.

4.4 Análise estatística

Para a validação estatística dos dados simulados durante os testes de calibração dinâmica das básculas, foram aplicadas cinco métricas estatísticas, sendo elas: Coeficiente de determinação (R^2), eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), porcentagem de viés (PBIAS), desvio padrão do erro quadrático médio (RSR) e eficiência de Kling-Gupta (KGE) na forma não paramétrica, descritas matematicamente por meio das Equação 12, Equação 13, Equação 14, Equação 15 e Equação 16, respectivamente.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{bas} - \bar{Q})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ref} - \bar{E})^2} \quad \text{Equação 12}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ref} - Q_{bas})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ref} - \bar{Q})^2} \quad \text{Equação 13}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ref} - Q_{bas}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{ref})} \quad \text{Equação 14}$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{ref} - Q_{bas})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{ref} - \bar{Q})^2}} \quad \text{Equação 15}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(\beta - 1)^2 - (\alpha_{KG} - 1)^2 + (r_g - 1)^2} \quad \text{Equação 16}$$

Em que: Q_{bas} é a vazão de referência; Q_{bas} é a vazão medida pela báscula; n é o número de eventos; $\bar{Q}$ é a vazão média da vazão de referência; β é o BIAS entre eventos simulados e observados; α_{KG} é o BIAS entre desvio padrão de eventos simulados e observados; e r_g é a correlação de Pearson.

As métricas estatísticas R^2 e NSE avaliam o grau de colinearidade entre os dados observados e os simulados (MORIASI et al., 2007). A eficiência de Nash-Sutcliffe varia entre $-\infty$ e 1, o coeficiente de determinação varia entre 0 e 1. Em ambos os casos, quanto mais próximo de 1, melhor é a correlação entre os dados observados e simulados (SURFLEET et al., 2012). O PBIAS indica a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). Valores positivos de PBIAS indicam

uma subestimação simulada em representar os dados observados, valores negativos uma superestimação e, quando igual a zero, uma correlação perfeita dos dados. A métrica RSR indica a razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão. Esse indicador varia entre 0, indicando simulações ideais, a valores positivos elevados, indicando modelagens insatisfatórias (MORIASI et al., 2007). Por fim, a utilização da métrica KGE na forma não paramétrica foi uma opção na tentativa de utilização de uma função mais robusta que possibilitasse a análise mediante diferentes aspectos (BIAS, desvio padrão e correlação de Pearson), conforme indicam Pool, Vis e Seibert (2018). Nesse métrica, os valores variam entre 0 e 1 e quão mais próximos de 1, melhor é a correlação estatística entre os dados simulados e observados.

Além da utilização das métricas estatísticas que auxiliam na descrição, espacialização e comparação dos dados simulados, foi aplicada a análise de variância (ANOVA) e correlação de Pearson para investigação da interferência das variáveis velocidade de basculamento, dimensão da cavidade e tempo de análise no erro médio entre a vazão observada e a simulada nas diferentes básculas.

5 RESULTADOS

5.1 Equipamento

O uso da balança para quantificação do escoamento superficial se assemelha ao funcionamento do pluviômetro de balança. A Figura 8 apresenta uma ilustração do equipamento dimensionado. O equipamento consiste em duas cavidades conectadas, as quais são continuamente preenchidas por escoamento superficial. Quando uma das cavidades atinge um volume crítico, o centro de massa da estrutura é deslocado para o lado da cavidade preenchida, direcionando o volume de água para baixo, descartando-o e iniciando o enchimento da outra cavidade.

Figura 8: Ilustração da balança a ser utilizada na quantificação do escoamento superficial em perspectiva (a) e vista lateral (b).

Em que: (1) são as cavidades da balança; (2) são as hastes de fixação no terreno; (3) é a placa suporte fixa; (4) é a placa de suporte móvel; (5) é a barra vertical para suporte do *reed switch* e suporte da estrutura superior (6) é a barra de controle de altura da balança; (7) é a haste de suporte da barra de controle de altura; (8) *reed switch* e cabo conectando ao datalogger; e (9) é a estrutura superior.

Fonte: Autor.

As cavidades das balanças 2 e 3 foram construídas utilizando-se tubos de PVC de 50 e 75 mm de diâmetro, respectivamente, cortados ao meio. Entretanto, devido à elevada necessidade de capacidade de armazenamento, a cavidade da balança 4 foi construída em chapa de aço galvanizado, material resistente ao impacto durante o descarte da água.

Um *reed switch* foi fixado a uma das barras de suporte da estrutura da balança e um ímã foi acoplado à porção central da balança. Cada vez que o equipamento bascular, liberando a água, o ímã fixado passará próximo ao *reed switch*, gerando um campo magnético e unindo seus dois filamentos metálicos internos, permitindo a passagem de corrente e registro do basculamento. O sinal elétrico será registrado no datalogger e os dados poderão ser coletados durante as visitas de campo.

A estrutura do equipamento é composta por duas partes ligadas por barras rosqueáveis. A primeira parte (estrutura fixa) é uma base retangular construída em perfis metálicos, em que nas extremidades estão afixados vergalhões de aço de um metro de comprimento. Os vergalhões serão enterrados no solo e funcionarão como uma fundação para o equipamento, inibindo o balanço e desnível passível da ação cinética do basculamento. A segunda parte da estrutura (estrutura móvel) é uma placa de aço, na qual estão soldadas as barras verticais de suporte da placa superior e também rosqueadas as barras de controle de altura da balança. A placa móvel permite a fácil remoção do equipamento para manutenção, ensaios e testes de calibração em laboratório.

Dois pares de hastes rosqueáveis de metal foram instalados em cada uma das extremidades da base, ligando as placas inferior e superior. Um cilindro metálico transpassado por cada par de hastes permite o ajuste da altura de cada uma das extremidades de contato da balança quando em operação. Quanto menor é a altura entre a placa e a extremidade da balança, maior é a capacidade de acúmulo de escoamento na cavidade oposta. Desta forma, a utilização das barras tem como objetivo final a possibilidade de ajuste do volume do nominal e, conseqüentemente, velocidade de basculamento conforme necessário.

O conjunto instrumental apresentado é protegido por meio de uma caixa metálica, prevenindo a entrada de animais e ação de intemperes naturais.

O escoamento superficial será coletado através de parcelas experimentais (quatro) já em operação, construídas de maneira que representassem as condições naturais e a complexidade das interações com o mínimo de influência na continuidade, conectividade e heterogeneidade naturais dos sistemas (SADEGHI; SEGHALEH; RANGAVAR, 2013). As parcelas de monitoramento possuem 5 m de largura por 20 m de comprimento e são delimitadas com chapas metálicas com aproximadamente 30 cm de altura. O fluxo do escoamento superficial de uma das parcelas será direcionado para as calhas coletoras e, por fim, direcionado a uma balança.

O volume de água descartado pelas cavidades da balança será canalizado por meio de um funil e direcionado através de tubos de PVC de 100 mm a um conjunto de caixas (duas) de polietileno de 310 litros. O armazenamento do volume total de escoamento visa a análise de erros e validação dos dados coletados pelas balanças. A Figura 9 apresenta uma ilustração do funcionamento da área de estudo após a implantação das balanças para monitoramento do escoamento superficial.

Figura 9: Esquema de funcionamento da parcela experimental após instalação das balanças.

Fonte: Autor.

Os Apêndices A, B e C apresentam os desenhos técnicos, dimensões e materiais utilizados na construção das balanças 2, 3 e 4 instaladas nas parcelas experimentais de cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto, respectivamente. Como citado anteriormente, devido à baixa vazão de escoamento superficial registrada na parcela de cerrado, foi utilizado um pluviômetro de balança comercial. A Figura 10 apresenta o registro fotográfico das balanças após construção. Posteriormente ao registro fotográfico, estas foram revestidas com fundo preparador de superfícies para evitar a ação corrosiva da água.

Figura 10: Registro fotográfico das básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Fonte: Autor.

5.2 Calibração

5.2.1 Estática

A Tabela 3 apresenta os volumes requeridos para que a báscula girasse em cada uma das dez replicatas realizadas em cada cavidade dos quatro equipamentos. Após realização do procedimento e cálculo da média dos valores registrados, obteve-se que o volume nominal é de 11,63mL, 64,16mL, 139,86mL e 660,95mL para as básculas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Assim, esses serão os volumes utilizados na identificação do volume e vazão simulados durante a calibração dinâmica, a partir do seu produto com o número de basculadas registrado.

O desvio padrão, quando expresso em valores absolutos (mL), tem correlação positiva com a dimensão do equipamento, variando de 0,44 a 12,21 nas básculas 1 e 4, respectivamente. Entretanto, quando expresso em valores percentuais, a báscula 1 apresenta valor superior (3,82%) a báscula 4 (1,85%). Entre os diversos fatores que podem levar a tal resultado, acredita-se este possa estar associado à pequena capacidade de armazenamento de água e grande sensibilidade do equipamento. Embora tenha-se tomado o cuidado de realizar a calibração com o lento gotejamento de água, o efeito cinético somado ao volume de gota promove oscilações entre as replicatas. Nos demais equipamentos, devido a suas maiores dimensões, esse efeito é suavizado.

A Figura 11 apresenta os erros percentuais nas replicatas durante a calibração estática quando comparado com o valor médio adotado. Como esperado, a balança 1 apresenta maior dispersão e amplitude dos erros registrados ao longo das replicatas do que nas demais balanças.

Tabela 3: Volumes nominais aferidos durante a calibração estática nas diferentes balanças.

	Balança 1 (mL)		Balança 2 (mL)		Balança 3 (mL)		Balança 4 (mL)	
	Cav 1	Cav 2	Cav 1	Cav 2	Cav 1	Cav 2	Cav 1	Cav 2
	10,4	12,4	62,9	64,5	145,4	143,9	661,0	650,0
	11,1	11,8	62,7	65,6	143,6	134,3	664,0	643,0
	11,7	11,6	63,6	65,1	143,1	134,8	669,0	658,0
	11,6	11,4	63,4	64,8	138,1	136,2	670,0	644,0
	12,1	11,8	63,5	65,6	139,6	137,5	669,0	647,0
	12,3	12	62,9	65,2	144,3	141,9	681,0	662,0
	11,4	11,6	62,4	64,9	141,9	136,4	673,0	645,0
	11,2	11,7	63,9	65,2	140,3	136,8	673,0	645,0
	11,3	11,8	63,5	65,1	143,8	135,2	677,0	654,0
	11,5	11,81	63,2	65,11	141,9	138,5	674,0	660,0
Med (mL)	11,46	11,79	63,20	65,11	142,19	137,54	671,10	650,80
Sd (mL/%)	0,53/4,64	0,27/2,28	0,46/0,73	0,33/0,51	2,31/1,63	3,13/2,27	5,88/0,88	7,16/1,10
Med global (mL)	11,63		64,16		139,86		660,95	
Sd global (mL/%)	0,44/3,82		1,06/1,65		3,59/2,56		12,21/1,85	

Em que: Cav são as cavidades da balança; Med é a média dos volumes medidos em cada uma das cavidades; Sd é o desvio padrão dos volumes medidos em cada uma das cavidades; e Med global e Sd global são a média e desvio padrão, respectivamente, dos volumes aferidos nas duas cavidades.

Fonte: Autor.

Figura 11: Erros percentuais nas medições durante a calibração estática nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Fonte: Autor.

5.2.2 Dinâmica

As Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15 apresentam os erros percentuais médios máximos e desvio padrão em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 1, 2, 3 e 4, respectivamente, considerando intervalos de 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise. Os eixos das figuras citadas foram padronizados considerando os máximos e mínimos erros registrados em cada uma das básculas de forma a facilitar a interpretação da influência da variável tempo de análise no erro médio percentual. De forma a resumir os dados gráficos, as Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 apresentam os erros médio, máximo e mínimo, desvio padrão e os valores das métricas estatísticas utilizadas (PBIAS, NSE, RSR e KGE). O número de basculadas registrado em cada um dos pontos de amostragem de vazão nas básculas 1, 2, 3 e 4 está disponível nos Apêndices D, E, F e G.

Em ambas as curvas dos ensaios de calibração para as diferentes básculas, observa-se que a variação do tempo de análise exerce papel fundamental no processo de calibração. Como esperado, em tempos de análise mais curtos, há menor número de registro de dados e assim o desvio padrão dos dados é maior do que aquele ocorrente com intervalos maiores, como em 30 minutos. Em seções a seguir (Sessão 5.2.6), será melhor discutida a interferência dessa variável no erro global.

Considerando os dez valores de vazão medidos em replicatas durante o processo de calibração dinâmica das quatro básculas, foram registrados erros positivos, indicando uma tendência de subestimação dos valores monitorados. O maior PBIAS (13,6%) foi observado na báscula 4 sob volume nominal de 660,95 mL, seguido pelas básculas 3 (9,3%), 2 (5,7%) e 1 (3,3%) com volumes nominais de 139,86 mL, 64,16 mL e 11,63 mL, respectivamente. O resultado obtido indica uma tendência de que a subestimação ocorrente tem correlação positiva com o volume nominal de cada báscula.

Concernente à subestimação registrada, Postolache, Pereira e Girão (2011) citam que uma importante deficiência da calibração estática é a desconsideração do volume nominal requerido para o movimento da báscula. Esse volume requerido é dependente da intensidade da vazão de entrada no equipamento, podendo resultar em uma subestimação entre 10 e 40% do volume total esperado no final do ensaio.

Considerando a faixa de vazão analisada, em ambos os casos (básculas 1 a 4), registrou-se maior desvio padrão dos erros em baixas vazões, ocorrendo redução com o aumento da vazão, fato também observado em pluviômetros por Shedekar et al. (2016).

Os erros durante o processo de calibração da báscula 1 considerando $t=1$ minuto apresentaram variação significativa. É importante ressaltar que o *reed switch* na báscula 1 está localizado abaixo do ponto do eixo central, entre as cavidades 1 e 2, registrando um sinal elétrico a cada duas basculadas. Esse fator é um agravante que contribui para que o erro nesse equipamento seja maior quando comparado aos demais, que possuem registro a cada basculada. Quando o tempo de análise aumenta (30 minutos), a interferência dessa limitação reduz e menor é o desvio padrão percebido com o aumento da vazão de entrada. Assim, o monitoramento de eventos curtos possui maior erro associado do que aqueles de maior duração. Em nenhum dos valores médios amostrados observou-se uma superestimativa das vazões monitoradas.

Semelhantemente à bascula 1, no primeiro ponto de amostragem (41mL/min.) da bascula 2, registra-se a maior subestimativa (9,4%) e desvio padrão (4,4%) da série analisada considerando um tempo de análise de 30 minutos. Os erros médios possuem maior oscilação do que os registrados na bascula 1 e não é evidenciado um crescimento com aumento da vazão de entrada, mantendo-se sem alteração significativa entre o sexto (714 mL/min.) e décimo (995mL/min.) pontos de amostragem, entre 5,5% e 6,1% de erro.

Os erros registrados na bascula 3 possuem comportamento diferente daqueles verificados nas básculas 1 e 2. Em $t=30$ minutos, o maior desvio padrão não é registrado em pontos de amostragem de baixa vazão, possivelmente devido ao fato de que o primeiro ponto não possui intensidade baixa o suficiente, como ocorre nas demais básculas. Nas básculas 1 e 2, as menores vazões amostradas decorreram de intensidades de precipitação de 5,8 e 3,3 mm/h, enquanto na bascula 2 é de 10,3 mm/h. Entre o segundo (833 mL/min.) e sexto (2758 mL/min.) pontos de amostragem do ensaio dinâmico da bascula 3, verifica-se um crescimento significativo da subestimativa do erro registrado, de -1,9% a 12,7%, o qual posteriormente mantém-se estável (11,82%) até o final do ensaio, em uma vazão de 3999mL/min.

A bascula 4 possui em seu primeiro ponto de amostragem uma distribuição do erro semelhante às básculas 1 e 2: elevada subestimativa e desvio padrão. Ocorre uma acentuada redução da subestimativa (de 7,2% a 0,9%) entre o primeiro (760 mL/min.) e terceiro (2200 mL/min.) pontos de amostragem, que repentinamente volta a crescer (15,12%) até o quinto ponto (3597%), mantendo-se regular até o final do ensaio (16,3%).

Figura 12: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a báscula 1 (cerrado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 4: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	3,644	3,644	2,826	2,768	2,768	3,313
NSE¹	0,988	0,995	0,998	0,869	0,999	0,999
RSR¹	0,109	0,072	0,040	0,036	0,156	0,036
KGE¹	0,961	0,962	0,971	0,971	0,967	0,966
Desvio padrão do erro¹ (%)	14,238	5,733	4,475	2,157	2,157	3,927
Erro médio¹ (%)	0,913	2,104	2,208	2,746	2,746	4,433
Erro máximo¹ (%)	20,645	7,980	10,064	7,419	7,419	14,358
Erro mínimo¹ (%)	-35,224	-12,687	-8,179	0,779	0,779	1,290

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 13: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 5: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na balança 2 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	5,415	6,034	6,010	5,762	5,750	5,746
NSE¹	0,988	0,990	0,995	0,996	0,999	0,996
RSR¹	0,111	0,098	0,073	0,064	0,062	0,061
KGE¹	0,945	0,939	0,939	0,942	0,942	0,942
Desvio padrão do erro¹ (%)	10,402	10,616	4,844	3,782	2,856	2,288
Erro médio¹ (%)	7,886	7,958	6,516	6,108	5,861	5,733
Erro máximo¹ (%)	36,777	36,777	17,810	14,649	11,488	9,380
Erro mínimo¹ (%)	1,635	-1,298	-0,488	0,323	0,728	1,403

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 14: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 6: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na balança 3 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	8,580	8,580	8,633	8,831	9,187	9,332
NSE¹	0,950	0,974	0,986	0,987	0,988	0,988
RSR¹	0,224	0,161	0,120	0,112	0,111	0,110
KGE¹	0,913	0,913	0,912	0,910	0,907	0,905
Desvio padrão do erro¹ (%)	5,242	5,361	5,039	4,979	5,028	5,028
Erro médio¹ (%)	6,330	6,272	6,455	6,691	7,066	7,226
Erro máximo¹ (%)	12,245	12,269	12,573	12,674	12,725	12,708
Erro mínimo¹ (%)	-4,058	-4,058	-2,044	-2,044	-2,044	-1,932

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 15: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a báscula 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 7: Métricas estatísticas para a calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	13,163	13,592	13,335	13,563	13,549	13,573
NSE¹	0,914	0,948	0,969	0,973	0,975	0,976
RSR¹	0,294	0,228	0,176	0,163	0,157	0,155
KGE¹	0,867	0,863	0,865	0,863	0,863	0,863
Desvio padrão do erro¹ (%)	8,182	6,213	6,619	5,829	6,039	5,967
Erro médio¹ (%)	9,931	11,050	10,460	11,203	11,017	11,127
Erro máximo¹ (%)	18,091	17,013	17,229	17,229	16,730	16,730
Erro mínimo¹ (%)	-4,361	0,857	0,257	0,857	0,857	0,857

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

5.2.3 Curvas de ajuste

5.2.3.1 Regressão linear

A regressão linear foi facilmente obtida por meio da correlação linear da vazão monitorada (entrada) com a vazão simulada (multiplicação do volume nominal proveniente da calibração estática com o número médio de basculadas registrado nas replicatas). As Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19 apresentam as curvas e equações de ajuste para os erros percentuais médios registrados em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a balança 1, 2, 3 e 4, respectivamente, considerando os intervalos de 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Os coeficientes angulares (m) das curvas de ajuste obtidas possibilitam a interpretação do erro com sua utilização. Equações com m igual a 1 indicam uma perfeita correlação com uma curva 1:1 e assim, não possuindo erros. Equações com m maior que 1 indicam superestimativas dos valores monitorados e menores que 1, subestimativas. Para complementar a análise dos erros residuais decorrente do uso da regressão linear, as Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 apresentam os erros residuais médios, máximos e mínimos, desvios padrão e os valores das métricas estatísticas utilizadas para avaliação da curva de ajuste (PBIAS, NSE, RSR e KGE).

Em ambas as balanças, o tempo de análise é uma variável relevante que influencia no coeficiente de determinação (R^2) das curvas de ajuste linear. Entretanto, não há uma correlação direta entre esta variável e o coeficiente angular obtido após o ajuste linear. Assim, tendo como pressuposto que com maior tempo de análise, menor é a interferência de eventos extremos, toda a discussão será baseada considerando-se o maior tempo amostrado (30 minutos).

A utilização da curva linear como técnica de ajuste dos dados de calibração dinâmica medidos com intervalos de 30 minutos é uma opção satisfatória para as quatro balanças, conforme apresentam as métricas estatísticas utilizadas: R^2 ($>0,99$), NSE ($>0,99$), RSR ($<0,01$) e KGE ($>0,85$). Como observado na sessão anterior, a porcentagem de viés registrada em cada balança tem uma correlação direta com o volume nominal de suas cavidades. Da mesma forma, o coeficiente angular da curva de ajuste linear (0,967, 0,9418, 0,895 e 0,852) segue a mesma tendência para as balanças 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Após a implementação das curvas, o ajuste foi ideal na balança 1 ($PBIAS=0$), enquanto ocorreu uma subestimação nas balanças 2 (0,079%), 3 (1,189%) e 4 (1,397%). Os valores observados levam a identificação de que há uma correlação positiva (correlação de Pearson de 0,78), porém estatisticamente insignificante (p -valor de 0,22) entre o volume nominal da balança e o $PBIAS$ após implementação da curva, em que conforme se amplia a dimensão da cavidade, maior é a porcentagem de viés residual (subestimação). Semelhantemente, o KGE, por considerar o $PBIAS$ em seu cálculo, possui comportamento inversamente proporcional (correlação de Pearson de -0,905) e não significativo (p -valor de 0,095) para as balanças 1, 2, 3 e 4: 0,967, 0,942, 0,896 e 0,852.

Khan e Ong (1997) realizaram o processo de calibração de uma balança com capacidade volumétrica de aproximadamente 3 litros com uso da equação linear e obtiveram um coeficiente de determinação de 99% e superestimativa residual de 2%.

Visando facilitar a comparação dos resultados, as métricas estatísticas dos erros residuais após a implementação da curva de ajuste linear registrados nos quatro equipamentos foram agrupadas na Tabela 12. Nela são apresentados os valores para o $PBIAS$, NSE, RSR e KGE, além dos erros residuais médios, máximos e mínimos e desvios padrão.

Figura 16: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 1 (cerrado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 8: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	0,119	0,252	0,050	0,020	0,020	0,000
NSE¹	0,997	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
RSR¹	0,056	0,024	0,004	0,003	0,003	0,001
KGE¹	0,957	0,959	0,969	0,970	0,967	0,967
Desvio padrão do erro¹ (%)	7,589	5,268	4,428	2,264	3,027	4,487
Erro residual médio¹ (%)	-1,084	1,792	0,699	0,175	-0,754	-1,351
Erro residual máximo¹ (%)	8,837	14,923	10,399	2,198	2,005	2,036
Erro residual mínimo¹ (%)	-20,635	-4,184	-7,777	-4,817	-7,300	-12,912

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 17: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 9: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 2 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	-0,122	0,187	0,054	0,040	0,085	0,079
NSE¹	0,999	0,998	0,999	0,999	1,000	0,999
RSR¹	0,037	0,041	0,034	0,026	0,022	0,022
KGE¹	0,947	0,938	0,939	0,942	0,942	0,942
Desvio padrão do erro² (%)	16,112	16,069	5,562	4,212	3,062	2,411
Erro residual médio¹ (%)	-4,441	-3,559	-0,747	-0,481	-0,117	0,039
Erro residual máximo¹ (%)	3,725	7,412	6,516	5,495	5,140	4,480
Erro residual mínimo¹ (%)	-49,787	-48,348	-14,296	-10,368	-6,392	-3,929

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 18: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 10: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na balança 3 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	1,324	1,356	1,245	1,250	1,215	1,189
NSE¹	0,995	0,994	0,995	0,995	0,995	0,995
RSR¹	0,073	0,076	0,072	0,071	0,070	0,068
KGE¹	0,902	0,902	0,902	0,900	0,897	0,896
Desvio padrão do erro¹ (%)	5,238	5,361	5,100	5,049	5,092	5,090
Erro residual médio¹ (%)	3,431	3,509	3,297	3,272	3,222	3,184
Erro residual máximo¹ (%)	13,308	13,337	11,577	11,773	12,087	12,108
Erro residual mínimo¹ (%)	-2,798	-2,791	-3,206	-3,097	-2,790	-2,633

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 19: Curva de ajuste linear para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 11: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	1,355	1,352	1,495	1,373	1,413	1,397
NSE	0,993	0,994	0,993	0,994	0,994	0,994
RSR	0,085	0,079	0,082	0,078	0,079	0,078
KGE	0,857	0,852	0,854	0,853	0,852	0,852
Desvio padrão do erro (%)	8,182	6,490	6,870	6,119	6,327	6,250
Erro residual médio (%)	4,227	3,763	4,200	3,634	3,831	3,733
Erro residual máximo (%)	17,919	14,023	14,410	14,013	14,033	14,043
Erro residual mínimo (%)	-4,579	-2,715	-3,139	-2,994	-2,353	-2,341

Fonte: Autor.

Tabela 12: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste linear para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.

	Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4
R²	0,9994	0,9995	0,9953	0,9939
PBIAS (%)	0,000	0,079	1,189	1,397
NSE	1,000	0,999	0,995	0,994
RSR	0,001	0,022	0,068	0,078
KGE	0,967	0,942	0,896	0,852
Desvio padrão do erro (%)	4,487	2,411	5,090	6,250
Erro residual médio (%)	-1,351	0,039	3,184	3,733
Erro residual máximo (%)	2,036	4,480	12,108	14,043
Erro residual mínimo (%)	-12,912	-3,929	-2,633	-2,341

Fonte: Autor.

5.2.3.2 Regressão potencial

A regressão potencial foi obtida por intermédio da correlação potencial da vazão monitorada (entrada) com a vazão simulada (multiplicação do volume nominal proveniente da calibração estática com o número médio de basculadas registrado nas replicatas). As Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23 apresentam as curvas e equações de ajuste para os erros percentuais médios registrados em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a báscula 1, 2, 3 e 4, respectivamente, considerando os intervalos de registro de dados de 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise. Além do coeficiente de determinação contido nas figuras, as Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 apresentam os erros residuais médio, máximo e mínimo, desvio padrão e os valores das métricas estatísticas para avaliação da implementação da curva de ajuste potencial (PBIAS, NSE, RSR e KGE).

Semelhantemente ao registrado com a utilização da curva de ajuste linear, a utilização de diferentes tempos de amostragem não apresentou, para nenhum dos equipamentos, uma correlação clara com as métricas estatísticas utilizadas na avaliação da representatividade do ajuste. Por exemplo, a báscula 3 apresenta uma porcentagem de viés oscilante entre valores negativos (superestimação) e positivos (subestimação) ao longo do tempo. Semelhantemente, outras métricas também oscilam, tais como o NSE, RSR e KGE.

A utilização da curva potencial como técnica de ajuste dos dados de calibração dinâmica medidos com intervalos de 30 minutos é uma opção satisfatória para as quatro básculas, conforme apresentam as métricas estatísticas utilizadas: R² (>0,99), NSE (>0,99), RSR (<0,01) e KGE (>0,85).

Assim como registrado na curva de ajuste linear, o KGE possui correlação inversamente proporcional (correlação de Pearson de -0,906), porém estatisticamente não significativa (p-valor de 0,094). Quanto ao PBIAS, observa-se uma superestimação do erro residual da ordem de -0,358%, -0,251%, -0,021% e -0,183% nas básculas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Diferentemente do observado na curva linear, não há correlação clara entre o PBIAS e o volume nominal.

Semelhantemente, Barfield e Hirschi (1986) dimensionaram, construíram e calibraram quatro básculas variando entre 356mL e 1.284mL para medição de escoamento superficial. Como técnica de calibração, utilizaram a curva potencial e também registraram uma superestimação dos valores monitorados entre 1,62% e 1,90%, aos quais valores também não estão diretamente correlacionados às dimensões das básculas testadas.

Para facilitar a comparação dos resultados, as métricas estatísticas dos erros residuais após a implementação da curva de ajuste potencial registrados nos quatro equipamentos foram agrupadas na Tabela 17. Nela são apresentados os valores para o PBIAS, NSE, RSR e KGE, além dos erros residuais médios, máximos e mínimos e desvios padrão.

Figura 20: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 1 (cerrado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 13: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	-0,401	0,139	0,106	-0,077	-0,077	-0,358
NSE¹	0,995	0,998	0,999	0,999	0,999	0,998
RSR¹	0,074	0,041	0,025	0,035	0,035	0,043
KGE¹	0,960	0,962	0,971	0,973	0,970	0,970
Desvio padrão do erro¹ (%)	6,062	4,579	4,390	2,258	1,985	2,645
Erro residual médio¹ (%)	-0,424	-0,104	-0,099	-0,020	-0,024	-0,018
Erro residual máximo¹ (%)	11,641	7,090	7,076	2,285	3,506	4,502
Erro residual mínimo¹ (%)	-12,040	-10,809	-10,836	-4,770	-2,824	-4,142

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 21: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 14: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na balança 2 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	-1,671	-1,754	-0,619	-0,446	0,085	-0,251
NSE¹	0,991	0,989	0,998	0,999	0,962	0,999
RSR¹	0,093	0,105	0,043	0,032	0,024	0,024
KGE¹	0,947	0,938	0,939	0,942	0,942	0,942
Desvio padrão do erro¹ (%)	8,966	9,928	4,670	3,671	2,853	2,355
Erro residual médio¹ (%)	-0,396	-0,431	-0,115	-0,058	0,336	-0,055
Erro residual máximo¹ (%)	13,704	16,676	9,132	7,350	6,314	4,786
Erro residual mínimo¹ (%)	-16,223	-18,209	-7,338	-5,612	-3,796	-2,935

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 22: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 15: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na báscula 3 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	-0,012	-0,089	0,027	-0,061	0,022	-0,021
NSE¹	0,999	0,998	0,998	0,998	0,999	0,998
RSR¹	0,038	0,039	0,041	0,040	0,027	0,040
KGE¹	0,902	0,902	0,902	0,900	0,897	0,906
Desvio padrão do erro¹ (%)	2,384	2,456	2,100	2,239	2,349	2,358
Erro residual médio¹ (%)	0,008	-0,063	0,012	-0,057	0,004	-0,049
Erro residual máximo¹ (%)	4,846	4,611	3,154	3,472	3,909	3,926
Erro residual mínimo¹ (%)	-3,289	-3,627	-3,470	-3,484	-3,051	-2,912

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

Figura 23: Curva de ajuste potencial para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 16: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste potencial aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS (%)	0,322	-0,052	0,406	-0,182	-0,166	-0,183
NSE	0,993	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996
RSR	0,083	0,065	0,064	0,062	0,061	0,061
KGE	0,864	0,864	0,862	0,865	0,865	0,865
Desvio padrão do erro (%)	5,205	4,442	4,223	4,530	4,367	4,527
Erro residual médio (%)	-0,088	-0,090	0,340	-0,087	-0,119	-0,107
Erro residual máximo (%)	7,944	7,362	7,260	7,891	7,388	7,673
Erro residual mínimo (%)	-6,395	-4,578	-4,534	-5,360	-4,639	-5,250

Fonte: Autor.

Tabela 17: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste potencial para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.

	Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4
R²	0,9992	0,9994	0,9985	0,9961
PBIAS (%)	-0,358	-0,251	-0,021	-0,183
NSE	0,998	0,999	0,998	0,996
RSR	0,043	0,024	0,040	0,061
KGE	0,970	0,942	0,906	0,865
Desvio padrão do erro (%)	2,645	2,355	2,358	4,527
Erro residual médio (%)	-0,018	-0,055	-0,049	-0,107
Erro residual máximo (%)	4,502	4,786	3,926	7,673
Erro residual mínimo (%)	-4,142	-2,935	-2,912	-5,250

Fonte: Autor.

5.2.3.3 Regressão pelo inverso da vazão

No presente caso, a curva de ajuste foi obtida por meio da correlação entre o inverso da vazão de referência monitorada (entrada) com o tempo entre basculadas, conforme indicado por por Calder e Kidd (1978). As Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27 apresentam as curvas e equações de ajuste para os erros percentuais médios registrados em diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a báscula 1, 2, 3 e 4, respectivamente, considerando intervalos de registros de dados de 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos. Além do coeficiente de determinação contido nas figuras, as Tabela 18, Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21 apresentam os erros residuais médio, máximo e mínimo, desvio padrão e os valores das métricas estatísticas para avaliação da implementação da curva de ajuste potencial (PBIAS, NSE, RSR e KGE).

Analisando as figuras citadas, observa-se que o método apresenta uma limitação de operação em duas situações: baixas vazões e baixo tempo de análise. Embora os pontos de amostragem de vazão estejam uniformemente distribuídos ao longo da faixa de amostragem (tempo de retorno de 100 anos), pela formulação matemática do método, há uma concentração de pontos de amostragem de média e alta vazão na base da curva, enquanto poucos pontos de amostragem contribuem para o ajuste da curva na porção superior. A segunda variável comum a todas as básculas é que, considerando baixos tempos de análise, as métricas estatísticas de descrição do erro apresentam pior desempenho em intervalos de registros curtos quando comparado com intervalos maiores. Como exemplo, com $t=1$ minuto na báscula 2, há uma elevada superestimação (89,6%) e os valores de NSE (-7,8) e RSR (2,9) indicando fraca

correlação com os dados observados, enquanto com $t=3$ minutos, a superestimação decresce significativamente (4,5%) e há uma boa correlação estatística entre os dados ($NSE=0,98$ e $RSR=0,12$).

As limitações citadas acima também foram observadas por Shedekar et al. (2016) enquanto aplicava o método como técnica de calibração em pluviômetros. No estudo citado, os autores preferiram aplicar a curva pelo inverso da vazão nos intervalos de registros de longa duração (maiores que 5 minutos) e vazões maiores (não citado). Entretanto, o mesmo procedimento não foi replicado no presente estudo, pois há um interesse de obtenção de curva que seja aplicável satisfatoriamente também em baixas vazões.

Resguardando-se a baixa confiabilidade de aplicação da curva a baixas vazões, a utilização da curva pelo inverso da vazão como técnica de ajuste dos dados de calibração dinâmica medidos com intervalos de 30 minutos é uma opção satisfatória para as quatro básculas, conforme apresentam as métricas estatísticas utilizadas: $R^2 (>0,99)$, $NSE (>0,95)$, $RSR (<0,2)$ e $KGE (>0,85)$.

Por meio da implementação desta curva, há uma tendência de superestimação do erro residual nas básculas 1 (5,5%), 2 (4,55%) e 4 (1,68%), enquanto há uma subestimação (0,36%) na báscula 3. Dentre os equipamentos analisados, a báscula 3 foi a que apresentou melhor desempenho: menor PBIAS, menor erro residual médio, menor desvio padrão do erro residual, além de desempenho satisfatório nas demais métricas estatísticas. Na Tabela 22 são apresentados os valores para o PBIAS, NSE, RSR e KGE, além dos erros residuais médios, máximos e mínimos e desvios padrão para as quatro básculas decorrentes de um tempo de análise de 30 minutos.

Como melhor detalhado no item Metodologia, o coeficiente angular da equação de regressão obtida expressa o volume nominal da cavidade da báscula analisada. Como citado por Postolache, Pereira e Girão (2011), a diferença entre o volume nominal registrado durante a calibração estática e a dinâmica por chegar a 40%. Com uso da curva de ajuste pelo inverso da vazão, foram obtidos que os volumes para as básculas 1, 2, 3 e 4 são, respectivamente, 13,55mL, 70,85mL, 136,49mL e 700,03mL, sendo 16,57%, 10,45%, -2,41% e 5,91% maiores (valores positivos) ou menores (valor negativo) quando comparados aos volumes nominais registrados durante a calibração estática.

Figura 24: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balsa 1 (cerrado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 18: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na balsa 1 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	11,592	5,065	4,739	1,152	-2,920	-5,539
NSE¹	0,887	0,976	0,983	0,999	0,986	0,960
RSR¹	0,336	0,156	0,131	0,038	0,118	0,200
KGE¹	0,846	0,912	0,924	0,961	0,985	0,968
Desvio padrão do erro² (%)	17,948	6,857	6,251	2,379	4,360	6,721
Erro residual médio¹ (%)	5,775	2,633	2,567	0,758	-1,361	-2,774
Erro residual máximo¹ (%)	20,973	10,233	7,562	3,358	4,999	6,778
Erro residual mínimo¹ (%)	-42,538	-14,408	-13,868	-5,275	-8,825	-14,437

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

² Variável medida com base nas 5 replicatas.

Fonte: Autor.

Figura 25: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 19: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na balança 2 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	-89,613	-96,018	-15,088	-10,649	-6,869	-4,554
NSE¹	-7,806	-9,480	0,816	0,911	0,963	0,984
RSR¹	2,968	3,237	0,429	0,299	0,192	0,127
KGE¹	0,184	0,136	0,909	0,948	0,980	0,981
Desvio padrão do erro² (%)	85,590	93,620	14,089	10,091	7,045	4,656
Erro residual médio¹ (%)	-49,142	-53,260	-8,014	-5,609	-3,593	-2,385
Erro residual máximo¹ (%)	26,458	29,234	13,968	11,009	8,476	6,454
Erro residual mínimo¹ (%)	-256,198	-283,252	-31,378	-21,339	-13,690	-9,070

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

² Variável medida com base nas 5 replicatas.

Fonte: Autor.

Figura 26: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 20: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na balança 3 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS¹ (%)	-0,045	-0,143	0,477	0,187	0,300	0,362
NSE¹	0,998	0,998	0,996	0,997	0,997	0,997
RSR¹	0,049	0,049	0,060	0,053	0,056	0,059
KGE¹	0,914	0,914	0,907	0,908	0,904	0,902
Desvio padrão do erro² (%)	2,411	2,462	2,429	2,381	2,722	2,653
Erro residual médio¹ (%)	-0,108	-0,156	0,118	-0,007	0,033	0,054
Erro residual máximo¹ (%)	4,759	4,655	3,557	3,260	3,561	3,575
Erro residual mínimo¹ (%)	-3,095	-3,792	-3,373	-3,636	-3,837	-3,995

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

² Variável medida com base nas 5 replicatas.

Fonte: Autor.

Figura 27: Curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 21: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste pelo inverso da vazão linear aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS (%)	4,030	0,187	0,355	-1,924	-1,054	-1,683
NSE	0,850	0,994	0,993	0,993	0,995	0,999
RSR	0,387	0,080	0,085	0,083	0,072	0,033
KGE	0,808	0,861	0,862	0,881	0,873	0,878
Desvio padrão do erro (%)	22,316	4,523	4,440	4,742	4,401	4,673
Erro residual médio (%)	0,575	-0,094	-0,054	-1,030	-0,652	-0,934
Erro residual máximo (%)	28,731	6,237	5,501	7,576	6,711	7,244
Erro residual mínimo (%)	-36,104	-5,954	-7,021	-6,439	-6,488	-6,575

Fonte: Autor.

Tabela 22: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste pelo inverso da vazão para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.

	Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4
R²	0,9983	0,9996	0,9986	0,9981
PBIAS (%)	-5,539	-4,554	0,362	-1,683
NSE	0,960	0,984	0,997	0,999
RSR	0,200	0,127	0,059	0,033
KGE	0,968	0,981	0,902	0,878
Desvio padrão do erro (%)	6,721	4,656	2,653	4,673
Erro residual médio (%)	-2,774	-2,385	0,054	-0,934
Erro residual máximo (%)	6,778	6,454	3,575	7,244
Erro residual mínimo (%)	-14,437	-9,070	-3,995	-6,575

Fonte: Autor.

5.2.3.4 Regressão quadrática

A última curva de ajuste utilizada relaciona a vazão monitorada (entrada) com a vazão simulada (multiplicação do volume nominal proveniente da calibração estática com o número médio de basculadas registrado nas replicatas) por meio de uma curva polinomial quadrática. As Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31 apresentam as curvas e equações de ajuste para os erros percentuais médios encontrados para as diferentes vazões de referência durante a calibração dinâmica para a báscula 1, 2, 3 e 4, respectivamente, considerando os intervalos de 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise. Além do coeficiente de determinação contido nas figuras, as Tabela 23, Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26 apresentam os erros residuais médios, máximos e mínimos, desvios padrão e os valores das métricas estatísticas para avaliação da implementação da curva de ajuste potencial (PBIAS, NSE, RSR e KGE).

De forma geral, analisando o coeficiente de determinação e demais métricas estatísticas para os diferentes tempos de análise nas quatro básculas, observa-se que não há um comportamento claro no desempenho da curva de ajuste com aumento do tempo de análise. Shedekar et al. (2016) ao aplicarem esse método na calibração de pluviômetros, obtiveram melhor correlação utilizando um intervalo de registros de dados (20 minutos), o mesmo observado para a báscula 1. Entretanto, não foi observada uma melhora do desempenho da curva de ajuste com aumento do intervalo de registro de dados nas básculas de maior dimensão (2, 3 e 4).

Com base no coeficiente de determinação (R^2) disposto na Tabela 27, a utilização da curva de ajuste quadrática para representação dos dados de calibração dinâmica é uma opção razoável (maior que 0,6) para as básculas 1 (0,7208), 3 (0,8260) e 4 (0,6151). É importante ressaltar que embora as demais métricas estatísticas utilizadas (NSE, RSR e KGE) tenham apresentado valores satisfatórios, os pontos de amostragem estão completamente dispersos (R^2 de 0,0255) ao longo da curva na báscula 2, sendo uma opção insatisfatória. As discordâncias estatísticas observadas estão associadas às formulações matemáticas envolvidas e assim ressaltam a importância da utilização de diferentes métricas no processo de calibração e simulação.

Por meio da implementação desta curva, há uma tendência de subestimação do erro residual nas básculas 1 (0,747%), 3 (3,114%) e 4 (0,134%), enquanto há uma superestimação (-0,129%) na báscula 3. Na Tabela 27 são apresentados os valores para o PBIAS, NSE, RSR e KGE, além dos erros residuais médio, máximo e mínimo e desvio padrão para as quatro básculas decorrentes de um tempo de análise de 30 minutos.

Somavilla, Gubiani e Zwirtz (2019) aplicaram a curva quadrática na calibração de uma báscula para medição de escoamento superficial com resolução volumétrica de 15 mL e obtiveram boa correlação estatística (R^2 de 0,99 e NSE de 0,997) e baixa subestimação (2,27%).

Figura 28: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 1 (cerrado) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 23: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na báscula 1 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS (%)	14,178	8,728	0,001	0,259	-4,723	0,747
NSE	0,861	0,945	0,999	0,999	0,984	0,999
RSR	0,372	0,234	0,023	0,024	0,126	0,036
KGE	0,823	0,877	0,972	0,969	0,984	0,959
Desvio padrão do erro (%)	15,073	6,864	4,409	2,028	3,209	2,317
Erro residual médio (%)	8,655	6,257	-0,026	0,172	-3,345	0,531
Erro residual máximo (%)	22,746	14,787	8,439	3,194	2,089	3,964
Erro residual mínimo (%)	-29,004	-10,040	-9,986	-4,193	-7,839	-3,662

Fonte: Autor.

Figura 29: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 2 (cana-de-açúcar) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 24: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na balança 2 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS (%)	3,299	2,003	-3,612	-0,334	0,006	-0,129
NSE	0,986	0,981	0,982	0,984	0,999	0,984
RSR	0,117	0,138	0,133	0,125	0,027	0,125
KGE	0,911	0,917	0,973	0,945	0,942	0,944
Desvio padrão do erro (%)	10,402	10,616	4,844	3,782	2,937	2,288
Erro residual médio (%)	7,886	7,958	6,516	6,108	-0,014	5,733
Erro residual máximo (%)	36,777	36,777	17,810	14,649	5,848	9,380
Erro residual mínimo (%)	1,635	-1,298	-0,488	0,323	-4,592	1,403

Fonte: Autor.

Figura 30: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a balança 3 (pastagem) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 25: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na balança 3 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS (%)	2,211	2,412	-1,901	-0,446	-1,783	3,114
NSE	0,994	1,000	0,995	0,998	0,995	0,983
RSR	0,077	0,083	0,072	0,046	0,068	0,131
KGE	0,892	0,890	0,930	0,915	0,924	0,876
Desvio padrão do erro (%)	2,557	2,642	2,368	2,229	2,521	4,949
Erro residual médio (%)	1,568	1,727	-1,386	-0,159	-1,309	3,051
Erro residual máximo (%)	5,016	5,070	2,534	3,515	3,283	10,706
Erro residual mínimo (%)	-2,498	-2,721	-4,973	-3,342	-4,409	-5,542

Fonte: Autor.

Figura 31: Curva de ajuste quadrática para diferentes vazões de simulação durante a calibração dinâmica para a báscula 4 (solo exposto) considerando 1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos de análise.

Fonte: Autor.

Tabela 26: Métricas estatísticas após a implementação da curva de ajuste quadrática aos dados de calibração dinâmica na báscula 4 em diferentes tempos de análise.

	t = 1 min	t = 2 min	t = 5 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min
PBIAS (%)	-2,080	1,759	-1,711	-2,623	-0,232	0,134
NSE	0,992	1,000	0,995	0,991	0,997	0,997
RSR	0,087	0,076	0,074	0,093	0,056	0,057
KGE	0,885	0,848	0,881	0,887	0,866	0,862
Desvio padrão do erro (%)	4,881	4,223	4,031	4,543	3,986	4,132
Erro residual médio (%)	-1,468	1,084	-1,227	-1,835	-0,238	-0,001
Erro residual máximo (%)	7,262	7,302	5,847	6,662	6,488	6,770
Erro residual mínimo (%)	-7,397	-3,810	-5,194	-5,505	-4,713	-4,845

Fonte: Autor.

Tabela 27: Resumo das métricas estatísticas com aplicação da curva de ajuste quadrática para diferentes básculas com base em medições de intervalo de 30 minutos.

	Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4
R²	0,7208	0,0255	0,8260	0,6151
PBIAS (%)	0,747	-0,129	3,114	0,134
NSE	0,999	0,984	0,983	0,997
RSR	0,036	0,125	0,131	0,057
KGE	0,959	0,944	0,876	0,862
Desvio padrão do erro residual (%)	2,317	2,288	4,949	4,132
Erro residual médio (%)	0,531	5,733	3,051	-0,001
Erro residual máximo (%)	3,964	9,380	10,706	6,770
Erro residual mínimo (%)	-3,662	1,403	-5,542	-4,845

Fonte: Autor.

5.2.3.5 Determinação da curva de calibração a ser utilizada

Após a aplicação dos diferentes métodos de curvas de ajuste aos dados de calibração dinâmica das quatro básculas, é necessária a definição de qual curva possui melhor ajuste. A fim de facilitar a comparação dos resultados apresentados anteriormente, a Tabela 28 dispõe as métricas estatísticas (R^2 , PBIAS, NSE, RSR e KGE), além dos erros residuais médios, máximos e mínimos e desvios padrão para as quatro básculas decorrentes de um tempo de análise de 30 minutos das diferentes curvas de ajuste para as quatro básculas. Como já citado e confirmado por meio da Tabela 28, observa-se que a curva quadrática possui o pior desempenho para as quatro básculas e, portanto, é a primeira a ser desconsiderada para uso.

Analisando os dados estatísticos referentes à báscula 1, a utilização de quaisquer uma das três curvas restante (linear, potencial e inverso da vazão) resulta em uma correlação adequada e possuem valores de R^2 ($>0,99$), NSE ($>0,99$) e KGE (entre 0,968 e 0,97) similares. Entretanto, com a utilização do método do inverso da vazão, há a limitação de aplicação em baixas vazões, além de uma superestimação acentuada (5,54%) do erro residual quando comparado aos métodos linear (0,00%) e potencial (0,36%), sendo assim descartado. Por fim, analisando o desvio padrão do erro residual e o erro médio residual, a utilização da curva linear possui melhor ajuste, sendo assim indicado o seu uso.

Tabela 28: Resumo das métricas estatísticas considerando diferentes métodos de regressão nas básculas 1, 2, 3 e 4.

	<i>BÁSCULA 1</i>					<i>BÁSCULA 2</i>					<i>BÁSCULA 3</i>					<i>BÁSCULA 4</i>				
	<i>Sem ajuste</i>	<i>Regressão linear</i>	<i>Regressão potencial</i>	<i>Regressão pelo inverso da vazão</i>	<i>Regressão quadrático</i>	<i>Sem ajuste</i>	<i>Regressão linear</i>	<i>Regressão potencial</i>	<i>Regressão pelo inverso da vazão</i>	<i>Regressão quadrático</i>	<i>Sem ajuste</i>	<i>Regressão linear</i>	<i>Regressão potencial</i>	<i>Regressão pelo inverso da vazão</i>	<i>Regressão quadrático</i>	<i>Sem ajuste</i>	<i>Regressão linear</i>	<i>Regressão potencial</i>	<i>Regressão pelo inverso da vazão</i>	<i>Regressão quadrático</i>
R²	-	0,9994	0,9995	0,9953	0,9939	-	0,9995	0,9994	0,9996	0,0255	-	0,9953	0,9985	0,9986	0,8260	-	0,9939	0,9961	0,9981	0,6151
PBIAS (%)	3,313	0,000	0,079	1,189	1,397	5,746	0,079	-0,251	-4,554	-0,129	9,332	1,189	-0,021	0,362	3,114	13,573	1,397	-0,183	-1,683	0,134
NSE	0,999	1,000	0,999	0,995	0,994	0,996	0,999	0,999	0,984	0,984	0,988	0,995	0,998	0,997	0,983	0,976	0,994	0,996	0,999	0,997
RSR	0,036	0,001	0,022	0,068	0,078	0,061	0,022	0,024	0,127	0,125	0,110	0,068	0,040	0,059	0,131	0,155	0,078	0,061	0,033	0,057
KGE	0,966	0,967	0,942	0,896	0,852	0,942	0,942	0,942	0,981	0,944	0,905	0,896	0,906	0,902	0,876	0,863	0,852	0,865	0,878	0,862
Desvio padrão do erro residual (%)	3,927	4,487	2,411	5,090	6,250	2,288	2,411	2,355	4,656	2,288	5,028	5,090	2,358	2,653	4,949	5,967	6,250	4,527	4,673	4,132
Erro residual médio (%)	4,433	-1,351	0,039	3,184	3,733	5,733	0,039	-0,055	-2,385	5,733	7,226	3,184	-0,049	0,054	3,051	11,127	3,733	-0,107	-0,934	-0,001
Erro residual máximo (%)	14,358	2,036	4,480	12,108	14,043	9,380	4,480	4,786	6,454	9,380	12,708	12,108	3,926	3,575	10,706	16,730	14,043	7,673	7,244	6,770
Erro residual mínimo (%)	1,290	-12,912	-3,929	-2,633	-2,341	1,403	-3,929	-2,935	-9,070	1,403	-1,932	-2,633	-2,912	-3,995	-5,542	0,857	-2,341	-5,250	-6,575	-4,845

Fonte: Autor.

Assim como observado na báscula 1, os dados estatísticos referente à báscula 2 indicam o descarte do uso do método inverso da vazão por resultar em uma acentuada superestimava do erro residual quando comparado aos demais métodos. Os métodos linear e potencial apresentaram métricas estatísticas semelhantes (R^2 , PBIAS, NSE, RSR, KGE, desvio padrão e erro médio) e assim ambos podem ser aplicados como técnica de representação dos dados.

Observando os dados estatísticos da báscula 3, observa-se que após o descarte da curva quadrática, o método linear possui o pior desempenho: menor R^2 , maior PBIAS, menor NSE, maior RSR, menor KGE e maiores desvio padrão e erro residual. Comparando os métodos potencial e inverso da vazão, conclui-se que a utilização do método potencial é a melhor opção devido ao seu maior valor de KGE e menores PBIAS, RSR, desvio padrão e erro residual.

Por fim, por meio das métricas estatísticas acerca da báscula 4, o método linear é descartado devido ao seu menor R^2 , maior RSR, menores NSE e KSE e maiores desvio padrão e erro médio. Avaliando os dados concernentes aos métodos potencial e inverso da vazão, o primeiro possui melhores desempenhos em PBIAS, RSR, desvio padrão e erro médio, enquanto o segundo no R^2 , NSE e KGE. Assim, não é evidente a melhor regressão a ser utilizada, sobretudo pelo fato de que não há diferença significativa entre os valores das métricas analisadas e, portanto, ambas seriam indicadas ao uso.

Em resumo, após a identificação do método indicado para cada equipamento em específico e tendo-se em mente a importância da uniformização de metodologias de monitoramento de escoamento superficial na área de estudo, indica-se o uso da curva linear para correção dos erros durante o uso da báscula por se tratar de uma equação com maior simplicidade, confiança na extrapolação. A Tabela 29 apresenta as curvas a serem utilizadas no processo de calibração dos dados coletados em campo por cada uma das básculas.

Tabela 29: Equações a serem utilizadas no processo de calibração das básculas 1 a 4.

Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4
$V_{sim} = 12,02N$	$V_{sim} = 68,11N$	$V_{sim} = 155,98N$	$V_{sim} = 774,50N$

Em que: V_{bas} é o volume estimado pela báscula e N é o número de basculadas registrado.

As básculas 1, 2, 3 e 4, que anteriormente à utilização de qualquer curva de ajuste possuíam uma subestimação de 3,31%, 5,74%, 9,33% e 13,57%, estima-se que após implementação da curva linear o erro decorrente do monitoramento com uso das básculas seja estimado em -1,35%, 0,04%, 3,18% e 3,73%, respectivamente.

5.2.4 Cenários hipotéticos de investigação do erro

5.2.4.1 Super e subestimação do volume nominal

Como citado anteriormente, com o objetivo de investigar o efeito do volume nominal sobre os valores finais, foi realizada a análise dos erros na calibração dinâmica das básculas com cenários de minimização (-10%) e maximização (+10%) do volume aferido durante a calibração estática. Os volumes nominais utilizados na obtenção dos erros são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Volumes nominais aferidos, minimizados e maximizados para as básculas 1, 2, 3 e 4.

	Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4
Volume nominal	11,63	64,16	139,86	660,95
Volume minimizado	10,46	57,74	125,88	594,86
Volume maximizado	12,79	70,57	153,85	727,05

Fonte: Autor.

A Figura 32 apresenta as curvas de comportamento dos erros médios, máximos, mínimos e desvio padrão por meio da variação do volume nominal aferido para as básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d). Em ambos os casos, observa-se que uma minimização do volume nominal em 10% promove um deslocamento da curva dos erros em direção à subestimação, enquanto o cenário de maximização reduz a subestimação obtida com adoção do volume nominal aferido.

Figura 32: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) obtidos com adoção do volume nominal aferido, minimizado e maximizado nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Fonte: Autor.

A Tabela 31 apresenta os erros médio, máximo e mínimo, desvio padrão e os valores das métricas estatísticas utilizadas para avaliação do erro (PBIAS, NSE, RSR e KGE) para as básculas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Como citado anteriormente e confirmado pelos valores de PBIAS da Tabela 31, o cenário minimizado acentua a subestimação decorrente do uso do volume nominal, enquanto no cenário de maximização há uma redução dos valores de subestimação, atingindo níveis de superestimação (básculas 1 e 2). Shedekar et al. (2016) realizaram o mesmo procedimento de minimização e maximização do volume nominal em pluviômetros e obtiveram resultados semelhantes.

Tabela 31: Métricas estatísticas com variação do volume nominal para a balança 1, 2, 3 e 4 com base em medições de intervalo de 30 minutos.

	Báscula 1			Báscula 2			Báscula 3			Báscula 4		
	Volume nominal aferido	Volume nominal minimizado	Volume nominal maximizado	Volume nominal aferido	Volume nominal minimizado	Volume nominal maximizado	Volume nominal aferido	Volume nominal minimizado	Volume nominal maximizado	Volume nominal aferido	Volume nominal minimizado	Volume nominal maximizado
PBIAS ¹ (%)	3,313	12,982	-6,356	5,746	15,171	-3,680	9,332	18,399	0,265	13,573	22,215	4,930
NSE ¹	0,999	0,982	0,996	0,996	0,975	0,998	0,988	0,960	0,999	0,976	0,942	0,995
RSR ¹	0,036	0,133	0,067	0,061	0,157	0,039	0,110	0,200	0,033	0,155	0,241	0,074
KGE ¹	0,966	0,870	0,936	0,942	0,848	0,963	0,905	0,815	0,984	0,863	0,777	0,947
Desvio padrão do erro ¹ (%)	3,927	3,534	4,319	2,288	2,059	2,517	5,028	4,525	5,530	5,967	5,371	6,564
Erro médio ¹ (%)	4,433	13,989	-5,124	5,733	15,160	-3,693	7,226	16,503	-2,051	11,127	20,015	2,240
Erro máximo ¹ (%)	14,358	22,922	5,794	9,380	18,442	0,318	12,708	21,437	3,979	16,730	25,057	8,403
Erro mínimo ¹ (%)	1,290	11,161	-8,581	1,403	11,263	-8,457	-1,932	8,261	-12,125	0,857	10,772	-9,057

¹ Variável medida com base no erro nas diferentes vazões.

Fonte: Autor.

A variação do volume nominal resultou em uma variação da correlação entre a vazão monitorada e simulada e, conseqüentemente, influenciou no coeficiente angular de ajuste entre essas duas variáveis. Foram determinados os coeficientes angulares nas quatro básculas para os três cenários de variação do volume nominal e, a partir deles, foram plotadas as curvas conectando esses valores (Figura 33). É possível notar que o m é mais sensível na balança 1 e torna-se menos sensível conforme ocorre um aumento da cavidade da balança, indicando que a balança 1 é muito mais sensível a pequenas variações percentuais no volume do que as demais.

Figura 33: Curvas de ajuste ligando os pontos de volume nominal aferido, minimizado e maximizado nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Fonte: Autor.

5.2.4.2 Minimização do erro

Além do uso das curvas de ajuste para a correção dos erros registrados durante a calibração dinâmica, pôde-se estimar o volume nominal com o objetivo de que ocorra uma minimização dos erros. Diferentes funções objetivo podem ser utilizadas nesse processo. Neste trabalho foram utilizadas duas delas: coeficiente angular e PBIAS. Quando o valor de m é igual a 1, há uma correlação linear perfeita entre os dados monitorados e simulados; complementarmente, quando a porcentagem de viés é igual a 0, indica que não houve sub ou superestimação dos dados simulados.

A Tabela 32 apresenta os volumes nominais da cavidade de cada uma das básculas identificados para que se obtenha a minimização dos erros entre a vazão monitorada e simulada para as quatro básculas em diferentes tempos de amostragem. Na tabela citada, também são apresentados os volumes nominais aferidos durante a calibração estática. Comparando os volumes nominais para minimização do PBIAS nas básculas de 1 a 4 (tempo de análise de 30 minutos) com os volumes nominais aferidos, estes são 3,43%, 6,09%, 10,29% e 15,70% maiores, e ao utilizar o coeficiente angular, observam-se variações 3,41%, 6,18%, 11,62% e 17,35% maiores do que os volumes aferidos.

A Figura 34 apresenta a curva dos erros percentuais médios, máximos, mínimos e desvio padrão com coeficiente angular igual a 1 e PBIAS igual a 0 nas básculas 1, 2, 3 e 4, com adoção

de tempo de análise de 30 minutos. Não foi observada diferença (visualmente) entre as curvas das básculas 1 e 2, visto que os volumes obtidos para minimização das funções objetivo PBIAS e s angulares são muito próximos. Já nas básculas 3 e 4, a diferença entre os volumes mostrou-se mais significativa.

Tabela 32: Volumes nominais em mL aferidos (nom.) e para que a ocorra a minimização do erro com utilização da porcentagem de viés (PBIAS) e coeficiente angular (m) como função objetivo considerando diferentes tempos de amostragem (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos).

	Báscula 1			Báscula 2			Báscula 3			Báscula 4		
	Nom.	PBIAS	m	Nom.	PBIAS	m	Nom.	PBIAS	m	Nom.	PBIAS	m
1	11,63	12,07	12,14	64,16	67,83	67,74	139,86	152,99	155,04	660,95	761,15	771,60
2	11,63	12,07	12,13	64,16	68,28	68,40	139,86	152,99	155,10	660,95	764,90	775,40
5	11,63	11,96	11,99	64,16	68,26	68,30	139,86	153,08	155,02	660,95	762,65	774,20
10	11,63	11,96	11,98	64,16	68,08	68,10	139,86	153,41	155,35	660,95	764,70	775,30
20	11,63	12,01	12,02	64,16	68,07	68,13	139,86	154,01	155,91	660,95	764,55	775,45
30	11,63	12,02	12,02	64,16	68,07	68,12	139,86	154,26	156,12	660,95	764,75	775,60

Fonte: Autor.

Figura 34: Erros percentuais médios (ponto), máximos (linha vertical superior), mínimos (linha vertical inferior) e desvio padrão (área preenchida) com coeficiente angular igual a 1 e PBIAS igual a 0 nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Fonte: Autor.

5.2.5 Testes de causalidade

5.2.5.1 Velocidade de basculada

Por meio da correlação de Pearson foi investigada a possibilidade de uma correlação entre a velocidade de basculamento e o erro percentual registrado nas diferentes básculas. Observa-se que as básculas possuem comportamentos discordante (Tabela 33). A báscula 3 apresentou uma correlação diretamente proporcional (0,852) significativa (p-valor de 0,02), enquanto as demais apresentaram correlações negativas (báscula 1 e 2) e positiva (báscula 4), porém não significativas (p-valor maior que 0,05).

Tabela 33: Correlação de Pearson e P-valor entre as variáveis erro percentual e velocidade de basculamento considerando um tempo de análise de 30 min.

	Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4	Análise conjunta
Correlação de Pearson	-0,579	-0,008	0,852	0,707	0,134
P-valor	0,079	0,983	0,002	0,022	0,038

Fonte: Autor.

Ao plotar o erro percentual de acordo com número de basculadas registrado nas básculas 1 a 4 (Figura 35), apesar das particularidades de cada equipamento, é possível a identificação de um padrão de comportamento nas curvas dos erros. O comportamento da zona I ocorre em baixas velocidades de basculamento e resulta em elevados erros percentuais (subestimação). O comportamento da zona II ocorre em velocidades médias de basculamento, caracterizado por um decaimento da subestimação e assim, é considerada como a faixa ótima de operação das básculas. Por fim, na zona III ocorre uma reascensão do erro percentual.

De forma geral, há uma tendência à subestimação da vazão medida por básculas mediante altas intensidades de escoamento superficial (IIDA et al., 2012; SOMAVILLA; GUBIANI; ZWIRTZ, 2019) e de chuvas (SHEDEKAR et al., 2016; SYPKA, 2019). Esse fenômeno pode ser atribuído ao volume de água perdido durante o movimento das básculas (SHEDEKAR et al., 2016). Como a água entra em fluxo constante, mesmo após atingido o volume nominal da cavidade, a água continua a cair sobre a báscula que já está em deslocamento. Assim, há um intervalo de tempo para que a báscula em enchimento se desloque e a água comece a cair sobre a segunda cavidade. Considerando que o intervalo de deslocamento

seja constante, com aumento da vazão, maiores serão os erros de subestimação registrados (EDWARDS; JACKON; FLEMING, 1974).

Figura 35: Identificação de zonas de comportamento do erro percentual médio ao longo de diferentes velocidades de basculadas nas básculas 1, 2, 3 e 4, considerando um tempo de análise de 30 minutos.

Fonte: Autor.

5.2.5.2 Tempo de análise

A seleção do intervalo de aquisição de dados hidrológicos comumente depende da capacidade de armazenamento de dados disponível. Com a utilização de intervalos curtos, maiores são as possibilidades de registro dos eventos extremos e assim, melhor é o monitoramento dos fenômenos naturais (SHEDEKAR et al., 2016).

Diferentes intervalos de registro de dados foram utilizados na amostragem durante a calibração dinâmica (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos). Assim, para investigar a interferência que essa variável possui no erro percentual médio, foram elaborados os gráficos dos efeitos principais (Figura 36) correlacionando o tempo de análise e os erros percentuais associados. Por meio dos gráficos, observa-se que há uma correlação positiva nas básculas 1, 3 e 4, enquanto a báscula 2 possui correlação negativa.

De forma a validar a correlação identificada por meio dos gráficos dos efeitos principais, foi calculada a correlação de Pearson e p-valor entre as variáveis tempo de análise e o erro percentual médio. Nota-se que não há uma correlação acentuada (correlação de Pearson menor que 0,2) entre as variáveis analisadas, entretanto, devido ao p-valor estar acima do limite (0,05), não se pode rejeitar a hipótese nula considerada.

Figura 36: Gráficos dos efeitos principais do tempo de análise no erro percentual médio medido nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c), e 4 (d).

Fonte: Autor.

Tabela 34: Correlação de Pearson e P-valor entre as variáveis tempo de análise e erro percentual médio.

	Báscula 1	Báscula 2	Báscula 3	Báscula 4	Análise conjunta
Correlação de Pearson	0,168	-0,117	0,073	0,042	-0,055
P-valor	0,200	0,375	0,579	0,752	0,398

Fonte: Autor.

A Figura 37 apresenta as curvas de erros percentuais, considerando diferentes tempos de amostragem (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos) nas básculas 1 a 4. As básculas 1, 2 e 4 apresentam maior variação do erro entre os tempos de amostragem, enquanto a báscula 3 apresentou menor variação.

Figura 37: Erros percentuais médios considerando diferentes intervalos de registro de dados nas básculas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Fonte: Autor.

Habib, Krajewski e Kruger (2001) e Shedekar et al. (2016) ao investigarem o efeito do intervalo de registro nas básculas, obtiveram que menores intervalos resultam em maiores erros. Em baixas vazões, quando o intervalo de tempo necessário para se atingir o volume nominal da báscula é maior que o tempo de análise, são necessários dois ou mais intervalos de tempo para registro de um basculamento. No primeiro intervalo de tempo, não há registro de basculamento, sendo apenas registrado no segundo. Considerando um evento de precipitação em que ocorra geração contínua de escoamento superficial por um longo período, haverá erros resultando em uma subestimação e superestimação (intervalo de tempo um e dois, respectivamente) constante do escoamento medido.

Embora não se tenha obtido uma correlação estatisticamente significativa entre o tempo de análise e o erro percentual, a variável temporal influenciou nas curvas de calibração com uso do método pelo inverso da vazão. Com uso de intervalos curtos (1 minuto), o método pelo inverso da vazão apresentou pior desempenho quando comparado ao uso de maiores intervalos de tempo (20 e 30 minutos).

Ciach (2003) e Costello e Williams (1991) retratam que o tempo de análise é uma variável influenciadora significativa em estudos hidrológicos e indicam o uso do intervalo para basculamento em vez de tempos definidos de amostragem. Entretanto, não foi possível a adoção de tal consideração devido à limitação de registro do *datalogger*, o qual possuía capacidade de registrar de dados com intervalo mínimo de um minuto.

Indica-se, portanto, que sejam realizados mais estudos sobre os erros em básculas com identificação do tempo de basculamento e, se possível, quantificação do tempo entre o esvaziamento de uma cavidade e o início de enchimento da outra.

5.2.5.3 Dimensão da cavidade da báscula

A terceira variável de investigação com potencial de influência nos erros percentuais médio foi a dimensão da cavidade de básculas. Por meio do teste de correlação de Pearson, entre a capacidade de armazenamento de escoamento superficial e comportamento do erro médio de cada uma das básculas desse estudo, identificou-se uma correlação positiva (0,369) estatisticamente significativa (p-valor de 0,00), indicando que o erro percentual médio é influenciado diretamente pela dimensão da cavidade da báscula. O dado obtido reforça a importância do dimensionamento adequado da báscula para a medição do escoamento superficial de forma que esta não seja sub ou superdimensionada.

Os resultados obtidos estão de acordo com a consideração de Shedekar et al. (2016) de que a capacidade de armazenamento da báscula é um importante influenciador nos erros percentuais. Como citado anteriormente, a subestimação possivelmente decorre do volume de água perdido durante o intervalo de tempo do movimento entre as cavidades. O volume de água perdido é uma fração do volume armazenado nas cavidades, quanto maior a capacidade de armazenamento, menor é a sensibilidade do equipamento a essa fração pequena de volume que não é monitorada, e assim, maiores são os erros associados.

Há de se acrescentar como fator importante de incremento de erro, o volume de água residual retido nas cavidades da balança que não é suficiente para o basculamento destas. Por exemplo, a balança 1 possui um volume nominal de 11,63 mL e a balança 4, 660,95mL. A balança 1 possui uma resolução volumétrica muito maior que a balança 4 e, conseqüentemente, um menor volume residual passível de perda por evaporação.

5.2.5.4 Análise conjunta de fatores

Como apresentado anteriormente, o erro percentual é influenciado pelas variáveis velocidade de basculamento, tempo de análise e dimensão da cavidade da balança. Observa-se que, considerando as quatro balanças, há uma oscilação do erro com o aumento da velocidade de basculamento (Figura 38). Entretanto, as variáveis volume de cavidade e tempo de amostragem indicam uma correlação direta e inversamente proporcional, respectivamente.

Figura 38: Gráfico dos efeitos principais das variáveis velocidade de basculamento, volume de cavidade e tempo de análise nos erros percentuais médios.

Fonte: Autor.

Com o propósito de investigar qual dentre as variáveis analisadas (velocidade de basculamento, intervalo de registro de dados (tempo de análise) e volume da cavidade da balança) possui maior contribuição no erro percentual médio, foi aplicado o teste de análise de covariância (ANOVA) de multifatores. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35: Resultado do teste ANOVA entre as variáveis volume da cavidade, tempo de análise, velocidade de basculamento e erro percentual médio medidos nas básculas.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Volume da cavidade	3	1410,9	470,31	16,12	0,000
Velocidade de basculamento	1	330,8	330,78	11,34	0,001
Tempo de análise	5	111,2	22,25	0,76	0,578
Erro	230	6710,1	29,17		
Total	239	8383,0			

Fonte: Autor.

Observa-se pelos resultados expostos acima que a dimensão da cavidade da báscula possui maior influência (valor-F de 16,12) nos erros percentuais do que a velocidade de basculamento (valor-F de 11,34). Não se pode rejeitar a hipótese nula de não correlação entre as variáveis tempo de análise e erros percentuais, devido ao p-valor estar acima do limite imposto de 0,05.

5.2.6 Fatores que afetam a calibração e erros

O princípio de funcionamento de básculas para a medição de escoamento superficial e chuva é o mesmo, assim, os erros a que estão suscetíveis são semelhantes, resguardando as suas grandezas particulares. Segundo apresentado por Shedekar et al. (2016), os erros podem ser agrupados em duas categorias: sistemáticos/mecânicos e aleatórios. Os erros sistemáticos são decorrentes do funcionamento, material construtivo e design do equipamento e são, portanto, mais previsíveis e de fácil correção. Já os erros aleatórios, não são previstos e decorrem de situações inusitadas de operação em campo.

Além dos principais exemplos de erros sistêmicos e aleatórios (Tabela 36), há aqueles já citados e discutidos anteriormente (velocidade de basculamento e tempo de análise) e erros inerentes a qualquer medição laboratorial, nesse caso: incertezas nas medições do volume nominal e vazão de entrada durante a calibração dinâmica.

Tabela 36: Exemplos de erros sistêmicos e aleatórios ocorrentes em básculas utilizadas em campo.

<i>Erros sistêmicos</i>	<i>Erros aleatórios</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efeito cinético da entrada da água; ▪ Sub ou superdimensionamento das cavidades; ▪ A contínua entrada de água na cavidade da báscula que já está em movimento; ▪ Utilização de material hidrofílico; ▪ Perda de lubrificação; ▪ Desnível da estrutura; ▪ Limitação mecânica / eletrônica na contagem do número de basculadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Assoreamento / erosão da base da estrutura do equipamento, resultando em um desnivelamento da estrutura; ▪ Entrada de animais; ▪ Entupimento da entrada de fluxo; ▪ Furos e rachaduras nas cavidades da báscula; ▪ Evaporação da água armazenada nas caixas após a passagem pelas básculas, a qual é utilizada na validação dos resultados.

Fonte: Autor.

5.3 Considerações finais quanto ao dimensionamento, instalação, operação e manutenção do equipamento

Como já registrado em pluviômetros, as estruturas de monitoramento hidrológico são comumente utilizadas como local de refúgio e procriação de animais. Com base nos monitoramentos realizados e em andamento, é esperado que os equipamentos projetados sirvam como local de criação de ninhos de pássaros e colmeias, bem como refúgio de cobras, sapos e aranhas. Como objetivo de prevenção, todo o conjunto será protegido por uma caixa protetora e uma tela metálica que não permitirá a entrada de animais pelo cano de entrada do escoamento superficial.

Uma vez calibrada, é importante que durante o processo de transporte, instalação e manutenção do equipamento, as barras de ajuste de altura da báscula estejam bem apertadas de modo que não sofram modificações, ou será necessário obter nova curva de calibração. De forma a prevenir quaisquer incidentes, as alturas das barras devem ser marcadas nas hastes de sustentação de cada báscula, sendo facilmente verificada durante as visitas de campo.

O uso de vergalhões de aço de um metro de profundidade tem como finalidade a fixação do equipamento ao solo. Entretanto, o local de futura instalação das básculas é uma área de

Neossolo quartzarênico, caracterizado por alto percentual de areia e baixa compactação mecânica. Por isso, foram instalados níveis de olho nas extremidades do equipamento que possibilitam a identificação de algum desnivelamento decorrente de processos erosivos.

Os materiais utilizados na construção de todos os componentes das básculas são de origem metálica e PVC e, assim, possuem longa vida útil. Estes já foram impermeabilizados com fundo preparador de superfícies para evitar a ação corrosiva da água. Apesar dos cuidados tomados, espera-se que sejam necessárias ações de manutenção anuais para identificação de processos corrosivos no metal, repintura da estrutura, amassaduras e possíveis rachaduras e furos nas cavidades das básculas.

O principal ponto de manutenção do equipamento é a lubrificação dos eixos de rotação das básculas. É importante a garantia de livre oscilação das básculas para que o tempo de enchimento de ambas as cavidades seja o mesmo e, principalmente, para que o tempo de deslocamento no momento de alternância entre o enchimento das cavidades seja mínimo. Assim, é importante a limpeza do eixo (remoção de galhos e partículas de solo acumulados) e periódica aplicação de lubrificador.

6 CONCLUSÃO

Embora o uso de métodos empíricos proporcione estimativas satisfatórias sobre os recursos hídricos, o monitoramento *in situ* é indispensável para sua calibração e validação. Dentre as alternativas existentes, tais como calha parshall, sensor de nível e massa, vertedor e caixas de armazenamento, a báscula se configura como uma alternativa de baixo custo de construção e instalação, fácil execução e operação, permitindo monitoramento com alta resolução temporal e acurácia dos dados.

Baseado no exposto, este trabalho teve como objetivo principal conceber, dimensionar e calibrar básculas para o monitoramento contínuo do escoamento superficial em parcelas experimentais sob quatro condições de usos do solo comuns na região sudeste do Brasil (Cerrado *stricto sensu*, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto).

O equipamento foi dimensionado por meio do método racional com os dados de intensidade de chuva e coeficiente de escoamento superficial estimados em campo por outros pesquisadores. Os quatro equipamentos dimensionados possuem as seguintes resoluções volumétricas: 11,63mL (Cerrado), 64,16mL (cana-de-açúcar), 139,86mL (pastagem) e 660,95mL (solo exposto).

Cada equipamento foi submetido a testes em laboratório (calibração dinâmica) sob dez intensidades de escoamento, distribuídos uniformemente até uma vazão correspondente a uma chuva com período de retorno superior a 100 anos. Cada vazão foi registrada ao longo de seis tempos de amostragem (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos) em regime de cinco replicatas. A partir dos resultados, identificou-se uma subestimação das vazões em diferentes níveis de acordo com a dimensão da cavidade: Cerrado (3,31%), cana-de-açúcar (5,75%), pastagem (9,33%), solo exposto (13,57%).

Embora se tenha idealizado uma faixa de cobertura de 85% da série histórica registrada (2011-2018), há um elevado erro (subestimado) em baixas vazões, indicando que a melhor faixa de operação do equipamento é sob vazões médias. Mesmo não dimensionados para operar em elevadas intensidades, os equipamentos foram testados em laboratório sob intensidades de escoamento decorrentes de chuvas com período de retorno superiores a 100 anos e tiveram desempenho satisfatório (erro menor que 1%).

Após realização dos testes dinâmicos, foram testadas quatro equações de calibração: equação linear, potencial, inverso da vazão e quadrática. Dentre as alternativas, a regressão linear foi a que apresentou melhor correlação (acima de 99%) com os dados monitorados. Com o uso desse método, o erro residual será de -1,35%, 0,04%, 3,18% e 3,73%, para as básculas a serem instaladas na parcela de cerrado, cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto, respectivamente.

Uma vez constatada a ocorrência de erros sistemáticos, foi investigado como as diferentes variáveis (tempo de análise, velocidade de basculada, vazão de entrada e dimensão da cavidade da báscula) influenciaram no erro de medição do equipamento.

Ao plotar o erro percentual de acordo com número de basculadas registrado nas básculas 1 a 4, apesar das particularidades de cada equipamento, foi possível identificar um padrão de comportamento nas curvas dos erros. A zona I ocorre em baixas velocidades de basculamento e resulta em elevados erros percentuais (subestimação). A zona II ocorre em velocidades médias (2 a 4 por minuto) de basculamento, caracterizada por um decaimento da subestimação e, assim, é a melhor faixa de operação das básculas. Por fim, na zona III ocorre uma reascensão do erro percentual.

Por meio do teste de correlação de Pearson, identificou-se uma correlação positiva (0,369) estatisticamente significativa (p-valor de 0,00), indicando que o erro percentual médio é influenciado diretamente pela dimensão da cavidade da báscula. O dado obtido reforça a importância do dimensionamento adequado da báscula para a medição do escoamento superficial de forma que esta não seja sub ou superdimensionada.

Quanto à variável tempo de análise, conclui-se que é uma variável fundamental durante o processo de calibração, entretanto não foi identificada uma correlação entre esta variável e o erro nas diferentes básculas ($p > 0,05$).

Os equipamentos dimensionados constituem de instrumentos de monitoramento contínuo do escoamento superficial de áreas remotas desprovidas de energia elétrica de alta tensão. A metodologia empregada pode ser facilmente reproduzida para construção de básculas condizentes a outras condições de escoamento superficial. Por meio do uso do equipamento aqui proposto em parcelas experimentais, será possível a identificação do comportamento de escoamento superficial em ambiente natural (Cerrado *sensu stricto*) e em condições de modificação do uso do solo (cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto). A caracterização de

como as atividades antrópicas influenciam no ciclo hidrológico permitirá a proposição de técnicas mitigadoras dos impactos resultantes dessas atividades, promovendo a perpetuação das atividades econômicas em consórcio com a manutenção da qualidade e quantidade dos recursos hídricos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANACHE, J. A. A. **Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos do solo e variações climáticas em área de Cerrado**. 2017. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

ANACHE, J. A. A. et al. Hydrological trade-offs due to different land covers and land uses in the Brazilian Cerrado. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 3, p. 1263–1279, 2019.

_____. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 140–151, 2018.

_____. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, v. 152, p. 29–39, 2017.

ARIAS, D. et al. **Agriculture productivity growth in Brazil : recent trends and future prospects**. Washington: The World Bank, 2017. 64p.

BARFIELD, B. J.; HIRSCHI, M. C. Tipping Bucket Flow Measurements on Erosion Plots. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 6, p. 1600–1604, 1986.

BASHAGAKULE, J. B. et al. New method for runoff estimation under different soil management practices. **bioRxiv**, v. 4, p. 1–23, 2018.

BENTZ, W. W.; AMERMAN, C. R. A tipping bucket device for measuring very low flows. **Agriculture engineering**, v. 12, p. 750–751, 1968.

BLACK, T. A.; LUCE, C. H. **Measuring water and sediment discharge from a road plot with a settling basin and tipping bucket**. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2013. 38 p.

BLÖSCHL, G. et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 10, p. 1141–1158, 2019.

BOMMARCO, R.; VICO, G.; HALLIN, S. Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security. **Global Food Security**, v. 17, p. 57–63, 2018.

BONILLA, C. A. et al. Instrumentation for measuring runoff, sediment, and chemical losses from agricultural fields. **Journal of environmental quality**, v. 35, n. 1, p. 216–23, 2006.

BRAMORSKI, J.; TRIVELIN, P. C. O.; CRESTANA, S. Nitrogen loss by erosion from mechanical tilled and untilled soil under successive simulated rainfalls. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1204–1211, 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Dados de rebanho bovino e bubalino no Brasil - 2017**. . Brasília: Secretaria de Defesa Agropecuária, 2018. 1p.

CABRERA, M. C. M. et al. Performance of evaporation estimation methods compared with standard 20 m² tank. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 10, p. 874–879, 2016.

CALDER, I. R.; KIDD, C. H. R. A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges. **Journal of Hydrology**, v. 89, p. 383–386, 1978.

CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P.; HORRIDGE, J. M. Controlling deforestation in the Brazilian Amazon: Regional economic impacts and land-use change. **Land Use Policy**, v. 64, p. 327–341, 2017.

CHOW, T. L. Overland Flow and Subsurface Stormflow Studies. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 56, p. 197–202, 1976.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: MacGraw-Hill, 1988.

CIACH, G. J. Local random errors in tipping-bucket rain gauge measurements. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 5, p. 752–759, 2003.

CONAB - Companhia Brasileira de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília: CONAB, 2016. 66p.

COSTA, M. P. et al. A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, n. 10, p. 1460–1471, 2018.

COSTELLO, T. A.; WILLIAMS, H. J. Short duration rainfall intensity measured using calibrated time-of-tip data from a tipping bucket raingage. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 57, n. 1–3, p. 147–155, 1991.

DUNKERLEY, D. Identifying individual rain events from pluviograph records: A review with analysis of data from an Australian dryland site. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 26, p. 5024–5036, 2008.

EDWARDS, I. J.; JACKON, W. D.; FLEMING, P. M. Tipping bucket gauges for measuring run-off from experimental plots. **Agricultural Meteorology**, v. 13, n. 2, p. 189–201, 1974.

EGOROV, Y. V. et al. Installation for determining the solid and liquid runoffs during storm erosion. **Eurasian Soil Science**, v. 48, n. 2, p. 218–222, 2015.

EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. **The Botanical Review**, v. 38, n. 2, p. 201–341, 1972.

ELDER, K. et al. Design and Installation of a Tipping Bucket Snow Lysimeter. 2014, Banff, Canada: Montana State University Libraryskip navigation, 2014. p. 817–824. Disponível em: <<http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/2157>>. Acesso em 24 out. 2018

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, RJ: CIP Brasil. 1997. 212p.

ERENA, S. H.; WORKU, H. Dynamics of land use land cover and resulting surface runoff management for environmental flood hazard mitigation: The case of Dire Daw city, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 22, n. 100598, p. 1–10, 2019.

FAO. **The State of the World's Forests 2018 - Forest Pathways to sustainable development**. 28p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca0188en/ca0188en.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2018.

FRANK, S. et al. Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, p. 105004–105018, 2017.

GARCIA, F. N.; FERREIRA, L. G.; LEITE, J. F. Áreas Protegidas no Bioma Cerrado: fragmentos vegetacionais sob forte pressão. 2011, Curitiba-PR, Brasil: INPE, 2011. p. 4086–4093.

GARRETT, R. D. et al. Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 53, p. 233–243, 2018.

GUO, Q.; HAO, Y.; LIU, B. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data. **Catena**, v. 124, p. 68–76, 2015.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.

GUZHA, A. C. et al. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 15, p. 49–67, 2018.

HABIB, E.; KRAJEWSKI, W. F.; KRUGER, A. Sampling Errors of Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 6, n. 2, p. 159–166, 2001.

HARMEL, R. D. et al. Practical guidance for discharge and water quality data collection on small watersheds. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 4, p. 937, 2006.

HELVEY, J. D.; FOWLER, W. B. A new method for sampling snow melt and rainfall in forest. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 16, n. 5, p. 938–940, 1980.

HILLEL, D. Surface Runoff and Water Erosion. **Introd. to Environ. Soil Phys**. Massachusetts: Universidade de Massachusetts, 2003. p. 283–295.

HOLLIS, G. E.; OVENDEN, J. C. A tipping bucket flowmeter for roadside gully runoff. **Hydrological Processes**, v. 1, p. 391–396, 1987.

HUMPHREY, M. D. et al. A New Method for Automated Dynamic Calibration of Tipping-Bucket Rain Gauges. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 14, p. 1513–1519, 1997.

- IIDA, S. et al. Calibration of tipping-bucket flow meters and rain gauges to measure gross rainfall, throughfall, and stemflow applied to data from a Japanese temperate coniferous forest and a Cambodian tropical deciduous forest. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 2445–2454, 2012.
- JOHNSTON, C. N. Tilt buckets for measuring runoff and erosion. **Agriculture engineering**, v. 23, n. 5, p. 161–162, 1942.
- KHAN, A. A. H.; ONG, C. K. Design and calibration of tipping bucket system for field runoff and sediment quantification. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 52, n. 6, p. 437–443, 1997.
- KLIK, A.; SOKOL, W.; STEINDL, F. Automated erosion wheel: A new measuring device for field erosion plots. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 59, n. 3, p. 116–121, 2004.
- LANGHANS, C. et al. Scale effects of runoff generation under reduced and conventional tillage. **Catena**, v. 176, p. 1–13, 2019.
- LASCHEFSKI, K. Conflicting urban and rural territorial livelihood metabolisms: The “explosion” of the “sustainable” urban-industrial pulp complex in Bahia – Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 159–171, 2019.
- LOSSAU, S. et al. Brazil’s current and future land balances: Is there residual land for bioenergy production? **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 452–461, 2015.
- MACHADO, L. O. A fronteira agrícola na Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 54, p. 27–55, 1992.
- MIYATA, S. et al. Assessing spatially distributed infiltration capacity to evaluate storm runoff in forested catchments: Implications for hydrological connectivity. **Science of the Total Environment**, v. 669, p. 148–159, 2019.
- MOLINA-SANCHIS, I. et al. Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 3, p. 226–236, 2016.
- MONKE, E. J. et al. Field Study of Subsurface Drainage on a Slowly Permeable Soil. **Transactions of the ASAE**, v. 10, p. 573–576, 1967.
- MORAIS, F. De. Infiltração – uma variável geomorfológica. **Caderno de Geografia**, v. 22, n. 38, p. 73–87, 2012.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- NEARING, M. A. et al. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 5, n. 2, p. 77–84, 2017.
- NEBOL’SIN, S. I. **Elementary Surface Runoff**. Moscow, 1928.

NEHLS, T.; RIM, Y. N.; WESSOLEK, G. Hydrology and Earth System Sciences Technical note on measuring run-off dynamics from pavements using a new device: the weighable tipping bucket. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 1379–1386, 2011.

OCDE. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015**. Paris: OCDE Publishing. 2015. 148p.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 2899–2910, 2015.

PEYRARD, X. et al. A trench study to assess transfer of pesticides in subsurface lateral flow for a soil with contrasting texture on a sloping vineyard in Beaujolais. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 1, p. 14–22, 2016.

PILLSBURY, A. F. et al. Effects of vegetation manipulation on the disposition of precipitation on chaparral-covered watersheds. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p. 695–703, 1962.

POOL, S.; VIS, M.; SEIBERT, J. Evaluating model performance: towards a non-parametric variant of the Kling-Gupta efficiency. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 13–14, p. 1941–1953, 2018.

POSTOLACHE, O.; PEREIRA, M. D.; GIRÃO, P. Smart wireless tipping-bucket rain gauge - Measurement and automatic dynamic calibration. **Proceedings of the Third International Conference on Informatics in Control**, v. Automation, p. 205–209, 2011.

RAMKE, H.-G. Collection of Surface Runoff and Drainage of Landfill Top Cover Systems. In: COSSU, R.; STEGMANN, R. (Org.). **Solid Waste Landfilling**. Philadelphia: Elsevier B.V., 2019. p. 373–416.

ROBINSON, D. T. et al. Linking land use and carbon cycle. **L. Use Carbon Cycle Adv. Integr. Sci. Manag. Policy**. New York: Cambridge University Press, 2013. p. 3–23.

ROSALEM, L. M. P. **Invento para determinação da interceptação da chuva pela serapilheira em ecossistemas florestais**. 2017. 107 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

SADEGHI, S. H. R.; SEGHALEH, M. B.; RANGAVAR, A. S. Plot sizes dependency of runoff and sediment yield estimates from a small watershed. **Catena**, v. 102, p. 55–61, 2013.

ŞEN, Z. Water Science Basic Information. **Pract. Appl. Hydrogeol.** Istanbul: Istanbul Technical University, 2015. p. 1–41.

SHEDEKAR, V. S. et al. Assessment of measurement errors and dynamic calibration methods for three different tipping bucket rain gauges. **Atmospheric Research**, v. 178–179, p. 445–458, 2016.

SHIMIZU, T. et al. A generalized correction equation for large tipping-bucket flow meters for use in hydrological applications. **Journal of Hydrology**, v. 563, n. January, p. 1051–1056, 2018.

SHIRAKI, K.; YAMATO, T. Compensation of Tipping-Bucket Flow Meters. **Journal of Japan society of hydrology & water resources**, v. 17, p. 159–162, 2004.

SIVAPALAN, M. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 6, p. 857–880, 2003.

SMITH, P. et al. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: EDENHOFER, O. et al. (Org.). . **Clim. Chang. 2014 Mitig. Clim. Chang.** Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014. p. 112.

SOMAVILLA, A.; GUBIANI, P. I.; ZWIRTZ, A. L. Tipping bucket prototype for automatic quantification of surface runoff rate in plots. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 43, p. 1–7, 2019.

SPERA, S. Agricultural Intensification Can Preserve the Brazilian Cerrado: Applying Lessons From Mato Grosso and Goiás to Brazil's Last Agricultural Frontier. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 1–7, 2017.

SUN, T. et al. Design and initial evaluation of a portable in situ runoff and sediment monitoring device. **Journal of Hydrology**, v. 519, n. PA, p. 1141–1148, 2014.

SURFLEET, C. G. et al. Selection of hydrologic modeling approaches for climate change assessment: A comparison of model scale and structures. **Journal of Hydrology**, v. 464–465, p. 233–248, 2012.

SUSHA LEKSHMI, S. U.; SINGH, D. N.; SHOJAEI BAGHINI, M. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 54, p. 92–105, 2014.

SYPKA, P. Dynamic real-time volumetric correction for tipping-bucket rain gauges. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 271, n. March, p. 158–167, 2019.

TAKAHASHI, M. et al. Rainfall partitioning and cloud water interception in native forest and invaded forest in Hawai'i Volcanoes National Park. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 3, p. 448–464, 2010.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. UF ed. Porto Alegre: UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

VALDES, C.; HJORT, K.; SEELEY, R. **Brazil's Agricultural Land Use and Trade: Effects of Changes in Oil Prices and Ethanol Demand**. Washington: U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, 2016. 44p.

VENDRAME, P. R. S. et al. Fertility and acidity status of latossolos (oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 82, n. 4, p. 1085–1094, 2010.

WANG, L. et al. Vegetation changes and water cycle in a changing environment. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 1731–1734, 2018.

WHIPKEY, R. Z. Subsurface stormflow from forest slopes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 10, n. 2, p. 74–85, 1965.

WHITE, E. J.; RHODES, P. S. A tipping bucket recorder for use in stem flow studies. **The Journal of Applied Ecology**, v. 7, n. 2, p. 349, ago. 1970.

XU, Q. et al. Exploration of severities of rainfall and runoff extremes in ungauged catchments: A case study of Lai Chi Wo in Hong Kong, China. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 640–649, 2018.

YAHAYA, O. et al. Development and calibration of an automatic Runoff-meter. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 4, n. 9, p. 8–16, 2009.

YOULTON, C. et al. Changes in erosion and runoff due to replacement of pasture land with sugarcane crops. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 7, p. 1–12, 2016.

YU, Y. et al. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China. **Science of the Total Environment**, v. 652, p. 755–764, 2019.

APÊNDICES

Apêndice A: Desenhos da balança 2.

Apêndice A: Desenhos da balança 2. (continuação).

Apêndice A: Desenhos da balança 2. (continuação).

Apêndice A: Desenhos da balança 2. (continuação).

Apêndice A: Desenhos da balança 2. (continuação).

Apêndice A: Desenhos da balança 2. (continuação).

Apêndice A: Desenhos da balança 2. (continuação).

Apêndice B: Desenhos da báscula 3.

Apêndice B: Desenhos da balança 3. (continuação).

Apêndice B: Desenhos da balança 3. (continuação).

Apêndice B: Desenhos da balança 3. (continuação).

Apêndice B: Desenhos da balança 3. (continuação).

Apêndice B: Desenhos da balança 3. (continuação).

Apêndice B: Desenhos da balança 3. (continuação).

Apêndice C: Desenhos da balança 4.

Apêndice C: Desenhos da balança 4. (continuação).

Apêndice C: Desenhos da balança 4. (continuação).

Apêndice C: Desenhos da balança 4. (continuação).

Apêndice C: Desenhos da balança 4. (continuação).

Apêndice C: Desenhos da balança 4. (continuação).

Apêndice C: Desenhos da balança 4. (continuação).

Apêndice D: Dados brutos de registro de número de basculadas em diferentes tempos de análise (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos) para a báscula 1.

1 minuto					2 minutos					5 minutos					10 minutos					20 minutos					30 minutos				
2	0	2	0	2	2	2	2	2	2	6	4	4	4	6	10	8	10	8	8	18	18	16	14	14	28	24	22	20	20
0	2	2	0	2	2	2	4	2	4	6	8	6	8	6	14	14	14	14	14	28	28	28	28	28	42	42	42	42	42
4	4	4	4	4	8	8	6	8	8	20	18	18	20	18	38	38	38	36	38	76	74	76	76	74	114	112	112	114	112
6	6	6	6	6	12	12	12	12	12	30	30	32	30	30	60	62	60	62	62	122	122	122	122	122	182	184	184	182	180
6	8	6	8	6	14	14	14	12	14	34	34	34	34	34	68	68	68	70	68	136	138	136	136	136	204	206	204	204	204
8	6	8	8	6	14	16	14	14	16	36	38	36	36	38	74	72	74	72	72	146	146	144	144	142	220	216	214	212	218
8	8	8	8	8	16	16	16	16	16	40	40	40	40	40	80	80	80	80	80	160	160	160	158	160	240	240	238	240	238
10	8	10	8	10	18	18	20	18	18	46	46	52	50	52	92	102	102	100	100	194	202	196	194	192	296	296	290	292	290
10	10	12	10	12	20	22	22	22	22	54	54	54	54	54	108	108	108	110	108	216	218	216	218	218	324	326	328	326	326
10	12	12	12	12	22	24	22	24	24	58	58	58	58	58	116	116	114	116	116	232	230	232	232	232	346	348	348	350	350

Apêndice E: Dados brutos de registro de número de basculadas em diferentes tempos de análise (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos) para a balança 2.

1 minuto					2 minutos					5 minutos					10 minutos					20 minutos					30 minutos				
0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	2	2	3	3	3	4	6	6	6	5	10	12	11	12	11	16	17	18	17	18
2	3	2	3	2	5	5	5	5	5	12	13	12	12	13	25	24	25	24	25	49	49	49	49	49	74	73	74	72	72
4	3	3	4	3	7	7	6	7	7	17	17	16	17	16	34	33	33	33	33	67	66	65	66	64	100	98	98	97	97
6	6	6	6	6	12	12	12	12	12	30	30	29	29	30	60	58	59	59	59	118	118	119	118	118	177	178	177	177	177
7	6	7	6	7	13	13	13	13	13	33	32	32	32	32	65	64	64	65	64	129	129	129	130	130	193	194	195	195	195
9	8	9	8	8	17	17	17	17	16	42	42	41	41	43	84	82	86	87	86	166	173	173	172	171	252	260	258	255	256
10	11	10	10	11	21	20	21	21	21	52	52	52	53	52	104	105	104	105	105	209	209	210	211	210	313	315	316	317	317
12	11	12	12	11	23	24	23	23	23	58	58	58	57	58	116	115	115	115	115	231	230	230	229	231	346	345	344	346	345
13	12	12	12	13	25	24	25	24	25	62	61	61	62	61	123	123	123	124	123	246	247	246	246	247	369	370	369	371	373
15	15	14	15	15	30	29	29	29	27	74	70	73	74	74	144	147	148	147	147	291	295	295	289	289	439	442	434	434	435

Apêndice F: Dados brutos de registro de número de basculadas em diferentes tempos de análise (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos) para a balança 3.

1 minuto					2 minutos					5 minutos					10 minutos					20 minutos					30 minutos				
4	4	3	4	3	8	7	7	7	7	18	18	18	18	19	36	36	36	36	36	72	72	71	72	72	108	107	108	108	107
6	6	6	7	6	12	13	12	13	12	31	31	31	31	28	62	62	58	61	61	124	119	122	121	122	182	183	183	182	181
8	7	8	8	8	15	16	16	16	16	39	40	38	40	39	79	78	78	79	79	157	157	157	156	155	235	236	233	233	235
9	10	10	10	10	19	20	19	20	20	49	49	48	49	48	98	97	97	96	97	195	193	194	190	187	292	290	284	281	287
13	14	13	13	13	27	26	26	26	26	66	65	65	65	65	131	130	130	129	129	261	259	258	255	256	391	387	383	383	379
16	15	16	15	15	31	31	30	31	31	77	77	78	78	78	154	156	156	156	155	310	312	311	309	310	466	467	463	470	456
18	17	17	18	17	35	35	34	35	34	87	86	86	86	86	173	172	172	172	172	345	344	344	343	345	517	516	515	518	516
19	19	20	19	20	38	39	40	39	39	97	98	98	97	98	195	195	194	192	190	390	386	377	382	383	584	569	574	571	573
21	20	20	21	20	41	41	40	41	42	102	103	102	104	104	205	206	207	208	206	411	415	413	410	410	618	621	615	614	616
25	25	26	25	26	50	51	51	51	50	127	126	127	126	127	253	253	253	253	252	506	506	503	502	504	759	756	754	755	758

Apêndice G: Dados brutos de registro de número de basculadas em diferentes tempos de análise (1, 2, 5, 10, 20 e 30 minutos) para a báscula 4.

1 minuto					2 minutos					5 minutos					10 minutos					20 minutos					30 minutos				
1	1	2	1	1	2	3	2	2	2	6	5	6	5	6	11	11	11	10	10	22	21	21	22	22	33	31	33	32	31
2	3	2	2	3	5	4	5	5	5	12	12	13	12	13	24	25	25	25	24	49	50	49	49	50	74	74	74	74	75
3	4	3	3	4	7	6	7	7	6	17	16	17	16	17	33	33	33	33	33	66	66	66	67	65	99	99	99	99	99
5	4	5	4	4	9	9	9	9	8	22	22	22	22	22	44	44	43	44	43	88	87	87	88	87	131	131	132	130	132
5	4	5	5	4	9	10	9	9	10	23	24	23	23	23	47	46	46	47	46	93	93	92	92	93	139	139	138	139	138
6	6	6	6	6	12	12	12	12	12	30	30	31	30	32	60	61	63	62	62	121	125	122	123	120	184	184	183	182	184
8	7	8	8	7	15	16	15	15	16	38	39	38	38	39	77	76	77	77	77	153	154	155	155	156	230	232	233	234	232
9	9	8	9	9	18	17	17	18	17	44	43	44	43	44	87	87	87	87	86	174	174	173	173	174	261	260	260	261	260
11	10	11	11	10	21	22	21	21	21	53	53	53	53	53	106	106	106	106	106	212	212	212	212	212	318	318	318	317	317
12	12	11	12	12	24	23	23	23	23	59	57	58	58	58	116	116	116	115	116	232	231	231	231	231	348	346	347	346	347