

UM DESIGN ADAPTÁVEL DE BÁSCULAS PARA O MONITORAMENTO CONTÍNUO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOB DIFERENTES COBERTURAS DO SOLO

Dimaghi Schwamback¹ ; Jamil Alexandre Ayach Anache²; Edson Cezar Wendland³

ABSTRACT – Runoff measurement and monitoring is a laborious, time demanding, and financial consuming task. In this context, automatic equipment rises as a potential option to simplify in situ water resources monitoring. Here, we present an innovative design of tipping buckets flow meters of different sizes for the runoff monitoring in experimental plots (hillslope artificially delimited) under four common and contrasting land uses in the Southeast Brazilian region: Tropical woodland – Woodland Cerrado (TB1), sugarcane (TB2), pasture (TB3), and bare soil (TB4). The equipment was designed using the rational method and has the following nominal capacities: 11.63mL (TB1), 64.16mL (TB2), 139.86mL (TB3), and 660.95mL (TB4). Each tipping bucket was tested in laboratory under low and high flow rates (return period over 100 years). Linear regression showed great correlation ($R^2 > 0.99$) and statistical significance ($KGE > 0.85$) between reference and measured flow rates. After the implementation of the calibration curve, the fitting curve was ideal in TB1 (PBIAS = 0), while underestimation still occurred in TB2 (0.079%), TB3 (1.189%), and TB4 (1.397%). Even though the tipping buckets were not dimensioned to operate under high flow rate, the equipment had satisfactory performance (error less than 1.4% after calibration) under those extreme conditions. Finally, the methodology employed in this paper can be easily reproduced for both calibration and construction of a low-cost equipment that facilitates runoff measurement at different land covers.

Palavras-Chave: Monitoramento in situ; uso e cobertura do solo; equipamento de hidrologia; microbacia.

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. Endereço: Avenida dos Trabalhadores São-Carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590; fone: (16) 3373-8270; email: dimaghi@usp.br;

2) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Endereço: R. Ufms, 222-824 - Vila Olinda, Campo Grande - MS, 79050-010; fone: (16) 3373-8270; email: anache.jamil@gmail.com;

3) Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. Endereço: Avenida dos Trabalhadores São-Carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590; fone: (16) 3373-8270; email: ew@sc.usp.br.

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como produtor agrícola e pecuário, e espera-se que em breve seja o principal fornecedor mundial de alimentos (Pohlmann et al., 2020). Em 2018, o país foi o maior produtor e exportador de soja, suco de laranja, açúcar e carne bovina (ABIA, 2018). Esse estágio produtivo foi obtido principalmente devido às atividades agrícolas na parte central do Brasil (bioma Cerrado). Anache et al. (2017) reforçam o fato de que, para alcançar o uso eficiente da água, a conservação dos recursos naturais e a minimização dos impactos antrópicos, uma melhor compreensão dos processos físicos que compõem o ciclo hidrológico sob diferentes condições de *Land Use and Land Cover - LULC* (natural e antrópico) é crucial.

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*. 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.

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 (Langhans et al., 2019) e bacias experimentais (Chow, 1976), quantificação do escoamento subsuperficial (Peyrard et al., 2016) ou quantificação da precipitação interna ou escoamento fustal (Shimizu et al., 2018). Quanto ao uso do solo, foram reportadas aplicações sobre diferentes coberturas, tais como florestas nativas (Sun et al., 2014), pastagem (SUN et al., 2014), plantações agrícolas (Langhans et al., 2019) e superfícies impermeáveis (Nehls et al., 2011).

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). Assim, este trabalho tem como objetivo principal apresentar um projeto inovador, de baixo custo e facilmente adaptável de básculas de diferentes dimensões para monitoramento de escoamento em parcelas experimentais em coberturas do solo comumente encontradas no sudeste do Brasil (Cerrado, cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto).

2 - METODOLOGIA

O equipamento proposto visa o monitoramento do escoamento superficial em parcelas experimentais implementadas em 2011 (Oliveira et al., 2015; Youlton et al., 2016) 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). A área dispõe de parcelas sobre quatro triplicatas de usos do solo: Cerrado *sensu stricto*, cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto. O solo da região é o Neossolo Quartzarênico.

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 pela proposição do uso de básculas por ser uma alternativa simples, duradoura e baixo custo (Bashagakule et al., 2018). Desta forma, foi proposto um design de 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: Cerrado *sensu stricto* (TB1), cana-de-açúcar (TB2), pastagem (TB3) e solo exposto (TB4).

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 1.

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

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

O uso do histograma da área, identificou-se que há uma maior ocorrência de eventos de baixa (menor que 1,8 mm/h) e média (1,8 a 7,8 mm/h) intensidade. Assim foi adotada a intensidade de 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). Por fim, 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 1, 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 e 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.

Para o processo de calibração, foi determinada a capacidade volumétrica (calibração estática) e, posteriormente, realizada a calibração dinâmica por meio de testes sob dez intensidades de vazões distribuídas até que se atingisse um período de retorno superior a 100 anos.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

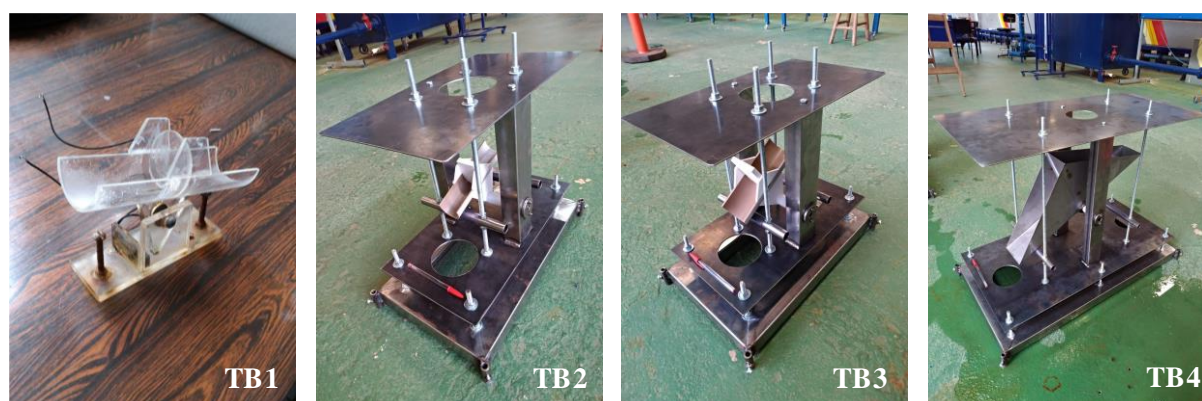
A estrutura do equipamento é composta por duas partes ligadas por barras rosqueáveis. A primeira parte (estrutura fixa) é uma base retangular construída em perfis metálicos, em que nas extremidades estão afixados vergalhões de aço de um metro de comprimento. Os vergalhões serão

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.

Como citado, a escoamento superficial será coletado através de parcelas experimentais. 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.

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 Figura 1 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 1 - Registro fotográfico das balanças 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



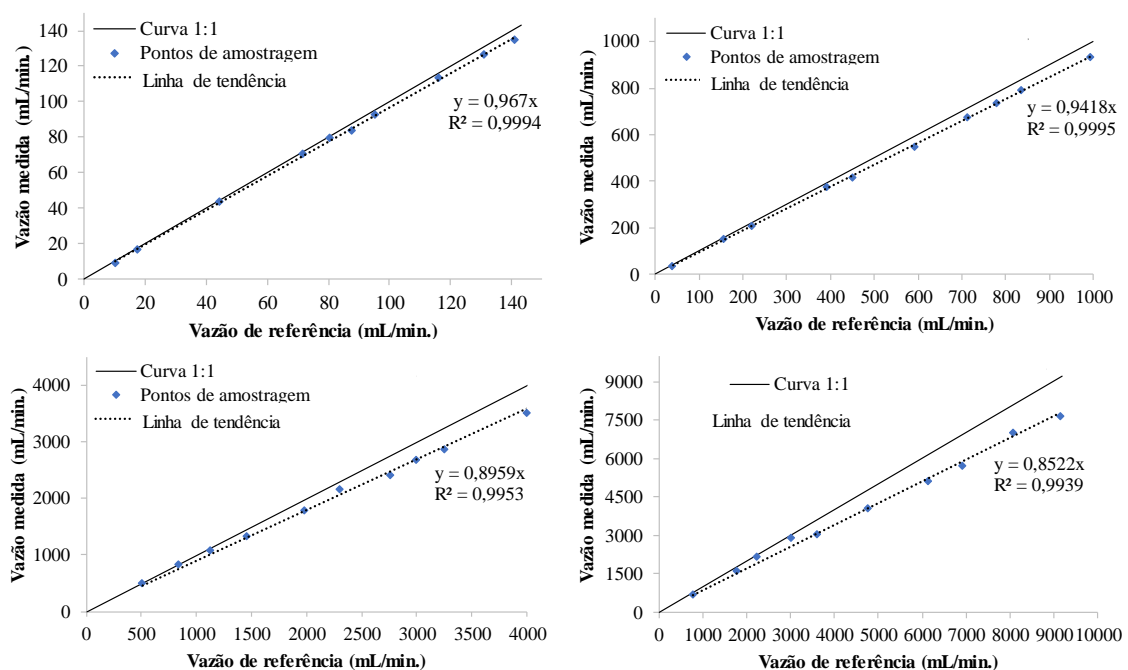
Considerando as dez vazões medidas durante o processo de calibração dinâmica das quatro balanças, foram registrados erros positivos, indicando uma subestimação das vazões de referência. O PBIAS mais alto (13,6%) foi observado no TB4 sob um volume nominal de 660,95 mL, seguido pelo TB3 (9,3%), TB2 (5,7%) e TB1 (3,3%), com volumes nominais de 139,86 mL, 64,16 mL e 11,63 mL, respectivamente. O resultado indica que a subestimação tem uma correlação positiva com o volume nominal de cada cavidade das balanças. Mesmo antes da aplicação das curvas de calibração, o

equipamento de monitoramento proposto pode medir adequadamente o fluxo de água ($KGE > 0,86$). A regressão linear foi facilmente obtida por meio da correlação linear da vazão de referência (entrada) com a vazão monitorada (multiplicação do volume nominal proveniente da calibração estática com o número médio de basculadas registrado nas replicatas).

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. A Figura 2 mostra a distribuição dos pontos amostrados em comparação com a curva 1: 1, bem como a curva de regressão linear e a equação. Como se pode observar, em todas as TBs ocorre uma subestimação do fluxo, visto que os coeficientes m são menores menor do que 1.

Após a implementação das curvas, o ajuste foi ideal na balsa 1 ($PBIAS=0$), enquanto ocorreu uma subestimação nas básculas 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 balsa 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 básculas 1, 2, 3 e 4: 0,967, 0,942, 0,896 e 0,852.

Figura 2 - Curvas de calibração utilização a regressão linear.



4 - CONCLUSÃO

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 (TB1), 64,16mL (TB2), 139,86mL (TB3) e 660,95mL (TB4).

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: TB1 (3,31%), TB2 (5,75%), TB3 (9,33%), TB4 (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%).

5 - REFERÊNCIAS

- ABIA – Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. (2018). “*Annual report – 2018*”. São Paulo.
- ANACHE, J.A.A.; WENDLAND, E.; ROSALEM, L.M.P.; YOULTON, C.; OLIVEIRA, P.T.S. (2019). “*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.
- ANACHE, J.A.A., WENDLAND, E.C., OLIVEIRA, P.T.S., FLANAGAN, D.C., NEARING, M.A. (2017). “*Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience*”. *Catena*, v. 152, p. 29–39.
- BARFIELD, B.J.; HIRSCHI, M.C. (1986). “*Tipping Bucket Flow Measurements on Erosion Plots*”. *Transactions of the ASAE*, v. 29, n. 6, p. 1600–1604.

BASHAGAKULE, J.B.; LOGAH, V.; OPOKU, A.; TUFFOUR, O.; SARKODIE-ADDO, J.; QUANSAH, C.; TUFFOUR, H.O.; SARKODIE-ADDO, J.; QUANSAH, C. (2018). “*New method for runoff estimation under different soil management practices*”. Biorxiv.Org, v. 86, p. 1–23, 2018.

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

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

LANGHANS, C.; DIELS, J.; CLYMANS, W.; VAN DEN PUTTE, A.; GOVERS, G. (2019). “*Scale effects of runoff generation under reduced and conventional tillage*”. Catena 176, 1–13.

NEBOL'SIN, S.I. (1928). “*Elementary Surface Runoff*”. Moscow.

NEHLS, T.; RIM, Y.N.; WESSOLEK, G. (2011). “*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.

OLIVEIRA, P.T.S.; WENDLAND, E.; NEARING, M.A.; SCOTT, R.L.; ROSOLEM, R.; DA ROCHA, H.R. (2015). “*The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado*”. Hydrology and Earth System Sciences, v. 19, p. 2899–2910.

PEYRARD, X.; LIGER, L.; GUILLEMAIN, C.; GOUY, V. (2016). “*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.

POHLMANN, C.R.; SCAVARDA, A.J.; ALVES, M.B.; KORZENOWSKI, A.L. (2020). “*The role of the focal company in sustainable development goals: A Brazilian food poultry supply chain case study*”. Journal of Cleaner Production, v. 245, p. 118798.

SHIMIZU, T.; KOBAYASHI, M.; IIDA, S.; LEVIA, D.F. (2018). “*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.

SUN, T.; CRUSE, R.M.; CHEN, Q.; LI, H.; SONG, C.; ZHANG, X. (2014). “*Design and initial evaluation of a portable in situ runoff and sediment monitoring device*”. Journal of Hydrology, v. 519, p. 1141–1148

Wang, L.; Wei, X.; Bishop, K.; Reeves, A.D.; Ursino, N.; Winkler, R. (2018). “*Vegetation changes and water cycle in a changing environment*”. Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, n. 3, p. 1731–1734.

YOULTON, C.; WENDLAND, E.; ANACHE, J.A.A.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; DABNEY, S. (2016). “*Changes in erosion and runoff due to replacement of pasture land with sugarcane crops*”. Sustainability (Switzerland), v. 8, n. 7, p. 1–12.