UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Jamil Alexandre Ayach Anache

**Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos
do solo e variações climáticas em área de Cerrado**

São Carlos

2017

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

Jamil Alexandre Ayach Anache

**Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos
do solo e variações climáticas em área de Cerrado**

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

Orientador: Prof. Tit. Edson Wendland

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2017

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).

A532a Anache, Jamil Alexandre Ayach
Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo
devido aos diferentes usos do solo e variações
climáticas em área de Cerrado / Jamil Alexandre Ayach
Anache; orientador Edson Cezar Wendland. São Carlos,
2017.

Tese (Doutorado) - 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,
2017.

1. balanço hídrico. 2. erosão do solo. 3. Cerrado
sensu stricto. 4. pastagem. 5. cana-de-açúcar. 6. solo
exposto. 7. projeções climáticas. 8. WEPP. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **JAMIL ALEXANDRE AYACH ANACHE**.

Título da tese: "Alterações do balanço hídrico e dos processos erosivos devido às mudanças no uso do solo e variações climáticas em área de cerrado".

Data da defesa: 23/11/2017.

Comissão Julgadora:

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

Dr. **Silvio Crestana**
(EMBRAPA)

Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendiando**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Masato Kobiyama**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

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

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

APROVADO

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

Prof. Doutor **Eduardo Mario Mendiando**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

Aos meus pais e ao meu irmão.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

AGRADECIMENTOS

Meus profundos e mais sinceros agradecimentos à todas as pessoas e instituições que contribuíram para a conclusão deste trabalho, em especial:

Ao Prof. Edson Wendland, pela orientação e oportunidade de aprender o exercício da pesquisa e docência, com senso crítico, responsabilidade, ética e respeito.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Hidráulica Computacional ([LHC](#)), pela convivência, amizade e trabalho em equipe: Alice, Ana Cláudia, Andres, Camila, Camilo, Davi, David, Derly, Dulce, Gabriel, Guardabaxo, Jaqueline, Jean, Juliana, Murilo, Natália, Tiago e Vinícius; aos colegas de experimento: Livia Rosalem, Aline Zaffani, João Villela, Cristian Youlton e Paulo Oliveira; aos técnicos de laboratório e campo: Roberto Bérghamo e Marcelo Miky; Aos alunos de iniciação científica: Ana Bragion, Mayra Ishizuka e Antônio Zambianco.

Ao Dr. Dennis Flanagan e ao *National Soil Erosion Research Laboratory* (NSERL-ARS-USDA), pela orientação e suporte durante o período no exterior (02/2016-10/2016).

À Escola de Engenharia de São Carlos ([EESC](#)) da Universidade de São Paulo ([USP](#)) e seus funcionários, pelo suporte institucional, logístico e operacional; em especial, aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento ([SHS](#)) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento ([PPG-SHS](#)).

Ao Instituto Arruda Botelho (IAB) e seus colaboradores pelo espaço cedido aos experimentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico ([CNPq](#)) pelas bolsas de estudo (processos CNPq 201109/2015-8 e 142393/2015-0), 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).

Aos meus pais João Jamil Anache e Alexandra Ayach Anache e ao meu irmão Felipe Ayach Anache, por todo suporte familiar. Agradeço os demais familiares, em especial: minhas avós Adibi Issa Ayach e Ermelinda Gonçalves Anache; e meus padrinhos Elizabete Anache e Wilson Ayach.

Muito obrigado!

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

*Quem caminha sozinho pode até
chegar mais rápido, mas aquele
que vai acompanhado, com certeza
vai mais longe.*

Clarice Lispector

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

RESUMO

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. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

A expansão agropecuária governa as mudanças no uso do solo no Brasil devido à alta demanda dos mercados interno e externo por alimento, fibra e energia. Entretanto, os efeitos e os processos decorrentes dessas alterações no ciclo hidrológico e na conservação do solo são pouco estudados de forma experimental em regiões de clima tropical e subtropical. No Estado de São Paulo, o uso do solo acontece de forma intensiva, as áreas de Cerrado nativo estão fragmentadas e pastagens vêm sendo substituídas por plantações de cana-de-açúcar devido à alta demanda por etanol e açúcar. Este trabalho tem como objetivo compreender as relações, trocas, variações e tendências das componentes do balanço hídrico e dos processos erosivos em potenciais mudanças no uso do solo que são encontradas no Sudeste do Brasil: de condições naturais (Cerrado *sensu stricto*) para pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto. Para isso, foram monitorados, nos diferentes usos do solo, as condições meteorológicas, o escoamento superficial, a evapotranspiração, o conteúdo de água no solo, a erosão do solo e a flutuação do nível freático do aquífero. As alterações no uso do solo modificam significativamente o balanço hídrico, com aumento do escoamento superficial (pelo menos 14 mm ano^{-1}) e diminuição da evapotranspiração (pelo menos 529 mm ano^{-1}) quando o Cerrado *sensu stricto* é substituído por pastagem ou cana-de-açúcar. Entretanto, no Cerrado *sensu stricto* o volume de água disponível para percolação ao longo da zona não saturada e potencial recarga do aquífero tende a ser menor que em áreas agrícolas. As observações mostram que o solo exposto e a cana-de-açúcar possuem os maiores valores erosão do solo ($16,00 \pm 5,97 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $0,64 \pm 0,49 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente). Além disso, há semelhanças entre as taxas de perda de solo na pastagem ($0,11 \pm 0,04 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e no Cerrado *sensu stricto* ($0,14 \pm 0,06 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Devido às curtas séries de dados de escoamento superficial e erosão do solo, a adoção de modelos de base física como o WEPP (*Water Erosion Prediction Project*), é alternativa viável para simulações que considerem as variabilidades climáticas de regiões subtropicais. Projeções climáticas revelam que não ocorrerão alterações significativas nas respostas (escoamento superficial e erosão do solo) em relação ao clima base atual apesar do aumento significativo na precipitação nos cenários mais drásticos (entre 5% e 9%). Por fim, a manutenção do ciclo hidrológico e o controle da erosão do solo alcançados pelo Cerrado *sensu stricto* são benefícios que contrastam com a diminuição da recarga potencial do aquífero em áreas de vegetação densa. A cana-de-açúcar e a pastagem são usos do solo concorrentes e seus efeitos nos padrões hidrológicos e na erosão do solo se equilibram.

Palavras-chave: balanço hídrico; erosão do solo; Cerrado *sensu stricto*; pastagem; cana-de-açúcar; solo exposto; projeções climáticas; WEPP.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

ABSTRACT

ANACHE, J. A. A. Water cycle and soil loss variations due to different land uses and climate variability in a Brazilian Cerrado area. Doctor of Science dissertation – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

The agricultural expansion in Brazil drives land use changes due to the higher demand of internal and external markets for food, fiber and fuel. However, the effects and processes that result from these changes on hydrological cycle and soil conservation are not well explored in an experimental approach under tropical and subtropical climates. The land use is intense in the State of São Paulo, where the undisturbed woodlands in the Cerrado biome are fragmented and pasturelands are transformed in sugarcane plantations due to the higher sugar and ethanol demands. This thesis aims to comprehend the relations, trade-offs and variations of the water balance components and soil erosion processes under potential land use changes that can be found in southeastern Brazil: from natural landscapes (wooded Cerrado) to pastureland, sugarcane and bare soil. They were monitored in these different land uses: meteorological conditions, runoff, evapotranspiration, soil moisture content, soil erosion, and water table fluctuation. The land uses changes significantly influence the water balance, increasing the runoff (at least 14 mm yr^{-1}) and decreasing evapotranspiration (at least 529 mm yr^{-1}) when wooded Cerrado is substituted by pasture or sugarcane. Nevertheless, the soil water content available for deep percolation through the unsaturated zone and potential aquifer recharge in the wooded Cerrado tend to be smaller than in agricultural fields. Soil loss observations reveal that bare soil and sugarcane have the highest rates ($16.00 \pm 5.97 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and $0.64 \pm 0.49 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, respectively). Additionally, there are similarities between the soil loss rates of pastureland ($0.11 \pm 0.04 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and wooded Cerrado ($0.14 \pm 0.06 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Due to the short-period observations of runoff and soil erosion, the use of a process-based model such as WEPP (Water Erosion Prediction Project) is a feasible alternative for simulations considering climatic variability under subtropical conditions. Projected climates reveal that in spite of significant increased rainfall (between 5% and 9%) in the most drastic scenarios, there are no significant changes on runoff and soil erosion rates in relation to the actual baseline climate. Finally, the hydrological stability and soil erosion control are benefits reached by the wooded Cerrado that contrast with the decrease in potential aquifer recharge in a dense vegetation area. Sugarcane and pasture are concurrent land uses and their effects on hydrological patterns and soil erosion are equivalent.

Keywords: water balance; soil erosion; wooded Cerrado; pasture; sugarcane; bare soil; projected climates; WEPP.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais componentes do balanço hídrico.....	38
Figura 2 – Distribuição espacial das estações experimentais de monitoramento do escoamento superficial e da erosão dos solos sob chuva natural no Brasil.	47
Figura 3 – Comparação do escoamento superficial (A) e da erosão do solo (B) em diferentes usos do solo.	51
Figura 4 – Distribuição temporal dos números de ano-parcela de estudos sob chuva natural.....	54
Figura 5 – Distribuição temporal dos artigos publicados sobre o tema.	55
Figura 6 – Anos de monitoramento em áreas experimentais (escoamento superficial e erosão do solo sob chuva natural no Brasil).	55
Figura 7 – Área de estudo e distribuição dos Neossolos no Cerrado brasileiro.....	59
Figura 8 – Variáveis medidas nas áreas experimentais, em que: (1) temperatura e umidade relativa; (2) precipitação; (3) umidade do solo; (4) fluxo de radiação solar; (5) direção e velocidade do vento; (6) escoamento superficial; (7) nível freático; (8) precipitação interna; (9) escoamento fustal; (10) saldo de radiação.....	60
Figura 9 – Coletores de precipitação interna (A) e de escoamento fustal (B) instalados no Cerrado <i>sensu stricto</i> operados de forma manual.	62
Figura 10 – Vista superior (A) e lateral (B) do modelo de parcela que foi utilizado para quantificar o balanço hídrico e a erosão do solo em campo, sendo (1) Bordas de chapa metálica; (2) coletor de escoamento superficial; (3) Sistema de tanques e divisores.....	64
Figura 11 – Fluxograma com as etapas metodológicas desenvolvidas na modelagem do escoamento superficial e da erosão dos solos (setas em amarelo são da etapa de calibração e validação, setas em azul representam as etapas de simulação com dados climáticos regionais e setas em vermelho representam as etapas de simulação com dados climáticos futuros).....	69
Figura 12 – Precipitação mensal ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).	77
Figura 13 – Escoamento superficial mensal ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).....	79
Figura 14 – Distância Euclidiana (Método de Ward) do escoamento superficial (ES) entre diferentes usos do solo.	80
Figura 15 – Diferenças relativas entre as repetições das parcelas experimentais para o escoamento superficial medido em cada amostragem (coleta).	81

Figura 16 – Evapotranspiração mensal ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).	82
Figura 17 - Coeficientes de cultura (K_c) e de estresse hídrico (K_s) para pastagem e cana-de-açúcar ao longo do período de monitoramento (2012-2016).	83
Figura 18 – Variação do armazenamento de água mensal no solo ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).	84
Figura 19 – Comparação entre o conteúdo médio mensal de água no solo medido através de sondas FDR (S) e a variação média mensal do armazenamento de água no solo (dS) (residual do balanço hídrico) para Cerrado <i>sensu stricto</i> (A) (sondas FDR instaladas até 1,5 m), cana-de-açúcar (B) (sondas FDR instaladas até 1,0 m) e pastagem (C) (sondas FDR instaladas até 1,0 m) entre 2012 e 2016.	86
Figura 20 – Balanço hídrico anual para o período de 2012 a 2016 na área de estudo..	88
Figura 21 - Balanço hídrico acumulado para Cerrado <i>sensu stricto</i> (A), pastagem (B), cana-de-açúcar (C) e solo exposto (D) no período de 2012 a 2016.	89
Figura 22 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em Cerrado <i>sensu stricto</i> ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; ET – evapotranspiração; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.	90
Figura 23 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em pastagem ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; ET – evapotranspiração; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.	90
Figura 24 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em cana-de-açúcar ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; ET – evapotranspiração; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.	91
Figura 25 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em solo exposto ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; EV – evaporação; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.	91
Figura 26 – Residual do balanço hídrico no Cerrado <i>sensu stricto</i> (A) e na pastagem (B), em que as áreas em azul representam o excedente hídrico (dS); as áreas em vermelho representam déficit hídrico; linha sólida preta representa o nível freático do aquífero.	92
Figura 27 – Erosão do solo mensal ao longo do período de monitoramento (2012-2016).	93
Figura 28 – Diferenças relativas entre as repetições das parcelas experimentais para a erosão do solo medidas em cada amostragem (coleta).	95

Figura 29 – Relação entre o escoamento superficial e a erosão do solo observados em parcelas experimentais entre 2012 e 2016.	96
Figura 30 – Distância Euclidiana (Método de Ward) da erosão do solo (ER) entre diferentes usos do solo.	97
Figura 31 - Comparação entre os dados observados e estimados pelo WEPP para o escoamento superficial (A) e erosão do solo (B) nos períodos de calibração e validação do modelo (2012-2016).	101
Figura 32 – Resultados das simulações do escoamento superficial (A) e da erosão do solo (B) para diferentes usos do solo no clima atual.	102
Figura 33 – Variabilidade da precipitação considerando diferentes cenários de mudanças climáticas (RCPs 2.5, 4.5, 6.0 e 8.5 projetadas para o presente, 2030, 2060 e 2090).	104
Figura 34 – Escoamento superficial considerando diferentes cenários de mudanças climáticas (RCPs 2.5, 4.5, 6.0 e 8.5 projetadas para o presente, 2030, 2060 e 2090) em quatro diferentes usos do solo.	107
Figura 35 – Erosão do solo considerando diferentes cenários de mudanças climáticas (RCPs 2.5, 4.5, 6.0 e 8.5 projetadas para o presente, 2030, 2060 e 2090) em quatro diferentes usos do solo.	108
Figura 36 – Médias anuais observadas (2012-2016) em escala experimental (local) dos ganhos e perdas na evapotranspiração (ET), no escoamento superficial (ES), no armazenamento de água no solo (dS) e na erosão do solo (ER) devido às potenciais alterações no uso do solo que ocorrem no Cerrado do Sudeste do Brasil.	111

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos métodos para observação e estimativa da evapotranspiração.	40
Tabela 2 – Evapotranspiração e precipitação de estudos desenvolvidos no Brasil usos do solo similares ao do presente estudo.	42
Tabela 3 – Resumo dos tipos de modelos de erosão do solo.	44
Tabela 4 – Estudos experimentais em parcelas sob chuva natural no Brasil para o monitoramento do escoamento superficial e da erosão do solo.	45
Tabela 5 – Estatísticas da duração dos períodos monitorados em parcelas experimentais por região do Brasil.	48
Tabela 6 – Valores médios anuais de escoamento superficial e perda de solo compilados de estudos em parcelas experimentais.	49
Tabela 7 – Razão média de perda de solo para diferentes usos do solo no Brasil.	52
Tabela 8 – Valores médios de escoamento superficial e erosão do solo compilados de estudos em parcelas experimentais categorizados por diferentes culturas e usos do solo (valores ordenados pela média de perda de solo).	53
Tabela 9 – Instrumentação nas áreas de monitoramento.	61
Tabela 10 – Variáveis necessárias para o cálculo do balanço hídrico no solo e ET. ...	66
Tabela 11 – Coeficientes de Priestley e Taylor do Cerrado <i>sensu stricto</i> calculados a partir das observações de Cabral <i>et al.</i> (2015) para as quatro efemérides (estações) do ano. .	66
Tabela 12 – Granulometria e propriedades do solo a 14, 30, 60 e 90 cm de profundidade na área de estudo (área 1).	71
Tabela 13 – Média e desvio padrão anuais das componentes do balanço hídrico para o período de 2012 a 2016 na área de estudo.	87
Tabela 14 – Precipitação e número de eventos que causaram escoamento superficial e erosão do solo nas parcelas experimentais nos anos monitorados.	94
Tabela 15 – Parâmetros do WEPP calibrados para as condições da área de estudo.	98
Tabela 16 – Observações em campo e estimativas do WEPP para escoamento superficial e erosão do solo durante o período de calibração e validação do modelo (2012-2016).	99
Tabela 17 – Avaliação do desempenho do WEPP para as estimativas de escoamento superficial e erosão do solo.	100
Tabela 18 – Médias observadas (2012-2016), simuladas (utilizando 5 anos de dados meteorológicos) e preditas (utilizando 100 anos de dados climáticos gerados de forma estocástica com o CLIGEN a partir de dados históricos observados).	103

Tabela 19 – Médias de precipitação, escoamento superficial e erosão do solo simulados pelo WEPP utilizando o clima base que representa o presente	104
Tabela 20 – Potenciais alterações (Δ) na precipitação, escoamento superficial e erosão do solo para 2030, 2060 e 2090 baseados nos dados climáticos de múltiplos GCMs e RCPs em relação às previsões para o clima base (presente).	105
Tabela 21 – Efeitos anuais no balanço hídrico, com os ganhos (armazenamento de água no solo) e perdas (evapotranspiração e escoamento superficial), e na erosão do solo, quando ocorre a substituição do Cerrado <i>sensu stricto</i> por solo exposto, pastagem e cana-de-açúcar.	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
AR5-IPCC	5º relatório anual do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas
ARS	<i>Agricultural Research Service</i>
CLIGEN	<i>Climate Generator</i>
CO	Centro-oeste
CTC	Capacidade de troca catiônica
DAP	Diâmetro do tronco na altura do peito
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
GCM	<i>General Circulation Models</i>
IAB	Instituto Arruda Botelho
M	Média
N	Norte
NE	Nordeste
NSERL	<i>National Soil Erosion Research Laboratory</i>
PEST	<i>Parameter Estimation Tool</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RIST	<i>Rainfall Intensity Summarization Tool</i>
S	Sul
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SCE	<i>Shuffled Complex Evolution</i>
SD	Desvio padrão
SE	Sudeste
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
USP	Universidade de São Paulo
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>
WTF	<i>Water Table Fluctuation</i>

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Declividade da curva de pressão de vapor
CR_i	Ascensão capilar da zona saturada para zona de raízes no dia i
DF	Diferenças relativas
D_r	Depleção na zona de raízes
$D_{r,i}$	Depleção na zona de raízes no dia i
$D_{r,i-1}$	Conteúdo de água na zona de raízes no dia anterior
dS/dt	Variação do armazenamento de água no solo
e_a	Pressão atual de vapor
ER	Erosão do solo
ES	Escoamento superficial
e_s	Pressão de saturação de vapor
ES_i	Escoamento superficial do dia i
ET	Evapotranspiração
ET_c	Evapotranspiração de cultura
$ET_{c,i}$	Evapotranspiração da cultura no dia i
ET_o	Evapotranspiração de referência
EV	Evaporação
FC	Fator clima
FH	Fator humano
FS	Fator solo
FT	Fator topográfico
FU	Fator uso do solo
G	Fluxo de calor no solo
I_i	Irrigação no dia i
K_c	Coeficiente de cultura
K_s	Coeficiente de estresse hídrico
L	Litro
NSE	Eficiência de Nash-Sutcliffe
$^{\circ}C$	Graus Celsius
p	Fração de água extraível do solo

PBIAS	Porcentagem de viés
PE	Percolação
PE_i	Percolação no dia i
PP	Precipitação
R^2	Coeficiente de determinação
RMSE	Erro quadrático médio
R_n	Saldo de radiação
RR	Recarga do aquífero
RSR	Desvio padrão do erro quadrático médio
S	Água armazenada no solo
S_y	Rendimento específico do aquífero
TAW	Água total disponível no solo na zona de raízes
T_{med}	Temperatura média diária
U_2	Velocidade média do vento medida a 2 m de altura do solo
Z	Profundidade
Z_f	Profundidade da zona de raízes.
α	Coeficiente de Priestley e Taylor
γ	Coeficiente psicométrico
ΔH	Variação do nível freático
ΔT	Intervalo de tempo
θ	Umidade volumétrica do solo
θ_{fc}	Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo
θ_i	Umidade volumétrica do solo no instante i
θ_{wp}	Umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente
λ	Calor latente de vaporização

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	30
1. INTRODUÇÃO.....	31
1.1. Hipóteses	33
1.2. Objetivos	33
1.3. Estrutura da tese	33
CAPÍTULO II.....	34
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1. O uso do solo no Brasil	35
2.1.1. O Bioma Cerrado.....	35
2.1.2. Potenciais alterações.....	36
2.1.2.1. Pastagem.....	37
2.1.2.2. Cana-de-açúcar	37
2.1.3. Possíveis impactos.....	37
2.2. O ciclo hidrológico e o balanço hídrico	38
2.2.1. Precipitação	39
2.2.2. Escoamento superficial.....	39
2.2.3. Evapotranspiração	40
2.2.4. Armazenamento de água no solo e recarga do aquífero	42
2.3. Erosão do solo	43
2.3.1. Estudos em erosão hídrica	43
2.3.2. Modelagem de processos erosivos	43
2.4. Experimentos em escala de parcela para o monitoramento do escoamento superficial e da erosão do solo no Brasil.....	45
2.4.1. Distribuição espacial dos estudos	47
2.4.2. Escoamento superficial e erosão do solo	49
2.4.3. Desafios e perspectivas.....	54
CAPÍTULO III.....	58

3. MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1. Área de estudo	59
3.2. Instalação experimental	60
3.2.1. Tratamentos das parcelas experimentais	61
3.2.2. Instrumentação	61
3.3. Balanço hídrico e suas componentes	63
3.3.1. Precipitação	63
3.3.2. Escoamento superficial	63
3.3.3. Evapotranspiração	64
3.3.4. Residual do balanço hídrico (água no solo)	67
3.4. Flutuação no nível freático do aquífero	67
3.5. Erosão do solo.....	68
3.6. Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo	68
3.6.1. Calibração e validação	70
3.6.2. Simulação com séries sintéticas	72
3.6.2.1. Simulação com dados climáticos históricos.....	72
3.6.2.2. Simulação com climas futuros	73
3.7. Análise dos dados	74
3.7.1. Dados experimentais	74
3.7.2. Dados simulados	75
CAPÍTULO IV	76
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1. Componentes do balanço hídrico.....	77
4.1.1. Precipitação.....	77
4.1.2. Escoamento superficial	78
4.1.3. Evapotranspiração	81
4.1.4. Variação do armazenamento de água no solo	84

4.2. Balanço hídrico.....	87
4.3. Flutuação do nível freático do aquífero.....	92
4.4. Erosão do solo	92
4.5. Considerações sobre os erros e incertezas nas medições e estimativas das componentes do balanço hídrico e da erosão do solo	97
4.6. Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo	98
4.6.1. Calibração e validação.....	98
4.6.2. Simulação com séries sintéticas	101
4.6.2.1. Simulação com dados climáticos históricos	101
4.6.2.2. Simulação com climas futuros.....	103
4.7. Ganhos e perdas nos processos hidrológicos e nos processos erosivos devido às mudanças no uso do solo	109
CAPÍTULO V	114
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
5.1. Conclusões.....	115
5.2. Recomendações	117
REFERÊNCIAS	118
APÊNDICES.....	138
Apêndice A – Levantamento fotográfico da área experimental.....	138
Apêndice B – Dados de precipitação, escoamento superficial e erosão do solo em parcelas experimentais em Itirapina, SP	141
Apêndice C – Dados mensais do balanço hídrico das parcelas experimentais em Itirapina, SP.....	154
Apêndice D – Serviços realizados nas parcelas de cana-de-açúcar e solo exposto	156
ANEXO	157
Anexo A – Equações governantes do modelo WEPP (escoamento superficial e erosão do solo).....	157

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

CAPÍTULO I

Introdução, hipóteses e objetivos

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grandes áreas destinadas à pecuária extensiva, baseada em pastagens compostas por plantas forrageiras, e áreas de cultivo como soja e cana-de-açúcar, ocupando principalmente áreas de Cerrado nativo que diminuíram consideravelmente nos últimos 50 anos (Marris, 2005). Estima-se que 42% das áreas originais do bioma Cerrado são ocupadas por pastagens, 11% pela agricultura, 2% por outros usos do solo e aproximadamente 45% pela cobertura original (Klink e Machado, 2005; Stevens *et al.*, 2017). A substituição do Cerrado nativo por pastagens e, posteriormente, por cana-de-açúcar, pode ser considerada uma potencial mudança de uso do solo (Alkimim *et al.*, 2015). Entretanto, poucos são os estudos sobre os efeitos dessa dinâmica de alteração no uso do solo (Bonan, 2008; Loarie *et al.*, 2011; Grecchi *et al.*, 2014).

No Estado de São Paulo, os níveis mínimos de preservação das áreas inseridas no Bioma Cerrado não são atingidos em grande parte do território (Soares-Filho *et al.*, 2014). Essas áreas de Cerrado nativo são fontes primárias para a expansão de áreas agrícolas nos trópicos (Gibbs *et al.*, 2010; Lapola *et al.*, 2013), podendo ocasionar alterações significativas em processos hidrológicos e na conservação do solo (Loarie *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015; Nobrega *et al.*, 2017). Esses processos em zonas tropicais e subtropicais são diferentes de outras regiões do globo, pois possuem maior disponibilidade de energia solar e estão mais suscetíveis a mudanças no meio, que incluem a influência antrópica. Nesse sentido, os processos hidrológicos em diferentes escalas são pouco conhecidos nas zonas tropicais e subtropicais, despertando necessidades como: estudos básicos em campo, a aquisição e disponibilização de dados obtidos a longo prazo; e o desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos (Wohl *et al.*, 2012; Burt e McDonnell, 2015).

A literatura mostra que florestas nativas ajudam a manter o ciclo hidrológico (Krishnaswamy *et al.*, 2013; Ghimire *et al.*, 2014). A evapotranspiração surge como um componente chave no controle da recarga do aquífero em áreas que fazem parte do Sistema Aquífero Guarani (SAG) (Wendland *et al.*, 2007; Lucas e Wendland, 2015). Logo, o balanço hídrico deve ser bem compreendido para entender as respostas dos diferentes usos do solo, permitindo a avaliação dos ganhos e perdas que acontecem no ciclo hidrológico e na conservação do solo quando mudanças são realizadas (Krishnaswamy *et al.*, 2013; Frank *et al.*, 2014; Ghimire *et al.*, 2014) devido às pressões econômicas e ambientais (Barretto *et al.*, 2013).

Estudos experimentais em processos hidrológicos e erosivos são cruciais para melhorar a eficiência da produção agrícola enquanto se promove o desenvolvimento sustentável. Portanto, é importante a execução desses estudos experimentais para fornecer novas

perspectivas e soluções para diminuir a erosão do solo e promover o equilíbrio do ciclo hidrológico frente às constantes alterações no uso do solo (Dotterweich, 2013; Nobrega *et al.*, 2017). Pesquisas desse tipo podem ser realizadas utilizando parcelas experimentais que consistem em uma vertente topográfica delimitada por chapas metálicas que formam um volume de controle, onde o escoamento superficial e o solo erodido são constantemente coletados em uma única saída, sendo também possível determinar a evapotranspiração e o conteúdo de água no solo (Toy *et al.*, 2002; Morgan, 2009; Sadeghi *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2015; Mwango *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2016; Strohmeier *et al.*, 2016; Youlton *et al.*, 2016b; Zhao *et al.*, 2017).

Além das alterações no uso do solo, a variabilidade climática pode afetar áreas agrícolas, e, conseqüentemente, o ciclo hidrológico e os processos erosivos (Lapola *et al.*, 2013; Li e Fang, 2016). Dessa forma, as pesquisas experimentais considerando vertentes com diferentes usos do solo também são necessárias para melhor entender o que acontece com a dinâmica da água e a erosão do solo perante o caráter estocástico do clima (Kim *et al.*, 2016). Assim, existe a necessidade de estudos experimentais de longo período e, na falta deles, a modelagem pode ser alternativa para previsões, tomadas de decisão e avaliação da sustentabilidade ambiental. Porém, muitos modelos de erosão do solo não incluem o escoamento superficial como fator e modelos empíricos, como a USLE (*Universal Soil Loss Equation*) (Wischmeier e Smith, 1978), não podem ser aplicados irrestritamente no Brasil. Esses problemas podem ocorrer pois os parâmetros de entrada de modelos empíricos são baseados em observações de longo período nos Estados Unidos, nas suas condições ambientais, onde esses modelos apresentam desempenho satisfatório (Oliveira *et al.*, 2016; Kinnell, 2017).

Modelos de base física, como o WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (Nearing *et al.*, 1989; Flanagan *et al.*, 2007) podem ser aplicados em diferentes condições para a estimativa de escoamento superficial e erosão do solo. O WEPP foi lançado publicamente em 1995 pelo USDA-ARS (*United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*) como uma nova geração tecnológica para predição de processos erosivos para ser utilizada como ferramenta de planejamento e gestão na conservação do solo e da água (Flanagan *et al.*, 2001). O WEPP considera os mecanismos de infiltração de água no solo, escoamento superficial, crescimento de plantas, decomposição de resíduos, condições do solo e mecanismos de erosão do solo. O WEPP demonstrou ser eficiente em suas simulações e na capacidade de estimar as distribuições espacial e temporal do escoamento superficial e da erosão em escala de vertentes ou pequenas bacias hidrográficas (Tiwari *et al.*, 2000; Pandey *et al.*, 2016).

1.1. Hipóteses

Essa breve análise do estado da arte permite formular as hipóteses primárias que justificam o desenvolvimento desta tese: (i) a substituição de áreas de Cerrado *sensu stricto* por pastagens, cana-de-açúcar, ou solo exposto pode provocar alterações significativas no ciclo hidrológico, e um aumento nas taxas de perda de solo; (ii) os processos hidrológicos como o escoamento superficial e a erosão do solo são pouco observados sob chuva natural no Brasil; (iii) a longo prazo, acontece um aumento da variabilidade das componentes do balanço hídrico e das taxas de perda de solo; (iv) o impacto das mudanças climáticas no escoamento superficial e na erosão do solo pode ser estimado com o uso de modelos matemáticos.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo compreender as relações, trocas, variações e tendências das componentes do balanço hídrico e dos processos erosivos em potenciais mudanças no uso do solo que são encontradas no Sudeste do Brasil: de condições naturais (Cerrado *sensu stricto*) para pastagem (*Brachiaria decumbens*), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e solo exposto. Para isso, foram traçadas as seguintes metas específicas:

- (i) Melhor entender as taxas de escoamento superficial e erosão do solo obtidas em parcelas experimentais na extensão do território Brasileiro;
- (ii) Avaliar as componentes do balanço hídrico e a erosão do solo em diferentes usos do solo (Cerrado *sensu stricto*, cana-de-açúcar, pastagem e solo exposto);
- (iii) Identificar os ganhos e perdas (*trade-offs*) das componentes do balanço hídrico e da erosão do solo no contexto de potenciais alterações no uso do solo;
- (iv) Prever variações a longo prazo no escoamento superficial e na erosão do solo em diferentes usos do solo e condições climáticas a partir de modelagem computacional.

1.3. Estrutura da tese

O Capítulo II abrange a revisão bibliográfica do tema abordado por esta tese e a meta específica (i), uma meta-análise dos desafios e perspectivas da pesquisa experimental em escoamento superficial e erosão do solo em condições não controladas no Brasil; os Capítulos III e IV incluem as metas específicas (ii), (iii) e (iv), que englobam os estudos experimentais e computacionais desenvolvidos para verificar as consequências das mudanças no uso do solo no balanço hídrico e nos processos erosivos. Por fim, o Capítulo V reúne a conclusão e as recomendações para a comunidade científica.

CAPÍTULO II

Revisão bibliográfica

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O uso do solo no Brasil

Pastagens e cultivos agrícolas compreendem aproximadamente 32% (275 milhões de hectares) da área total do Brasil (851 milhões de hectares). Atualmente, aproximadamente 59% (497 milhões de hectares) do país é coberto por vegetação nativa (Fao, 2016). O Brasil é reconhecido mundialmente como produtor de alimentos para seu uso doméstico e para exportação e, recentemente, estabeleceu um programa nacional de biocombustível para diversificar a matriz energética do país (Merten e Minella, 2013). Por esse motivo, existem muitos indícios de que a expansão da fronteira agrícola do país continuará a aumentar, principalmente em regiões de Cerrado nativo (Loarie *et al.*, 2011; Lapola *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2015). Contudo, o Brasil está em terceiro lugar no mundo na adoção de práticas conservacionistas na agricultura (mais de 25 milhões de hectares), que compreendem (i) mínima perturbação do solo (plantio direto e semeadura direta); (ii) cobertura morta; (iii) rotação e associação de culturas; e (iv) integração lavoura-pecuária-floresta (Balbino *et al.*, 2011; Friedrich *et al.*, 2012).

2.1.1. O Bioma Cerrado

Áreas de Cerrado nativo são fontes primárias para a expansão de áreas agrícolas nos trópicos (Gibbs *et al.*, 2010; Lapola *et al.*, 2013) e isso pode ocasionar alterações significativas em processos hidrológicos (Loarie *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015; Nobrega *et al.*, 2017). Entretanto, a quantificação das variáveis do balanço hídrico, particularmente da evapotranspiração em áreas de Cerrado, permanece como objeto de discussão na comunidade científica ao longo dos anos (Oliveira *et al.*, 2005; Garcia-Montiel *et al.*, 2008; Giambelluca *et al.*, 2009; Cabral *et al.*, 2015).

As savanas tropicais, como o Cerrado brasileiro, são áreas prioritárias para manutenção da biodiversidade (Myers *et al.*, 2000). O bioma está dividido em formações campestres, ecotonais e florestais: campo limpo, campo sujo, campo Cerrado, Cerrado *sensu stricto* e Cerrado denso. Essas formações savânicas cobriam uma área aproximada de 2 milhões de km² (23% do território brasileiro) (Coutinho, 1978). O Cerrado *sensu stricto*, por exemplo, possui árvores de 2 a 8 metros de altura, podendo chegar a 12 metros em alguns casos (Alberton *et al.*, 2014). A vegetação do Cerrado possui tolerância a incêndios e as condições de clima e solo favorecem a alta diversidade da sua flora (Brannstrom *et al.*, 2008).

As fitofisionomias do Cerrado brasileiro servem como importante regulador de troca de energia e massa com a atmosfera, porém os efeitos das interações entre os diferentes componentes da vegetação heterogênea (gramíneas, plantas de sub-bosque e grandes árvores com raízes profundas) e os fluxos de água do Cerrado não são bem compreendidos (Giambelluca *et al.*, 2009). O papel desse bioma no balanço hídrico e sua função na manutenção das reservas hídricas subterrâneas devem ser investigados, uma vez que, pouca atenção foi dada ao bioma face ao grande número de estudos envolvendo o mesmo tema (Scholes e Archer, 1997). Embora as diferentes densidades da cobertura vegetal encontradas no Cerrado brasileiro podem influenciar na recarga dos aquíferos, em vegetações mais densas como a do Cerrado *sensu stricto*, a recarga pode ser menor pela elevada transpiração das plantas e pelo aumento da espessura da zona não saturada (Oliveira *et al.*, 2017). Portanto, apesar de toda transformação antrópica envolvendo as alterações no uso do solo do bioma Cerrado, é necessário estudar seus fragmentos preservados para poder avaliar o impacto destas transformações na disponibilidade hídrica regional.

Christoffersen *et al.* (2014) discutem que o Cerrado não é sensível à disponibilidade de energia no sistema para o controle da evapotranspiração, e que o maior fluxo capilar de águas subterrâneas ocorre durante a estação seca e que pouco se sabe sobre a relação entre a evapotranspiração e a água armazenada no solo durante as diferentes estações. As componentes do balanço hídrico no Cerrado brasileiro possuem tendências que podem variar de acordo com a escala do estudo desenvolvido. Sendo assim, os estudos de balanço hídrico em escala local podem ter resultados diferentes de pesquisas em escala regional ou global, evidenciando a necessidade de trabalhos em ambas escalas (Oliveira *et al.*, 2014).

2.1.2. Potenciais alterações

De acordo com Barretto *et al.* (2013), as alterações no uso do solo são reguladas pela economia, no sentido de que opções mais rentáveis podem substituir as ocupações atuais. Em áreas agrícolas consolidadas, como é o caso de grande parte do território do Estado de São Paulo, o padrão mais observado nas alterações no uso do solo é a intensificação de pastagens e cultivos agrícolas, seja pela substituição de pastagens por culturas, ou pela contração dessas áreas para otimização do uso do espaço através de alternativas tecnológicas. Já na fronteira agrícola do Brasil, pela abundância de espaço, a expansão das áreas agrícolas no Cerrado e na Amazônia necessita de técnicas para tornar as atividades viáveis (correção do solo, adoção do plantio direto, fertilização do solo, rotação de culturas e adoção de espécies exóticas e geneticamente modificadas). A retração de áreas agrícolas no Brasil ocorre em locais que

carecem de infraestrutura de escoamento da produção ou com solos de baixa qualidade e disponibilidade, como acontece na região semiárida do Nordeste brasileiro.

2.1.2.1. Pastagem

As áreas de pastagem ocupam cerca de 17% do território brasileiro, que corresponde a quase 1,5 milhões de km². No Cerrado, praticamente 36% dos 2 milhões de km² foram transformados em pastagens, sendo a maior taxa de ocupação em relação aos outros biomas brasileiros (Bustamante *et al.*, 2012). Nos últimos anos a eficiência na produção animal nas pastagens aumentou (e.g. no Estado de São Paulo a densidade de animais em pastoreio subiu de 1 para 1,85 indivíduos por hectare entre 1975 e 2006), diminuindo a área requerida para essa atividade e compensando com a substituição dessas áreas por cana-de-açúcar, que em aproximadamente 70% das áreas recentemente ocupadas a cobertura anterior era de pastagem (Adami *et al.*, 2012).

2.1.2.2. Cana-de-açúcar

O Brasil pretende aumentar a produção agrícola para atender as demandas futuras, especialmente para a cana-de-açúcar, que é insumo para fabricação de biocombustíveis (Alkimim *et al.*, 2015). O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, suprimindo as altas demandas pelo etanol, alternativa energética amplamente utilizada no país, concentrando a sua produção principalmente no Estado de São Paulo. A referida cultura é semi-perene, atingindo o ápice de seu crescimento no mês de abril, seguida pela época de colheita que se estende até o mês de dezembro (Rudorff *et al.*, 2010). O Estado de São Paulo possui essa posição de destaque pois atende os requisitos para a produção de cana-de-açúcar, possuindo áreas compatíveis com a mecanização agrícola, diferentes modais de transporte para escoamento da produção e acesso à mão de obra qualificada para o manejo das áreas de cultivo. Aproximadamente 60% da área plantada de cana-de-açúcar no Brasil é não irrigada (Marin *et al.*, 2012) e na última safra (2016-2017) essa área foi estimada em 90 mil km² (<http://www.brasil.gov.br>).

2.1.3. Possíveis impactos

Estima-se que até 15% da superfície terrestre pode ser convertido para cultivos agrícolas sem que o ambiente sofra alterações irreversíveis que coloquem em risco a humanidade (Rockstrom *et al.*, 2009). No Brasil, a intensificação da agricultura, a partir da conversão de

áreas de pastagem em cana-de-açúcar pode ajudar a diminuir o desmatamento na fronteira agrícola (Cerrado e Amazônia) e diminuir a emissão de gases do efeito estufa, desvinculando a produção agrícola do desmatamento (Lapola *et al.*, 2013; Alkimim *et al.*, 2015). Porém, há indícios de que podem ocorrer alterações climáticas, hidrológicas e na conservação do solo devido às alterações no uso do solo no Cerrado brasileiro e em outros biomas (Bonan, 2008; Loarie *et al.*, 2011; Grecchi *et al.*, 2014). Assim, é importante entender, de forma multidisciplinar, o que acontece no ambiente quando ocorrem alterações no uso do solo.

2.2. O ciclo hidrológico e o balanço hídrico

O balanço hídrico é baseado na lei da conservação da massa que é aplicada para os fluxos de água que ocorrem em determinados intervalo de tempo e volume em diferentes escalas, como continentes, bacias hidrográficas e parcelas experimentais. O balanço hídrico (Figura 1) considera os principais processos hidrológicos como entradas e saídas de um balanço volumétrico, sendo a precipitação (PP) a principal entrada, a evapotranspiração (ET), o escoamento superficial (ES), o escoamento subsuperficial e percolação (PE), as principais saídas, afetando o armazenamento ao longo do tempo (dS/dt).

Figura 1 – Principais componentes do balanço hídrico.

Fonte: Adaptado de Good *et al.* (2015).

Os fluxos de água no ambiente podem ser observados e modelados em diversas escalas de espaço-tempo: local ou regional (Wendland *et al.*, 2007; Giambelluca *et al.*, 2009; Cabral *et al.*, 2010b; Cabral *et al.*, 2012; Cabral *et al.*, 2015; Lucas e Wendland, 2015; Oliveira *et al.*,

2015; Nobrega *et al.*, 2017); e em macro escala (Gatti *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2014; Getirana, 2015; Melo *et al.*, 2016).

2.2.1. Precipitação

Precipitação pode ser considerada como todas as formas em que a água atinge a superfície a partir da atmosfera, sendo a única entrada natural do ciclo hidrológico em sua fase superficial. Desse modo, para correta avaliação, modelagem e previsões envolvendo processos hidrológicos, é necessário saber corretamente as quantidade, distribuição espacial, intensidade e duração da precipitação (Dingman, 2014). O nível de incerteza das medições da precipitação influencia diretamente no resultado do balanço hídrico superficial (Fekete *et al.*, 2004). Sabendo-se que a precipitação governa as outras componentes do balanço hídrico, cerca de 70% da precipitação na região da área de estudo localizada no Sudeste do Brasil depende da evapotranspiração que ocorre na região amazônica (Van Der Ent *et al.*, 2010).

Há várias maneiras possíveis para medição da precipitação: pluviômetros manuais, que armazenam o volume de água precipitada e em um determinado intervalo de tempo pré-estabelecido, um observador deve medir a quantidade de água captada pelo equipamento e registrar o valor; pluviômetros automáticos convencionais, como os de pesagem, de báscula ou de boia, todos ligados a algum sistema de coleta de dados; e, por fim, os pluviômetros não convencionais: óptico, capacitor, acústicos e disdrômetro.

A chuva também pode ser estimada por radares meteorológicos e sensoriamento remoto, a exemplo dos produtos como o TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) (Huffman *et al.*, 2010), que disponibilizam, em tempo real e em série histórica com intervalo de três horas, a distribuição da precipitação na superfície terrestre medida através de sensores micro-ondas embarcados em múltiplos satélites que orbitam a Terra. Esse tipo de produto possui incertezas, porém, pode ser utilizado em casos em que haja indisponibilidade de dados (Lucas *et al.*, 2015).

2.2.2. Escoamento superficial

O escoamento superficial é gerado por processos hidrológicos de escoamento que ocorrem na superfície e na camada superficial do solo, dentre os quais podem-se citar os principais: o escoamento superficial Hortoniano, que ocorre quando a chuva supera a capacidade de infiltração do solo e escoa, e o escoamento superficial de saturação, que ocorre após a saturação das camadas subsuperficiais solo (da mesma chuva ou de eventos anteriores) (Ponce e Hawkins, 1996).

O escoamento superficial pode ser medido diretamente em dois tipos de parcela experimental: em parcelas entressulcos, em que o desenvolvimento de sulcos é limitado devido ao tamanho da parcela; e em parcelas maiores, que englobam processos nos sulcos e entressulcos, dependendo das condições do solo e sua cobertura (Smets *et al.*, 2008). O material que escoar pelas parcelas experimentais é coletado em calhas que direcionam o fluxo para recipientes que armazenam o volume escoado, que posteriormente é medido e amostrado para a quantificação do escoamento superficial (Adekalu *et al.*, 2007; Oliveira *et al.*, 2015; Youlton *et al.*, 2016b).

2.2.3. Evapotranspiração

Estima-se que aproximadamente 63% do volume precipitado nos continentes retornam para a atmosfera em forma de vapor d'água (Trenberth *et al.*, 2011). No ciclo hidrológico, existem três principais pontos de partida para o retorno da água para atmosfera em forma de vapor: superfícies livres (solo exposto e água) e superfícies vegetadas (Penman, 1948). Em superfície coberta por algum tipo de vegetação, ocorrem dois processos ao mesmo tempo: a evaporação da água contida no solo e interceptada pela vegetação e a transpiração pelas plantas; a combinação das duas é denominada evapotranspiração, sendo considerada o inverso da precipitação (Thornthwaite, 1948).

Existem diversas abordagens disponíveis para a obtenção da evapotranspiração que podem fornecer resultados em diversas escalas de espaço e tempo. Assim, dependendo do instrumental disponível e do objetivo do estudo, escolhe-se o método mais adequado, resumidos pela

Tabela 1. Os métodos podem ser empíricos, aerodinâmicos, baseados no balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões.

Tabela 1 – Resumo dos métodos para observação e estimativa da evapotranspiração.

Tipo	Método	Escala temporal	Escala espacial
OBS	Correlação de turbilhões (<i>eddy covariance</i>)	0,25 h – anual	> 100 m*
	Razão de Bowen – Balanço de energia	0,25 h – anual	> 20 m*
	Lisímetros	0,5 h – anual	pontual
	Cintilômetro	0,5 h – anual	> 10 m e < 10 km
	Balanço hídrico superficial	mensal – anual	> 100 km e < 10 ³ km
	Balanço hídrico atmosférico	mensal – anual	> 100 km e < 10 ³ km
EST	Penman-Monteith e FAO 56	diário	pontual
	Modelos empíricos	variável	pontual
	Sensoriamento remoto	variável	global

*Depende da altura dos instrumentos acima do dossel vegetativo de interesse; OBS – métodos de observação; EST – métodos de estimativa.

Fonte: Wang e Dickinson (2012).

Estimativas da evapotranspiração através do balanço de energia incorporam a relação entre as trocas de calor sensível e latente na superfície de interesse. Essa relação foi formulada originalmente por Bowen (1926) e é baseada nos gradientes de temperatura e pressão de vapor na camada de fluxo constante acima da vegetação. O método empírico de Priestley e Taylor (1972) pode ser considerado uma simplificação do método do balanço de energia – razão de Bowen, facilitando os cálculos da evapotranspiração na dificuldade de se aferir os gradientes de temperatura e pressão de vapor.

De acordo com Allen *et al.* (1998), o método de estimativa de evapotranspiração de Penman-Monteith foi considerado o mais confiável e robusto para os diferentes climas da terra. Assim, a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) parametrizou o método que utiliza a equação desenvolvida por Penman (1948) e Monteith (1965) para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o), calculada pela Equação 1, que operacionalizou a sua utilização rotineira, assumindo a superfície de referência (grama) sem deficiência de água e em pleno crescimento ativo, como o padrão. Para o cálculo da evapotranspiração em outras superfícies vegetadas, multiplica-se a ET_o pelo coeficiente de cultura (K_c), disponível no manual da FAO para diversas coberturas do solo (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \frac{\gamma 900}{(T_{med} + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34) U_2} \quad (1)$$

Em que: Δ é a declividade da curva de pressão de vapor em função da temperatura (kPa °C⁻¹); R_n é o saldo de radiação total (MJ m⁻² d⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹); γ é o coeficiente psicométrico (kPa °C⁻¹); 900 é o valor aproximado das constantes que constam na equação (kJ⁻¹ kg K d⁻²); T_{med} é a temperatura média diária (°C); U_2 é a velocidade média do vento medida a 2 m de altura do solo (m s⁻¹); ($e_s - e_a$) é o déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência medida (kPa).

O estudo da evapotranspiração em regiões tropicais e subtropicais é imprescindível para a compreensão a nível global do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica (Fisher *et al.*, 2009). Valores para a evapotranspiração estimada ou medida nos usos do solo considerados por este estudo em trabalhos anteriores desenvolvidos em condições climáticas semelhantes são apresentados a seguir (Tabela 2). Verifica-se que o Cerrado *sensu stricto* pode apresentar valores maiores que os usos agrícolas do solo (pastagem e cana-de-açúcar).

Tabela 2 – Evapotranspiração e precipitação de estudos desenvolvidos no Brasil usos do solo similares ao do presente estudo.

Uso do solo	Lat.	Long.	Método	ET (mm ano ⁻¹)	PP	Referência
Cana-de-açúcar ¹	-21,63	-47,78	EC	892	1194	Cabral <i>et al.</i> (2012)
Cana-de-açúcar ²	-21,63	-47,78	EC	685	1353	Cabral <i>et al.</i> (2012)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	-21,62	-47,65	EC	811	1498	Da Rocha <i>et al.</i> (2009)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	-21,62	-47,65	EC	1228	1448	Cabral <i>et al.</i> (2015)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	-15,93	-47,88	EC	821	1440	Giambelluca <i>et al.</i> (2009)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	-15,80	-55,33	PM	1004	1696	Nobrega <i>et al.</i> (2017)
Pastagem	-3,01	-54,53	EC	647	1597	Sakai <i>et al.</i> (2004)
Pastagem	-15,81	-55,34	PM	639	1780	Nobrega <i>et al.</i> (2017)
Transição Cerrado e Amazônia	-11,41	-55,33	EC	1005	2000	Vourlitis <i>et al.</i> (2002)

ET: Evapotranspiração; PP: Precipitação; EC: Eddy covariance; PM: Penman-Monteith; ¹Planta; ²Soca.

Fonte: Autor

2.2.4. Armazenamento de água no solo e recarga do aquífero

O conteúdo de água no solo é geralmente definido como a relação entre a massa ou volume de água e a massa ou volume de solo (Romano, 2014). A umidade do solo pode ser medida diretamente através de ensaios de laboratório, e indiretamente, a partir de diversos métodos, como sondas FDR (*Frequency-domain reflectometry*) que relacionam o conteúdo de água no solo com a velocidade de transmissão de sinais de rádio frequência (Dean *et al.*, 1987).

O armazenamento, geralmente expresso em altura d'água (Equação 2), pode ser obtido a partir de duas abordagens: o método do trapézio e o de Simpson. O primeiro assume que entre dois pontos de medida de água no solo, o conteúdo varia linearmente com a profundidade do solo. Já o segundo, a medida ao longo de um perfil de solo com três ou mais pontos de amostragem varia como uma função quadrática (Libardi, 2005).

$$S = \int_0^L \theta(Z) dZ \quad (2)$$

Em que: S é a água armazenada no solo; L é a profundidade analisada; θ é a umidade do solo; e Z são as profundidades dos sensores.

O monitoramento da variação da superfície livre é útil para a aplicação do método do WTF (*Water Table Fluctuation*), técnica utilizada para a estimativa da recarga direta do aquífero. Esse método (Equação 3) é aplicado para aquíferos livres quando a carga hidráulica da sua superfície livre é constantemente monitorada. A vantagem deste método inclui a simplicidade e a sensibilidade para os processos de escoamento na zona não saturada (Healy e Cook, 2002).

$$RR = S_y \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (3)$$

Em que: S_y é o rendimento específico do aquífero; ΔH é a variação do nível freático; e ΔT o intervalo de tempo considerado.

2.3. Erosão do solo

A erosão do solo consiste em um processo dividido em três fases: o desprendimento de partículas do solo, o seu transporte por agentes erosivos como a água e o vento e, por fim, quando não há mais energia suficiente para o transporte das partículas, ocorre a deposição do material erodido (Morgan, 2009). Embora seja um processo natural, as taxas de perda de solo podem ser influenciadas pela ação antrópica, em especial, a agricultura e o desmatamento.

A erosão hídrica é um dos mais significativos processos de degradação ambiental e é composta pela erosão no sulco e no entressulco: a erosão entressulco ocorre quando as partículas do solo são desagregadas pelas gotas de chuva e transportadas pelo escoamento superficial raso, enquanto que a erosão no sulco é a desagregação e o transporte das partículas do solo pelo fluxo concentrado (Beskow *et al.*, 2009).

2.3.1. Estudos em erosão hídrica

Para melhor entender os processos envolvidos na erosão do solo causada pela precipitação, esforços vêm sendo realizados em muitos países com abordagens experimentais e computacionais (García-Ruiz *et al.*, 2015; Guo *et al.*, 2015). Dados de compilações globais desses estudos mostram que a erosão do solo resultante de sistemas convencionais de agricultura é muito maior de que em áreas de vegetação nativa. As variações locais e regionais dos ecossistemas, das culturas e das condições socioeconômicas possuem papel fundamental nas dinâmicas envolvendo os processos erosivos (Dotterweich, 2013).

2.3.2. Modelagem de processos erosivos

Os modelos de predição de erosão são compostos por equações matemáticas que estimam as variáveis envolvidas nos processos erosivos a partir de dados de entrada de diversas naturezas: clima, solo, topografia e uso do solo. No geral, os modelos computam: perda de solo; deposição e produção de sedimentos; e características do material transportado. No geral, os modelos são baseados na seguinte função (Renard *et al.*, 1997; Toy *et al.*, 2002):

$$ER = f(FC; FS; FT; FU; FH) \quad (4)$$

Em que: ER é a perda de solo; FC é o fator clima; FS é o fator solo; FT é o fator topográfico; FU é o fator uso do solo; e FH é o fator humano.

O desenvolvimento de modelos de erosão começou com o trabalho de (Cook, 1937), que identificou as principais variáveis que afetam a erosão do solo pela água: susceptibilidade do solo à erosão; potencial erosivo da chuva e do escoamento superficial; e proteção do solo pela cobertura vegetal. Assim, de acordo com Renard *et al.* (1997) e Wischmeier e Smith (1978) desde o início da década de 1940, várias equações de perda de solo vem surgindo, na tentativa de representar matematicamente os processos envolvidos em diversos níveis de complexidade (Tabela 3).

Existem muitos modelos que estimam a erosão do solo com diferentes resoluções de espaço e tempo, além de diferentes necessidades de dados de entrada. Os modelos disponíveis muitas vezes tem a erosão como mais um produto de saída, calculando também outras variáveis de interesse como carga de poluentes, crescimento de plantas, respostas hidrológicas, entre outras. Os modelos USLE, MUSLE, RUSLE, WEPP, KINEROS e EUROSEM foram exclusivamente concebidos para a estimativa de perda de solo, e representam vários tipos de modelos desenvolvidos para este fim (Schmidt, 2013).

Tabela 3 – Resumo dos tipos de modelos de erosão do solo.

Tipo	Forma	Desenvolvimento	Exemplos
Modelos de regressão ¹	Uma ou mais equações que melhor se ajustam aos dados.	Ajuste de uma ou mais equações a partir de uma base de dados empíricos representando as condições de campo.	Equações de Zingg (1940), Smith (1941), Browning <i>et al.</i> (1947), Smith e Whitt (1947). Equações de Smith e Whitt (1948) e Musgrave (1947); (R)USLE (versões original e revisada da <i>Universal Soil Loss Equation</i>) (Wischmeier e Smith, 1965; 1978; Renard <i>et al.</i> , 1997).
Modelos baseados em índices ²	Usam índices, geralmente na forma multiplicativa, para representar como clima, solo, topografia e uso do solo influenciam na erosão.	Os índices são determinados a partir de grandes bancos de dados empíricos representando as condições de campo.	KINEROS (<i>Kinematic Runoff and Erosion Model</i>) (Woolhiser <i>et al.</i> , 1990)
Modelos baseados em processos simples ³	Representam o processo individual de erosão através de simples equações diferenciais.	Equações derivadas da teoria e bases empíricas de processos erosivos, validados através de dados de campo representativos.	

Tipo	Forma	Desenvolvimento	Exemplos
Modelos combinados (índices e processos) ⁴	Equação em forma de índices em que simples equações diferenciais são utilizadas para determinar os valores dos índices.	Componentes derivados de bases de dados empíricos de erosão, fatores ligados ao uso do solo, validados através de dados de campo.	MUSLE (<i>Modified Universal Soil Loss Equation</i>) (Williams, 1975)
Modelos dinâmicos entre eventos chuvosos ⁵	Equações teóricas para representar como as variáveis que controlam a erosão mudam entre as chuvas, utilizam valores referência para as chuvas e equações diferenciais para o cálculo da erosão por evento de chuva.	Derivados de bases de dados empíricos e teóricos para equacionamento dos processos erosivos; fórmulas conectadas pela equação de conservação de massa; validados através de dados de campo; base física.	WEPP (<i>Water Erosion Prediction Project</i>) (Nearing <i>et al.</i> , 1989)
Modelos dinâmicos durante e entre os eventos chuvosos ⁶	Consideram a erosão que acontece durante e entre os eventos chuvosos.	Consideram as variações temporais dos processos que ocorrem durante a chuva a partir de bases de dados adicionais; base física.	EUROSEM (<i>European Soil Erosion Model</i>) (Morgan <i>et al.</i> , 1998)

¹²³⁴⁵⁶Níveis de complexidade e dificuldade na obtenção dos dados de entrada dos modelos (1 - menor complexidade e dificuldade; 6 – maior complexidade e dificuldade).

Fonte: Toy *et al.* (2002).

2.4. Experimentos em escala de parcela para o monitoramento do escoamento superficial e da erosão do solo no Brasil

Os estudos realizados no Brasil até 2017 foram desenvolvidos em 40 municípios localizados em 14 dos 26 estados brasileiros e Distrito Federal (DF) distribuídos nas 5 regiões do país (Tabela 4). Foram considerados resultados de artigos científicos, trabalhos de congresso, teses e dissertações listados nas bases de dados: *Web of Science*, SciELO e Google Acadêmico. Esses estudos foram realizados sob chuva natural, em que o monitoramento da erosão do solo e do escoamento superficial foi realizado de forma continua por um período. As informações compiladas dos estudos listados na Tabela 4 como: coordenadas geográficas, município, dimensão das parcelas, declividade do terreno, uso do solo, sistema de manejo, período de monitoramento, precipitação (anual), escoamento superficial (anual) e erosão do solo (anual); estão disponíveis no material suplementar fornecido por Anache *et al.* (2017). Essas informações subsidiam as demais tabelas e figuras dessa seção.

Tabela 4 – Estudos experimentais em parcelas sob chuva natural no Brasil para o monitoramento do escoamento superficial e da erosão do solo.

Região	Estado	Município	Referência
	DF	Planaltina	Dedecek (1986); Dedecek (1989)
		Aquidauana	Oliveira <i>et al.</i> (2016)
CO	MS	Dourados	Carvalho e Hernani (2001); Hernani <i>et al.</i> (1999); Hernani <i>et al.</i> (1997)
		Três Lagoas	Cândido <i>et al.</i> (2014)
	MT	Campo Verde	Cabral <i>et al.</i> (2010a); Leite <i>et al.</i> (2009)

Região	Estado	Município	Referência
N	AM	Primavera do Leste	Cabral <i>et al.</i> (2010a)
		Sinop	Rieger <i>et al.</i> (2014)
		Coari	Encinas (2010)
NE	BA	Caravelas	Guimarães <i>et al.</i> (2015)
		Teixeira de Freitas	Guimarães <i>et al.</i> (2015)
	CE	Iguatu	Santos <i>et al.</i> (2011)
		Monsenhor Tabosa	Falcão Sobrinho (2015)
		Sobral	Aguiar <i>et al.</i> (2006)
	PB	São João do Cariri	Santos <i>et al.</i> (2007)
		Sumé	Albuquerque <i>et al.</i> (2002); Santos <i>et al.</i> (2007)
S	PE	Glória do Goitá	Campos Filho <i>et al.</i> (1992); Margolis <i>et al.</i> (1991)
	PR	Guarapuava	Thomaz (2009)
		Maringá	Freire <i>et al.</i> (2014)
		Ponta Grossa	Merten <i>et al.</i> (2015)
		Arroio dos Ratos	Baptista e Levien (2010)
	RS	Eldorado do Sul	Silva <i>et al.</i> (2016)
		Guaíba	Saraiva <i>et al.</i> (1981)
		Porto Alegre	Oliveira <i>et al.</i> (2013a)
		Santa Maria	Amado <i>et al.</i> (2002); Debarba e Amado (1997); Lanzasova <i>et al.</i> (2013)
		Santo Ângelo	Cogo <i>et al.</i> (2003)
	SC	Terra Dura	Oliveira (2011)
		Campo Belo do Sul	Oliveira (2012)
		Lages	Amaral <i>et al.</i> (2008); Bertol <i>et al.</i> (2014); Bertol <i>et al.</i> (2007); Bertol e Miquelluti (1993); Bertol <i>et al.</i> (2001); Bertol <i>et al.</i> (2002); Guadagnin <i>et al.</i> (2005); Schick <i>et al.</i> (2000); Schick <i>et al.</i> (2014)
	ES	Alegre	Guimarães <i>et al.</i> (2015)
		Aracruz	Martins (2005)
		Belo Oriente	Pires <i>et al.</i> (2006); Silva <i>et al.</i> (2011)
		Gouveia	Marchioro e Augustin (2007)
		Guanhães	Silva <i>et al.</i> (2011)
SE	MG	Lavras	Cardoso <i>et al.</i> (2012); Carvalho <i>et al.</i> (2007); Silva <i>et al.</i> (2005)
		São João del Rei	Santos <i>et al.</i> (1998)
		São João Evangelista	Silva <i>et al.</i> (2010)
	RJ	Uberlândia	Pinese Júnior <i>et al.</i> (2008)
		Nova Friburgo	Bertolino <i>et al.</i> (2015)
		Seropédica	Cruz (2006); Eduardo <i>et al.</i> (2013)
		Silva Jardim	Rodrigues <i>et al.</i> (2014)
		Teresópolis	Nacinovic <i>et al.</i> (2014)
	SP	Brotas	Martins Filho (2014)
		Campinas	Bertoni e Lombardi-Neto (2012); Correchel <i>et al.</i> (2006); Marques <i>et al.</i> (2010); Nascimento e Lombardi-Neto (1999); Tenberg <i>et al.</i> (1997)
		Igaratá	Wichert (2005)
		Itirapina	Oliveira <i>et al.</i> (2015); Youlton <i>et al.</i> (2016b)
		Pindorama	Prochnow (2003); Prochnow <i>et al.</i> (2005)
		São Simão	Lima (1988)
		Ubatuba	Fullen <i>et al.</i> (2016)

Estados por região: Norte, N (Amazonas, AM); Nordeste, NE (Bahia, BA; Ceará, CE; Paraíba, PB e Pernambuco, PE); Centro-Oeste, CO (Distrito Federal, DF; Mato Grosso do Sul, MS e Mato Grosso, MT); Sudeste, SE (Espírito Santo, ES; Minas Gerais, MG; Rio de Janeiro, RJ e São Paulo, SP); e Sul, S (Paraná, PR; Rio Grande do Sul, RS e Santa Catarina, SC).

Fonte: Organizado pelo autor.

2.4.1. Distribuição espacial dos estudos

Existem aproximadamente 52 experimentos em escala de parcela nas cinco regiões do Brasil (Figura 2). Entretanto, os estudos não estão igualmente distribuídos no país e aproximadamente 67% das estações experimentais estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste. Essa concentração ocorre pela elevada densidade populacional e maior prosperidade econômica dessas regiões (Oliveira *et al.*, 2013b). Além disso, as atividades agrícolas no Brasil começaram nessas regiões, onde modernas práticas de cultivo são adotadas, as quais foram expandidas da costa para outras regiões, principalmente no Cerrado brasileiro (Castro *et al.*, 1999; Soares-Filho *et al.*, 2014).

Figura 2 – Distribuição espacial das estações experimentais de monitoramento do escoamento superficial e da erosão dos solos sob chuva natural no Brasil.

Fonte: Autor

A região Sudeste possui a mais longa série de dados observados de escoamento superficial e erosão do solo em parcelas experimentais (Tabela 5). A região Sul possui importantes áreas de estudo, como a localizada em Lages, SC. Essa área pertence a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e é a série de dados ativa mais longa do

país que vem sendo monitorada desde o final dos anos 1980 (Schick *et al.*, 2014). Além disso, ambas as regiões possuem 88% do total de anos observados no Brasil.

Tabela 5 – Estatísticas da duração dos períodos monitorados em parcelas experimentais por região do Brasil.

Região ^a	Número de experimentos	Ano-parcela ^b	Número de Ano-parcela		
			Média	Máximo	Mínimo
CO	8	202,0	2,8	7,0	0,5
N	1	3,0	1,0	1,0	1,0
NE	8	231,5	4,9	9,0	0,5
S	12	753,3	3,9	20,0	0,5
SE	23	2335,5	12,0	39,0	0,3

^a CO: Centro-Oeste; N: Norte; NE: Nordeste; S: Sul; SE: Sudeste. ^bAno-parcela refere-se à soma da duração dos monitoramentos executados em cada parcela, considerando repetições e tratamentos.

Fonte: Organizado pelo autor.

Apesar de ser a maior região do Brasil em área (45% do território nacional), o Norte possui a série mais curta de dados, com apenas um experimento inoperante. De acordo com Lapola *et al.* (2013), a região Norte do Brasil possui a maior fronteira agrícola do país na Floresta Amazônica, onde a principal atividade em área desmatada é a pecuária. Assim, existe a necessidade de melhor entender os padrões do escoamento superficial e da erosão do solo na região mais chuvosa do Brasil.

No Brasil, a maior parte do território utilizado para a expansão agrícola era ocupado por florestas, vegetação arbustiva e savanas (Gibbs *et al.*, 2010). Esses usos do solo vem sendo substituídos por pastagens e cultivos agrícolas, de maneira mais acentuada nos últimos anos, principalmente da região Centro-Oeste (Lapola *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2015), que não possui muitos estudos experimentais sobre escoamento superficial e erosão do solo.

Estima-se que o Brasil tenha aproximadamente 3525 anos de operação (ano-parcela) em parcelas experimentais sob chuva natural somando-se a duração de todos os estudos e suas repetições e tratamentos (Anache *et al.*, 2017). Esse número é similar a países como a China (2823 anos-parcela) (Guo *et al.*, 2015) e Alemanha (1076 anos-parcela) (Auerswald *et al.*, 2009). Entretanto, nos Estados Unidos no final da década de 1970, mais de 10000 anos de observações em parcelas experimentais estavam consolidados no banco de dados nacional, permitindo o desenvolvimento de modelos como a *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (Wischmeier e Smith, 1978) e o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) (Nearing *et al.*, 1989; Flanagan *et al.*, 2007).

2.4.2. Escoamento superficial e erosão do solo

Os valores médios anuais e respectivos desvios padrão da precipitação, declividade, escoamento superficial e perda de solo de parcelas experimentais estão listados de acordo com o uso do solo e região do Brasil na Tabela 6. Cultivos agrícolas e pastagens foram os usos do solo mais estudados em parcelas experimentais sob chuva natural no Brasil. Os valores médios anuais de erosão do solo variam entre 0,1 t ha⁻¹ ano⁻¹ (pastagem na região Sul) a 136 t ha⁻¹ ano⁻¹ (solo exposto na região Nordeste). Como as taxas de escoamento superficial e perda de solo tendem a variar ao longo do tempo (Nearing *et al.*, 1999), maior peso foi atribuído a maiores períodos de observação utilizando o teorema do limite central nos estudos resumidos pela Tabela 6 (Cerdan *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2015; Anache *et al.*, 2017).

Tabela 6 – Valores médios anuais de escoamento superficial e perda de solo compilados de estudos em parcelas experimentais.

Uso do solo	Região ^a	Ano-parcela ^b	Precipitação (mm ano ⁻¹)		Declividade (%)		Comprimento (m)		Escoamento superficial (mm ano ⁻¹)		Erosão do solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	
			M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Eucalipto	CO	6	1647	251	3,1%	1,2%	23,7	0,7	42,2	36,5	0,2	0,3
	NE	9	1229	23	6,5%	2,5%	24,0	-	11,9	2,2	0,1	0,0
	S	50	1741	274	15,5%	4,1%	20,0	4,7	190,6	167,2	2,2	3,4
	SE	80	1209	252	19,3%	11,7%	27,0	6,6	52,2	31,9	1,4	2,8
Solo exposto	CO	25	1547	294	3,9%	1,4%	22,6	0,9	299,5	290,6	88,2	148,6
	N	1	2486	-	9,0%	-	22,0	-	352,0	-	59,1	-
	NE	64	748	257	6,4%	2,9%	22,7	1,1	487,7	275,2	136,0	193,2
	S	165	1371	379	14,5%	14,6%	17,7	5,9	496,6	669,3	114,0	149,9
	SE	119	1302	386	12,9%	8,3%	17,2	9,6	284,4	253,0	49,1	94,6
Agricultura	CO	145	1477	223	4,3%	1,4%	22,5	5,5	188,8	210,5	10,0	14,3
	NE	85	820	132	10,3%	6,2%	18,6	6,8	231,7	229,1	18,2	33,7
	S	482	1176	512	10,9%	9,8%	21,0	3,8	127,0	177,9	7,1	16,0
	SE	1795	1317	244	11,3%	5,3%	32,5	17,3	35,4	53,7	60,3	78,6
Floresta	CO	2	1872	337	3,0%	-	23,0	1,0	6,7	3,6	0,0	0,0
	N	1	2486	-	9,0%	-	11,0	-	24,0	-	0,1	-
	NE	10	1013	216	9,0%	3,0%	17,0	7,0	39,0	28,1	0,2	0,1
	S	19	1355	268	17,3%	10,5%	15,2	4,5	39,4	59,6	0,1	0,0
	SE	74	1007	269	21,0%	13,8%	14,4	7,3	30,4	35,8	0,5	1,5
Pastagem e campo	CO	16	1637	423	4,0%	1,8%	22,1	0,1	30,0	21,3	0,3	0,1
	N	1	2486	-	9,0%	-	22,0	-	243,0	-	0,3	-
	NE	43	638	126	9,4%	9,6%	20,0	4,5	160,5	96,1	1,0	0,8
	S	38	1432	171	10,5%	3,2%	21,2	3,4	74,2	106,5	0,1	0,2
	SE	143	1169	488	13,5%	5,9%	18,4	6,2	111,1	166,1	17,0	27,2
Pomar	SE	114	1400	-	13,0%	-	25,0	-	-	-	89,0	118,0
Arbustivo	CO	3	1518	18	4,3%	1,3%	23,0	1,0	7,9	1,7	0,9	0,8
	NE	21	793	185	13,9%	11,0%	16,0	6,0	115,0	128,2	0,7	0,9
	SE	12	1728	316	17,5%	8,5%	15,0	5,0	7,2	2,7	0,1	0,1

M: média; SD: desvio padrão; Solo exposto: solo nu sem cobertura vegetal; Agricultura inclui os seguintes cultivos: Agrosilvopastoral, Algodão, Amendoim, Arroz, Aveia, Café, Cana-de-açúcar, Clotalaria, Ervilhaca, Feijão, Labe-labe, Mandioca, Milheto, Milho, *Mulching*, Olericultura, Palma, Soja, Sorgo, Tremoço e Trigo; Floresta inclui: Floresta amazônica, Reflorestamento, Restauração florestal e Mata atlântica; Pastagem e campo incluem: Pastagens naturais e artificiais para produção animal e campos abertos cobertos com gramíneas (Pampas); Pomar inclui: Banana, Laranja e Mamona; Arbustivo inclui: Caatinga e Cerrado. ^a CO: Centro-Oeste; N: Norte; NE: Nordeste; S: Sul; SE: Sudeste. ^b Ano-parcela refere-se à soma da duração dos monitoramentos executados em cada parcela, considerando repetições e tratamentos.

Fonte: Organizado pelo autor.

Os comprimentos das parcelas mostraram maior variabilidade nas condições onde existem maior número de experimentos. Entretanto, a maior parte dos estudos seguiram os padrões de dimensões definidos por Wischmeier e Smith (1978) na construção das parcelas, utilizando 22,1 m ou valores similares para o comprimento do declive. O fator de escala é extremamente importante nesse tipo de estudo, uma vez que quanto maior a parcela, maior concordância com medidas em escala de bacia hidrográfica (Sadeghi *et al.*, 2013). Além disso, parcelas com aproximados 20 m de comprimento são consideradas parcelas-padrão para medida de perda de solo, estabelecido pela USLE. Essas são consideradas as mais representativas para avaliar o escoamento superficial e a erosão do solo.

Os padrões de precipitação variam ao longo do Brasil e a Tabela 6 indica que a região Norte possui os maiores valores de precipitação, escoamento superficial e perda de solo. Entretanto, a região mais árida do Brasil (Nordeste), não possui os menores valores de escoamento superficial e erosão do solo pois, geralmente, regiões semiáridas são sensíveis aos processos erosivos devido à vegetação esparsa e às chuvas intensas depois de longos períodos de estiagem (Bronstert *et al.*, 2014).

A distribuição dos dados de escoamento superficial e erosão do solo para todo o Brasil possui padrões diferentes de acordo com o uso do solo (Figura 3). Entretanto, valores similares foram encontrados para escoamento superficial e erosão do solo em todas as categorias. Para os dados de escoamento superficial, as florestas mostraram o maior alcance direcionado aos menores valores (Figura 3A). Agricultura, eucalipto, arbustivo e pastagem mostraram padrões semelhantes no escoamento superficial e os maiores valores depois dos estudos com solo exposto. As menores taxas de perda de solo foram registradas em parcelas em florestas, e os maiores registros em solo exposto, pastagem e agricultura (Figura 3B). Alguns estudos em áreas de agricultura e pastagem possuem registros na mesma ordem de magnitude de florestas devido ao emprego de práticas conservacionistas e de agricultura sustentável.

Figura 3 – Comparação do escoamento superficial (A) e da erosão do solo (B) em diferentes usos do solo.

Fonte: Autor

Esses resultados para o Brasil concordam com levantamentos semelhantes realizados em outros países (Montgomery, 2007; Auerswald *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2015), sugerindo que usos do solo naturais resultam em menores taxas de escoamento superficial e erosão do solo em comparação com agricultura tradicional. Apesar disso, agricultura sustentável, que inclui o plantio direto, pode alcançar níveis similares ao escoamento superficial e à erosão do solo em condições naturais, dependendo do manejo do solo adotado (Montgomery, 2007).

A comparação entre os usos do solo em diferentes localidades e condições ambientais encontradas no Brasil é possível a partir do cálculo da razão de perda de solos, que utiliza os dados de parcelas de solo exposto como denominadores dos dados de parcelas com cobertura vegetal (Tabela 7). Observa-se que a agricultura sustentável pode reduzir em até 45% as taxas de erosão do solo e atingir níveis de condições naturais (arbustivo e floresta), conforme também observou Oliveira *et al.* (2015). Entretanto, em relação ao eucalipto, a comparação entre os estudos com e sem práticas sustentáveis não foi representativo, devido não somente à pequena quantidade de experimentos (menos de 10), mas também à diferença de idade das árvores nos estudos considerados. Assim, os experimentos que possuíam práticas conservacionistas acabaram com uma razão média de perda de solo menor que em locais onde não foram aplicadas essas técnicas.

Tabela 7 – Razão média de perda de solo para diferentes usos do solo no Brasil.

Uso do solo	Média**	Desvio padrão**
Agricultura	0,55	0,44
Eucalipto*	0,49	0,22
Pomar	0,47	0,00
Pastagem e campo	0,46	0,29
Floresta	0,37	0,21
Eucalipto	0,36	0,24
Arbustivo	0,32	0,15
Agricultura*	0,30	0,17

*Usos do solo sob práticas conservacionistas; **Adimensional; Agricultura inclui os seguintes cultivos: Agrosilvopastoril, Algodão, Amendoim, Arroz, Aveia, Café, Cana-de-açúcar, Cloratória, Ervilhaca, Feijão, Labe-labe, Mandioca, Milheto, Milho, *Mulching*, Olericultura, Palma, Soja, Sorgo, Tremoço e Trigo; Floresta inclui: Floresta amazônica, Reflorestamento, Restauração florestal e Mata atlântica; Pastagem e campo incluem: Pastagens naturais e artificiais para produção animal e campos abertos cobertos com gramíneas (Pampas); Pomar inclui: Banana, Laranja e Mamona; Arbustivo inclui: Caatinga e Cerrado.

Fonte: Organizado pelo autor.

Alta variabilidade de escoamento superficial e erosão do solo foi verificada pois diferentes tipos de agricultura foram identificados nos estudos experimentais considerados nesse levantamento (Figura 3). Por isso, o uso do solo agricultura foi separado por tipo de cultura (Tabela 8). As diferentes ordens de magnitude dos valores médios e os altos desvios

padrão são explicados pelas diferentes condições experimentais em que os estudos foram conduzidos. Essas condições podem ser naturais (clima, solo e topografia) e antrópicas (manejo da cultura) e impactam diretamente a erosão do solo (Montgomery, 2007; Auerswald *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2015; Kinnell, 2016). Entretanto, é possível estabelecer alguns comportamentos comuns: (i) dosséis maiores apresentam menores taxas de perda de solo; (ii) parcelas com cultivos de grãos podem produzir maior escoamento superficial que parcelas com solo exposto; (iii) metade dos cultivos considerados mostraram valores superiores de erosão do solo que o grupo pastagem e campo.

Tabela 8 – Valores médios de escoamento superficial e erosão do solo compilados de estudos em parcelas experimentais categorizados por diferentes culturas e usos do solo (valores ordenados pela média de perda de solo).

Uso do solo	Escoamento superficial (mm ano ⁻¹)			Erosão do solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)		
	M	SD	Ordem	M	SD	Ordem
Solo exposto	297,8	249,6	1	50,3	86,5	1
Amendoim	-	-	-	26,7	-	2
Mandioca	77,0	69,7	11	15,3	17,7	3
Olericultura	107,9	-	7	14,8	-	4
Pomar	-	-	-	14,4	19,1	5
Arroz	231,6	24,6	3	14,4	7,7	6
Feijão	293,3	242,6	2	13,3	17,5	7
Rotação de cultura*	77,4	72,2	10	9,1	12,7	8
Soja	75,2	70,0	12	8,2	13,8	9
Algodão	-	-	-	7,8	8,7	10
Palma	196,1	21,6	4	7,7	2,8	11
Pastagem e campo	112,2	152,7	6	6,5	12,5	12
Milho	94,5	87,1	8	6,2	7,6	13
Café	23,1	13,5	20	6,2	8,7	14
Cana-de-açúcar	23,9	0,0	19	5,0	5,3	15
Ervilhaca	161,2	-	5	4,7	2,3	16
Labe-labe	-	-	-	4,2	-	17
Trigo	45,5	18,2	16	3,7	4,9	18
Crotalaria	51,7	11,9	14	2,7	1,1	19
Eucalipto	46,5	47,7	15	1,1	2,7	20
Milheto	20,4	10,8	21	1,1	0,6	21
Indefinido**	33,9	15,9	17	1,0	0,7	22
Arbustivo	57,5	112,5	13	0,5	0,8	23
Agrosilvopastoril	79,8	66,5	9	0,3	0,1	24
Silvopastoril	16,0	-	22	0,2	-	25
Floresta	28,4	36,1	18	0,1	0,2	26
Sorgo	14,5	-	23	0,0	-	27

M: média; SD: desvio padrão; *Rotação de cultura pode incluir a combinação de 2 ou 3 culturas ao longo do ano de operação da parcela experimental: Algodão, Aveia, Ervilhaca, Feijão, Milho, Palma, Soja, Tremoço e Trigo; **Inclui estudos que não informaram o tipo de cultivo; Usos do solo em negrito não são considerados cultivos agrícolas.

Fonte: Organizado pelo autor.

2.4.3. Desafios e perspectivas

Durante mais de 20 anos, entre as décadas de 1940 e 1970, quando os estudos em parcelas experimentais para o monitoramento da erosão do solo começaram no Brasil, apenas alguns experimentos eram operados (Castro e Neto, 2009). Nota-se que no início da década de 1960, os estudos experimentais de perda de solo (avaliados em número de anos monitorados por ano – ano-parcela) aumentaram significativamente, alcançando o pico nos anos 2000. Entretanto, desde então, os estudos diminuíram aproximadamente 86% (Figura 4). A ciência hoje necessita de estudos fundamentais baseados em observações em campo para explicar o que ocorre em regiões pouco estudadas como o Brasil, um país que possui esse tipo de demanda por sua localização nos trópicos (Wohl *et al.*, 2012; Burt e McDonnell, 2015).

Figura 4 – Distribuição temporal dos números de ano-parcela de estudos sob chuva natural.

Fonte: Autor

Foi encontrado um atraso entre a coleta de dados e a publicação dos dados em periódicos com sistema de revisão pelos pares. Por exemplo, o pico no número de artigos publicados sobre o tema ocorreu 15 anos depois do ano 2000, que corresponde ao pico do número de ano-parcela (Figura 4 e Figura 5). Além disso, a primeira publicação do assunto é do início da década de 1980, aproximadamente 40 anos depois da instalação das primeiras parcelas experimentais no Brasil, onde o número de publicações começou a crescer no final da década de 1990 (Figura 5). Esses atrasos ocorreram principalmente devido às características destes estudos, que são realizados no campo sob condições naturais e precisam de mais tempo de monitoramento, e consequentemente, existe essa demora na divulgação dos resultados.

Figura 5 – Distribuição temporal dos artigos publicados sobre o tema.

Fonte: Autor

Aproximadamente 49% dos documentos que contém dados observados de escoamento superficial e erosão do solo possuem dois anos ou menos de tempo de monitoramento. A justificativa para esse fato pode ser o alto custo e a longa duração desse tipo de estudo, apesar da sua relevância para o país. Assim, os pesquisadores tem dificuldade em encontrar séries longas do tipo (Figura 6). Além disso, recomenda-se maiores períodos de monitoramento para a devida publicação dos estudos, já que esse tipo de dado necessita um maior número de anos observados para redução da variabilidade entre as repetições (Nearing *et al.*, 1999; García-Ruiz *et al.*, 2015).

Figura 6 – Anos de monitoramento em áreas experimentais (escoamento superficial e erosão do solo sob chuva natural no Brasil).

Fonte: Autor

Alguns autores reportaram e discutiram a alta variabilidade do escoamento superficial e da erosão do solo medidos em parcelas experimentais (Wendt *et al.*, 1986; Nearing *et al.*, 1999; Gómez *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2015), e em concordância com os dados do Brasil, as médias observadas podem ser influenciadas pela duração do período de monitoramento. Constatou-se que 51% dos estudos conduzidos no Brasil foram realizados com mais de dois anos de monitoramento.

Nos Estados Unidos, esforços para a observação do escoamento superficial e da erosão do solo em parcelas experimentais sob chuva natural resultaram no desenvolvimento de modelos matemáticos de perda de solo, que inicialmente começaram na região do *Corn Belt* na década de 1940 (Laflen e Moldenhauer, 2003). Em seguida, o governo federal americano expandiu a missão para 49 localidades distribuídas em todo o país para criar um programa nacional de conservação do solo (Gilley e Flanagan, 2007). Isso permitiu a criação de uma central de dados do Departamento de Agricultura (USDA), operado pelo *Agricultural Research Service* (ARS) em cooperação com a Universidade de Purdue, e assim, o desenvolvimento da *Universal Soil Loss Equation* (USLE) foi possível (Wischmeier e Smith, 1978). Subsequentemente, o *National Soil Erosion Research Laboratory* (NSERL) foi construído na Universidade de Purdue na década de 1980 com a missão de entender os fatores que governam os processos do escoamento superficial e da erosão do solo e continuar melhorando os modelos matemáticos relacionados com esses fenômenos (Wischmeier e Smith, 1978; Flanagan *et al.*, 2013).

Em contraste, o Brasil possui 70% a menos de dados de escoamento superficial e erosão do solo observados em condições naturais em relação aos Estados Unidos, em termos de ano-parcela. Bertoni e Lombardi-Neto (2012) estabeleceram técnicas e medidas para controle da erosão baseadas em observações realizadas durante um longo período no Estado de São Paulo. Essa experiência foi replicada para a região Sul, que também concentra grande parte dos estudos experimentais do Brasil depois da região Sudeste. Entretanto, os esforços para expandir os estudos para outras partes do Brasil de forma homogênea não foram extensivos e duradouros (metade dos estudos possui dois anos ou menos de observações). Além disso, O Brasil não possui uma central de dados para compilar as informações, os estudos não são padronizados em termos de dimensionamento e declividade do terreno, e os resultados não são facilmente acessados pelos usuários (pesquisadores e produtores rurais).

Para o Brasil desenvolver-se economicamente e sustentar os seus recursos naturais, os processos erosivos precisam ser bem compreendidos nas condições existentes de uso do solo.

Isso iria contribuir para o desenvolvimento de tecnologias de predição de perda de solo adequadas para as necessidades do país, sendo útil para indicar as áreas próprias para cultivos agrícolas, pastagens e vegetação nativa (Oliveira *et al.*, 2015). Para desenvolver essa base de dados contendo informações de todo o Brasil, devem ser estabelecidas políticas públicas e parcerias entre as instituições de pesquisa (e.g. Embrapa Solos), a indústria, os proprietários rurais e o poder público. Todavia, pela elevada dificuldade na operação desses experimentos sob chuva natural, a simulação de chuva pode ser alternativa para suplementar e expandir os dados de erosão do solo observados no Brasil, como foi feito no desenvolvimento da USLE e do WEPP (Wischmeier e Smith, 1978; Nearing *et al.*, 1989).

Por fim, pesquisas experimentais com foco na redução do escoamento superficial e da erosão do solo em áreas agrícolas contribuem com o desenvolvimento de técnicas que levam a sustentabilidade da produção de alimentos, combustível e fibras. Essas técnicas podem incluir a adição de resíduos como a palha (Cerdà *et al.*, 2016; Prosdocimi *et al.*, 2016). Práticas sustentáveis precisam ser testadas no país inteiro e as pesquisas devem ter caráter interdisciplinar. A colaboração entre cientistas da área de solos e outras disciplinas, como a hidrologia, é importante para a prevenção da erosão do solo em suporte à segurança alimentar e energética (Brevik *et al.*, 2015). Os serviços ambientais e as funções do solo estão em 12 dos 17 objetivos das Nações Unidas para o desenvolvimento sustentável (Keesstra *et al.*, 2016b). Isso reforça o fato de que a ciência deve estar concentrada no desenvolvimento de políticas efetivas para a sustentabilidade do solo e deve continuar a expandir a rede de cooperação para melhorar o conhecimento em suporte desse grande desafio.

CAPÍTULO III

Material e métodos

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo está localizada no Instituto Arruda Botelho (IAB), no município de Itirapina, Estado de São Paulo (latitude 22°11'5" S, longitude 47°51'11" O, elevação 790 m a.n.m.m.¹), inserida no bioma Cerrado e em região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG). O experimento está dividido em duas áreas: área 1, que contém três diferentes usos do solo (pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto); e área 2, que está dentro de fragmento remanescente de Cerrado *sensu stricto*, que possui aproximadamente 330 hectares (Figura 7).

Figura 7 – Área de estudo e distribuição dos Neossolos no Cerrado brasileiro.

Fonte: Autor

¹ Acima do nível médio do mar.

O clima na região é subtropical úmido (Cwa, Köppen), com verão quente e chuvoso e inverno seco (Alvares *et al.*, 2014). O solo é classificado como Neossolo Quartzarênico órtico, de textura arenosa e que cobre aproximadamente 15% do bioma Cerrado (Oliveira *et al.*, 2016).

3.2. Instalação experimental

O experimento foi iniciado em outubro de 2011 (Oliveira *et al.*, 2015; Youlton *et al.*, 2016a) e operado durante cinco anos completos (2012-2016), sendo os últimos três anos (2014-2016) sob responsabilidade do projeto desta tese. A instalação do experimento foi composta de instrumentos manuais e automáticos, e estruturas permanentes, distribuídos nas áreas 1 e 2 (Figura 8). Dois poços para monitoramento do nível freático e 12 parcelas experimentais feitas com chapas metálicas de aço galvanizado fazem parte da estrutura permanente. Os instrumentos estão descritos na seção 3.2.2. O [Apêndice A](#) contém a memória fotográfica do experimento durante a sua operação entre 2014 e 2016.

Figura 8 – Variáveis medidas nas áreas experimentais, em que: (1) temperatura e umidade relativa; (2) precipitação; (3) umidade do solo; (4) fluxo de radiação solar; (5) direção e velocidade do vento; (6) escoamento superficial; (7) nível freático; (8) precipitação interna; (9) escoamento fustal; (10) saldo de radiação.

Fonte: Autor

3.2.1. Tratamentos das parcelas experimentais

As parcelas experimentais na área 1 estão cobertas por três diferentes usos do solo: (i) Pastagem (*Brachiaria decumbens*) estabelecida há 20 anos, utilizada para pecuária, com a altura das plantas variando entre 5 e 30 centímetros. O ciclo de rotação de animais é de 30 dias, em que 10 animais por hectare (420 kg cada) são deixados por 5 dias na área; (ii) Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) plantada em nível em outubro de 2011, em leiras de 1,5 m de espaçamento, aradas com 30 cm de profundidade e os sulcos construídos em contorno com 20 cm de profundidade (Youlton *et al.*, 2016b), e replantada sob o mesmo manejo em novembro de 2014. A cana-de-açúcar foi cortada e colhida todos os anos em novembro; (iii) As parcelas com solo exposto foram mantidas sob preparo com aplicação de glifosato e remoção manual com enxada (Oliveira *et al.*, 2015), tratamento essencial para avaliação de processos erosivos ligados ao escoamento superficial (Kinnell, 2016).

Na área 2, as parcelas experimentais foram instaladas sob Cerrado *sensu stricto*, que possui árvores de 2 a 8 metros de altura, podendo chegar a 12 metros em alguns casos (Alberton *et al.*, 2014). A vegetação do Cerrado possui tolerância a incêndios e as condições de clima e solo favorecem a alta diversidade da sua flora (Brannstrom *et al.*, 2008).

3.2.2. Instrumentação

Estações meteorológicas (tripé de 2 m de altura na área 1 e torre de 11 m de altura na área 2) ([Apêndice A](#)) foram instaladas nas áreas de monitoramento (Figura 8) e foram programadas para registrar os dados a cada 10 minutos. Os instrumentos foram ativados em novembro de 2011 na área 1 e em outubro de 2012 na área 2. As variáveis monitoradas são: precipitação, temperatura, umidade do ar, direção e velocidade do vento, radiação solar, pressão atmosférica e umidade do solo nos diferentes usos do solo. As variáveis, os sensores, o posicionamento e a localização estão detalhados na Tabela 9. A coleta, o armazenamento e a transmissão dos dados foram realizados a partir de *dataloggers* modelo CR1000 (*Campbell Scientific*).

Tabela 9 – Instrumentação nas áreas de monitoramento.

Variável monitorada	Sensor	Altura ou profundidade (m)	Área experimental
Temperatura (°C) e Umidade relativa (%)	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

Variável monitorada	Sensor	Altura ou profundidade (m)	Área experimental
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 -0,1; -0,5; -0,7; -1,0 e -1,5	1* 2
Saldo de radiação (W.m^{-2})	Saldoradiômetro Kipp & Zonen NR-LITE2	11,0	2
Fluxo de calor no solo (W.m^{-2})	Fluxímetro Hukseflux HFP01	-0,1	2
Nível d'água nos poços (m)	Transdutores de pressão Diver Schlumberger	-40,0 e -39,2	1 e 2

*Na área 1, não foram instalados sensores de umidade do solo no solo exposto.

Fonte: Autor.

A precipitação interna, que ocorre abaixo do dossel da cana-de-açúcar (área 1) e do Cerrado *sensu stricto* (área 2), e o escoamento fustal das árvores do Cerrado *sensu stricto* (área 2) foram monitorados de forma manual, utilizando balança de mão calibrada para aferição do volume de água armazenado pelos recipientes dos coletores (Figura 9). A precipitação interna foi medida por calhas de 6 m de comprimento por 0,1 m de largura, posicionadas a 0,5 m da superfície do solo que direcionavam a água para um reservatório com capacidade para 50 L de água. Foram instaladas 6 calhas: 3 abaixo das árvores do Cerrado *sensu stricto* e 3 abaixo da cana-de-açúcar. O escoamento fustal (pelo tronco das árvores) no Cerrado *sensu stricto* foi medido através de 12 coletores instalados em árvores de diferentes diâmetros de tronco na altura do peito (DAP) (Oliveira *et al.*, 2014). Sendo monitoradas 7 árvores com DAP entre 5 e 20 cm e 5 árvores com DAP maior que 20 cm.

Figura 9 – Coletores de precipitação interna (A) e de escoamento fustal (B) instalados no Cerrado *sensu stricto* operados de forma manual.

A

B

Fonte: Autor

3.3. Balanço hídrico e suas componentes

As componentes do balanço hídrico (Equação 5) foram monitoradas ao longo de cinco anos de forma direta, em volume de controle delimitado pelas parcelas experimentais descritas no item 3.3.2, considerando a partir de diferentes técnicas apresentadas a seguir.

$$\frac{dS}{dT} = PP - ET - ES \quad (5)$$

Em que: dS/dT é a variação no armazenamento de água no solo, percolação e escoamento subsuperficial (mm) no período T, que pode ser dia, mês ou ano; PP é a precipitação pluviométrica (mm); ET é a evapotranspiração (mm); e ES é o escoamento superficial (mm).

3.3.1. Precipitação

A precipitação pluviométrica foi monitorada através de pluviômetro de báscula com resolução de 0,254 mm instalado em área livre de interferência da vegetação (acima da cobertura vegetal). Os dados de chuva foram registrados a cada 10 minutos, permitindo a obtenção da intensidade da precipitação e a sua variação ao longo do tempo. Os eventos de precipitação monitorados pelos pluviógrafos foram discretizados de acordo com os critérios estabelecidos por Wischmeier e Smith (1978). Desse modo, os eventos observados, considerados independentes quando não há precipitação superior a 1 mm em 6 horas, foram caracterizados quanto à altura de precipitação, duração e intensidade utilizando o *Rainfall Intensity Summarization Tool* (RIST) (Justice, 2016) desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture* (USDA).

3.3.2. Escoamento superficial

O escoamento superficial foi monitorado em de parcelas experimentais retangulares (5 m de largura, 20 m de comprimento e 9% de declividade), onde o fluxo de água era conduzido por chapas metálicas enterradas a 30 cm de profundidade para sistemas coletores (Figura 10). O volume de água retido no sistema coletor foi medido após cada evento chuvoso e, posteriormente à coleta da amostra de sedimentos em suspensão (Item 3.5), os reservatórios eram esvaziados. O monitoramento do escoamento superficial foi executado em três parcelas para representação adequada da heterogeneidade do fenômeno (Sadeghi *et al.*, 2013).

Figura 10 – Vista superior (A) e lateral (B) do modelo de parcela que foi utilizado para quantificar o balanço hídrico e a erosão do solo em campo, sendo (1) Bordas de chapa metálica; (2) coletor de escoamento superficial; (3) Sistema de tanques e divisores.

Fonte: Morgan (2009)

3.3.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada em escala diária através da equação de Penman-Monteith, disponível no boletim FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) a partir dos dados micrometeorológicos coletados pela estação automática. Em seguida, os valores de ET_o foram multiplicados pelo coeficiente de cultura (K_c) para obtenção da ET_c e, em seguida, pelo coeficiente de estresse hídrico (K_s), conforme Equações 6, 7, 8, 9, 10 e 11 (Allen *et al.*, 1998). Os valores de ET foram estimados para cada cultura (cana-de-açúcar e pastagem).

$$ET = K_s \cdot ET_c = K_s \cdot (K_c \cdot ET_o) \quad (6)$$

Em que: $K_s < 1$ quando há limitação de água para as plantas e $K_s = 1$ quando há água prontamente disponível para consumo, ou seja, a umidade do solo é maior que a capacidade de campo ($\theta_i > \theta_{fc}$). Deve-se realizar esta correção uma vez que a ET diária das culturas não pode ser maior que a disponibilidade de água no solo (Youlton, 2013).

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{(1-p) TAW} \quad (7)$$

Em que: D_r é a depleção na zona de raízes (mm); TAW é a água total disponível no solo na zona de raízes (mm) e p é a fração da TAW que a cultura pode extrair água da zona de raízes sem sofrer estresse hídrico.

$$TAW = 1000(\theta_{fc} - \theta_{wp})Z_f \quad (8)$$

Em que: θ_{fc} é a capacidade de campo; θ_{wp} é o ponto de murcha e Z_f é a profundidade da zona de raízes.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (PP - ES)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + PE_i \quad (9)$$

Em que: $D_{r,i}$ é a depleção na zona de raízes no dia i (mm); $D_{r,i-1}$ é o conteúdo de água na zona de raízes no dia anterior (mm) (a depleção inicial é dada pela Equação 10); PP_i é a precipitação do dia (mm); ES_i é o escoamento superficial do dia i (mm); I_i é a irrigação do dia (mm) (não se aplica na área de estudo pois os cultivos não são irrigados); CR_i é a ascensão capilar da zona saturada para zona de raízes no dia (mm) (não se aplica pois a zona de raízes encontra-se a mais de 1 metro da zona saturada); $ET_{c,i}$ é a evapotranspiração da cultura no dia i (mm) e PE_i é a perda de água para fora da zona de raízes por percolação no dia i (mm) (Equação 11).

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{fc} - \theta_{i-1})Z_f \quad (10)$$

Em que: θ_{fc} é a capacidade de campo, θ_{i-1} é o conteúdo médio de água no solo na zona de raízes (medido através de sensor de umidade) e Z_f é a profundidade da zona de raízes.

$$PE_i = (PP - ES)_i - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (11)$$

Sendo que se a umidade do solo está abaixo da capacidade de campo, não há percolação profunda ($D_{r,i} > 0$ e $PE_i = 0$). A Tabela 10 reúne os dados necessários para o cálculo do coeficiente de estresse hídrico (K_s) e evapotranspiração (Allen *et al.*, 1998; Youlton, 2013; Oliveira, 2014).

Tabela 10 – Variáveis necessárias para o cálculo do balanço hídrico no solo e ET.

Símbolo	Cana-de-açúcar	Pastagem
Z_f (m)	1,2 – 2,0	0,5 – 1,5
p	0,65	0,60
θ_{fc}		0,14
θ_{wp}		0,09
K_c	0,40 – 1,25 – 0,75	0,3 – 0,75 – 0,75

Fontes: Allen *et al.* (1998); Youton (2013); e Oliveira (2014).

A evapotranspiração (ET) do Cerrado *sensu stricto* foi estimada a partir do método de Priestley e Taylor (1972) (Equação 12). Foi necessário utilizar esse método que simplifica o balanço de energia pois não havia instrumentação suficiente para aplicação de outros métodos micrometeorológicos, como a correlação de turbilhões e a Razão de Bowen, considerados adequados para observação da evapotranspiração nas condições da área de estudo. Assim, a Tabela 11 reúne os coeficientes de Priestley e Taylor (α) utilizados no cálculo da evapotranspiração, baseados nos dados de Cabral *et al.* (2015). As estimativas da evapotranspiração utilizando esse método para condições semelhantes às avaliadas neste trabalho podem ser subestimadas em aproximadamente 10% (Vourlitis *et al.*, 2002).

$$ET = \alpha \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[\frac{s(Rn-G)}{s+\gamma} \right] \quad (12)$$

Em que: α é o coeficiente de Priestley e Taylor, λ é o calor latente de vaporização ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), s é a declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Tabela 11 – Coeficientes de Priestley e Taylor do Cerrado *sensu stricto* calculados a partir das observações de Cabral *et al.* (2015) para as quatro efemérides (estações) do ano.

Estação do Ano	Coeficiente de Priestley e Taylor (α)
Verão	1,09
Outono	1,00
Inverno	0,77
Primavera	0,98

Fonte: Calculado pelo autor.

Para o solo exposto, onde não há cobertura vegetal e, portanto, não há transpiração e existe apenas a evaporação da água armazenada nas camadas superficiais do solo (o termo ET é substituído por EV no cálculo do balanço hídrico), foi aplicado o método de Ritchie (1972). O método consiste em duas fases: na primeira, a evaporação do solo é igual à evaporação

potencial do solo (estimada a partir do método de Priestley e Taylor (1972) adaptado para superfície livre) e é limitada apenas pela energia disponível na superfície do solo, não havendo restrição hídrica (precipitação maior que a evaporação); a segunda fase começa quando a evaporação do solo acumulada excede o limite da primeira fase com a diminuição ou ausência de precipitação, e a evaporação passa a ser dada em função do número de dias do início da segunda fase até o solo atingir o mínimo de umidade possível. O ciclo de evaporação é interrompido e retorna para a primeira fase quando a precipitação é igual ou superior a evaporação acumulada na segunda fase.

3.3.4. Residual do balanço hídrico (água no solo)

O residual do balanço hídrico (dS/dT) da Equação 5 foi considerado como a variação do armazenamento de água no solo, percolação e escoamento subsuperficial. Parte desse residual do balanço hídrico que se encontra próxima à zona de raízes pode retornar para a atmosfera pela transpiração das plantas. A variação no armazenamento foi comparada com o conteúdo de água no solo monitorado nos diferentes usos do solo da área experimental, para verificar a confiabilidade do balanço hídrico.

Na zona de maior densidade de raízes do Cerrado *sensu stricto* (Jackson *et al.*, 1996; Giambelluca *et al.*, 2009; Cabral *et al.*, 2015), a água armazenada até 1,5 metros de profundidade foi monitorada através de sensores de umidade do solo do tipo FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) instalados em cinco diferentes profundidades (Tabela 9). Nas parcelas experimentais com pastagem e cana-de-açúcar foram instalados os mesmos sensores FDR em três diferentes profundidades até 1 metro (Tabela 9). Foi considerado que entre dois pontos consecutivos de medida, o conteúdo da água varia linearmente com a profundidade do solo conforme a Equação 13 do método do trapézio (Libardi, 2005).

$$S = \int_0^L \theta(Z) dZ \cong [0,5\theta(Z_0) + \sum_{i=1}^{n-1} \theta(Z_i) + 0,5\theta(Z_n)] \Delta Z \quad (13)$$

Em que: S é a água armazenada no solo diariamente, L é a profundidade analisada, θ é a umidade do solo e Z_i são as profundidades dos sensores.

3.4. Flutuação no nível freático do aquífero

No caso da área de estudo, o nível da superfície livre do aquífero foi registrado duas vezes por dia (9 e 18 horas) por transdutor de pressão, equipado com *datalogger*, instalado em

poço tubular localizado dentro das áreas de pastagem e Cerrado *sensu stricto*. Na região da área de estudo, há indícios de que a condutividade hidráulica nos poços localizados nas áreas 1 e 2 sejam semelhantes de acordo com *slug tests* realizados em setembro de 2017 utilizando a metodologia proposta por Bouwer e Rice (1976). A recarga do aquífero não pôde ser calculada pelo método do WTF (*Water Table Fluctuation*) pois não haviam dados de rendimento específico para os poços instalados na área de estudo.

3.5. Erosão do solo

O sistema de coleta de solo erodido foi o mesmo utilizado para a quantificação do escoamento superficial (Figura 10) em que os sedimentos decorrentes da perda de solo ficavam retidos nas calhas (fração sólida) e nas caixas (fração em suspensão na água do escoamento superficial). Assim, foi possível mensurar a massa de material erodido formando-se as duas frações. A fração sólida era coletada em sacolas plásticas após os eventos chuvosos e levada para o laboratório, onde a massa era aferida e umidade extraída para o cálculo da massa seca. A fração em suspensão na água do escoamento superficial era determinada a partir da aferição do volume de água (etapa realizada em campo) e da concentração dos sedimentos em suspensão retidos nas caixas coletoras de escoamento superficial (etapa realizada em laboratório). Assim, amostrava-se 1 L do conteúdo da caixa após agitação, e no laboratório, o material era colocado em recipientes de vidro e deixados em estufa (105 °C) para remoção da água. O material após secagem tinha a massa aferida, e por fim, calculava-se a concentração de solo em suspensão dividindo a massa pelo volume de água e solo contidos na garrafa de amostragem. Dessa forma, multiplicava-se o volume total do escoamento superficial retido nas caixas coletoras pela concentração de sedimentos em suspensão para a obtenção da fração em suspensão no escoamento superficial de solo erodido.

3.6. Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo

O modelo WEPP é de base física, de parâmetros distribuídos e de simulação contínua, que tem a capacidade de simular a maior parte dos processos do escoamento superficial, da erosão do solo no sulco e entressulco, e de ravinamentos (Flanagan *et al.*, 2012). No contexto deste trabalho, as etapas para calibração, validação e simulação utilizando o WEPP são apresentados na Figura 11. Detalhes das equações governantes do modelo WEPP podem ser encontrados em Nearing *et al.* (1989) e no [Anexo A](#).

Figura 11 – Fluxograma com as etapas metodológicas desenvolvidas na modelagem do escoamento superficial e da erosão dos solos (setas em amarelo são da etapa de calibração e validação, setas em azul representam as etapas de simulação com dados climáticos regionais e setas em vermelho representam as etapas de simulação com dados climáticos futuros).

Fonte: Autor

O modelo WEPP é dividido em quatro principais componentes: *clima*, *solo*, *planta e manejo*, e *topografia*. Eles são descritos por Flanagan *et al.* (2001) e estão resumidos a seguir: Para simulações diárias contínuas, os dados climáticos foram observados ou gerados de forma estocástica para executar as equações governantes do escoamento superficial e da erosão do

solo ([Anexo A](#)). Dados meteorológicos provenientes de observações foram inseridos no WEPP durante as fases de calibração e validação do modelo. Para as simulações, o CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995), um gerador climático baseado na cadeia de Markov para obtenção de séries sintéticas com base nas estatísticas de estimativas ou observações a longo prazo, contendo: precipitação diária, duração média dos eventos chuvosos, intensidade da precipitação, temperatura média e de ponto de orvalho, radiação solar, velocidade e direção do vento.

A infiltração de água no solo e as propriedades de erodibilidade foram inseridas na componente *solo* do modelo. Os principais parâmetros dessa componente são condutividade hidráulica, erodibilidades no sulco e entressulcos, e tensão crítica de cisalhamento. As propriedades do solo puderam ser atribuídas para uma profundidade máxima de 1,8 m como entrada do WEPP na componente solo.

A componente *planta e manejo* do WEPP permitiu ao usuário definir parâmetros relacionados à produção de biomassa e resíduos na superfície do solo, bem como, à interação entre o manejo e os processos ambientais envolvidos na simulação. Por fim, as características topográficas das vertentes modeladas foram inseridas na componente *topografia*. Foram necessárias informações do relevo como comprimento da parcela e declividade do terreno. Durante o processo de calibração, as componentes *clima* e *topografia* foram fixas, não sendo ajustadas de acordo com as saídas no processo iterativo de otimização.

3.6.1. Calibração e validação

O WEPP foi executado no modo de simulação contínua utilizando os dados meteorológicos observados na área de estudo durante 5 anos (2012-2016) no formato *break point data*, com registros de dados a cada 10 minutos. Parâmetros considerados críticos (Flanagan *et al.*, 2012) no modelo foram selecionados para a calibração: na componente *solo* (tensão crítica de cisalhamento, condutividade hidráulica efetiva, erodibilidade no sulco e erodibilidade entressulcos); e na componente *manejo e planta* (coeficiente de energia de biomassa, altura máxima do dossel, profundidade máxima das raízes, coeficiente de cobertura do dossel, rugosidade inicial do solo e cobertura inicial do solo).

A componente *solo* inclui informações sobre a granulometria, densidade aparente, densidade real e condutividade hidráulica no primeiro metro de solo, e outras informações da camada superficial do solo: capacidade de troca catiônica (CTC) e matéria orgânica (Tabela 12). As erodibilidades do solo foram calibradas utilizando os dados observados de perda de solo nas parcelas experimentais sem cobertura (solo exposto) e utilizadas nas calibrações subsequentes realizadas para Cerrado *sensu stricto*, pastagem e cana-de-açúcar. Os outros

parâmetros relacionados ao uso e manejo do solo foram ajustados para cada uso do solo separadamente. Além disso, a calibração para solo exposto não continha parâmetros relacionados ao manejo pois não havia vegetação.

Tabela 12 – Granulometria e propriedades do solo a 14, 30, 60 e 90 cm de profundidade na área de estudo (área 1).

Profundidade	Granulometria (mm)							
	Argila	Silte	Areia					
	< 0,002	0,05–0,002	T 2–0,05	MF 0,10–0,05	F 0,25–0,10	M 0,5–0,25	G 1– 0,5	MG 2–1
cm	g kg ⁻¹							
0-14	88	33	879	333	349	158	22	16
30	101	34	865	87	518	223	31	5
60	126	30	844	90	494	224	32	5
90	125	39	836	90	485	227	31	4

Outras propriedades					
CTC	MO	DA	DR	CH	
mmol dm ⁻³	g kg ⁻¹	g cm ⁻³	g cm ⁻³	mm h ⁻¹	
0-14	40,3	38	-	-	-
30	-	-	1,64	2,64	147,31
60	-	-	1,53	2,65	117,01
90	-	-	1,52	2,65	129,34

MG – muito grossa; G – grossa; M – média; F – fina; MF – muito fina; T – total; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; MO – matéria orgânica; DA – densidade aparente; DR – densidade real; CH – condutividade hidráulica saturada.

Fonte: Youlton (2013) e Oliveira (2014).

O WEPP pode ser aplicado em diversas escalas temporais (evento, mensal e anual). Devido à alta variabilidade entre as repetições das observações, característica comum em dados de escoamento superficial e de perda de solo, optou-se pela escala temporal anual para a utilização do WEPP, pois essa variabilidade tende a diminuir quando os eventos são acumulados anualmente (Wendt *et al.*, 1986). Os dados utilizados na calibração consistem nos totais acumulados anuais de escoamento superficial e erosão do solo. A calibração foi realizada utilizando as observações entre 2012 e 2014 e a validação considerou as observações entre 2015 e 2016. A qualidade dos ajustes para os períodos de calibração e validação, considerando os dados acumulados por estação seca e chuvosa de cada ano, foram avaliadas através do coeficiente de determinação (R^2); da eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE); do desvio padrão do erro quadrático médio RMSE (RSR); e da porcentagem de viés (PBIAS) (Moriassi *et al.*, 2007; Gupta *et al.*, 2009).

O software PEST (*Parameter estimation tool*) (Doherty, 2015) foi utilizado para a otimização dos parâmetros de calibração do WEPP. Assim, foram atribuídos limites superiores e inferiores para os parâmetros selecionados, para evitar a ocorrência de equifinalidades

durante a calibração (Jetten e Maneta, 2011). Equifinalidades ocorrem quando um modelo pode atingir o seu melhor ajuste aos dados observados através de diversas soluções matematicamente possíveis. Os limites e valores iniciais dos parâmetros foram definidos de acordo com os padrões encontrados nas bases de dados do modelo WEPP (Elliot *et al.*, 1989; Nearing *et al.*, 1989), considerando solos com propriedades similares ao da área de estudo e condições de uso e manejo do solo correspondentes aos encontrados nas parcelas experimentais. Entretanto, os limites utilizados para a altura máxima do dossel e profundidade máxima das raízes foram baseados na literatura (Canadell *et al.*, 1996; Oliveira *et al.*, 2005; Garcia-Montiel *et al.*, 2008; Alberton *et al.*, 2014; Youlton *et al.*, 2016b). A minimização dos erros da calibração dos parâmetros foi alcançada utilizando a abordagem do SCE (*Shuffled Complex Evolution*) (Duan *et al.*, 1993).

3.6.2. Simulação com séries sintéticas

Dados climáticos gerados a partir do CLIGEN foram utilizados para simular o escoamento superficial e a erosão do solo durante a fase de simulação. Esses dados de entrada foram baseados em dados de observações históricas inseridos no CLIGEN (Flanagan *et al.*, 2007). As séries sintéticas de 100 anos de duração foram geradas com o CLIGEN para executar o WEPP, que foi previamente calibrado e validado para as condições da área de estudo. Esses procedimentos permitiram a avaliação a longo prazo da variabilidade do escoamento superficial e da erosão do solo utilizando um gerador climático estocástico adequado para aplicações em recursos hídricos (Mehan *et al.*, 2017).

3.6.2.1. Simulação com dados climáticos históricos

Os dados históricos do clima que fornecem os parâmetros para o CLIGEN foram obtidos da estação climatológica da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP) ativa desde 1917 (latitude 22°42'30" S, longitude 47°38'30"O, elevação 546 m a.n.m.²). Os parâmetros necessários, descritos estatisticamente na escala de tempo mensal, foram: precipitação, duração e intensidade máxima da precipitação, temperaturas do ar e do ponto de orvalho, radiação solar, direção e velocidade do vento (Singh *et al.*, 2017). Essa estação possui condições climáticas similares às da área de estudo em termos de precipitação e temperatura, além de possuir 100 anos de observações (1917-2017).

² Acima do nível médio do mar.

3.6.2.2. Simulação com climas futuros

Projeções climáticas obtidas a partir do *downscaling* de Modelos de Circulação Geral ou *General Circulation Models* (GCMs) para a localidade da área de estudo utilizando ferramenta de formatação de parâmetros climáticos para o WEPP (Trotochaud *et al.*, 2016). Os dados de GCMs após o *downscaling* foram obtidos a partir do gerador climático MarkSim DSSAT para criar séries futuras (2030, 2060 e 2090) e atual (*baseline*), considerando diferentes Curvas Representativas de Concentração ou *Representative Concentration Pathways* (RCP), que representam concentrações de gases estufa em diferentes níveis de emissão até 2100. Os dados são diários, sendo compostos por precipitação, temperatura e radiação solar.

Foram consideradas as médias (precipitação e temperatura) do clima base atual (*baseline*) e das projeções entre todos os 17 modelos disponíveis no gerador climático MarkSim DSSAT (BCC-CSM 1.1, BCC-CSM 1.1 m, CSIRO-Mk3.6.0, FIO-ESM, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-H, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MRI-CGCM3 e NorESM1-M). Os quatro níveis de RCPs existentes foram considerados neste estudo: RCP 2.6 (em 2100, aumento de $2,6 \text{ W m}^{-2}$ na radiação solar e pico na concentração de CO_2 de 490 ppm); RCP 4.5 (em 2100, aumento de $4,5 \text{ W m}^{-2}$ na radiação solar e pico na concentração de CO_2 de 650 ppm); RCP 6.0 (em 2100, aumento de $6,0 \text{ W m}^{-2}$ na radiação solar e pico na concentração de CO_2 de 850 ppm); and RCP 8.5 (em 2100, aumento de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ na radiação solar e pico na concentração de CO_2 de 1370 ppm) (Li e Fang, 2016).

Em seguida, os dados foram formatados como parâmetros climáticos de entrada do CLIGEN para a obtenção da componente *clima* necessária para simulação no WEPP. Os cenários projetados do clima foram baseados no quinto relatório anual do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (AR5-IPCC) utilizando múltiplos GCMs, representando a variabilidade das projeções (Wilby *et al.*, 2009; Jones e Thornton, 2013; Ipcc, 2014). Séries estocásticas de 100 anos de duração foram criadas com o CLIGEN a partir dos parâmetros modificados com projeções climáticas. Por fim, o modelo WEPP foi executado utilizando as projeções climáticas, que totalizaram 16 cenários criados a partir da combinação das quatro RCPs (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) e das quatro projeções (atual, 2030, 2060 e 2090).

As mudanças na precipitação, no escoamento superficial e na erosão do solo foram agrupadas de acordo com a direção de suas variações (Δ) obtidas a partir da diferença entre as médias anuais dos climas futuros (2030, 2060 e 2090) com as médias do clima atual (*baseline*) (Nearing *et al.*, 2004). Existem duas opções para cada variável: aumento ou diminuição da

precipitação, do escoamento superficial e da erosão do solo, tornando possível a classificação das simulações utilizando projeções climáticas em oito combinações (grupos) diferentes.

3.7. Análise dos dados

3.7.1. Dados experimentais

Os dados de precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e erosão do solo não violaram a hipótese de normalidade no intervalo de confiança de 95% pelo teste de Shapiro-Wilk. Análise de variância (ANOVA) de um fator foi aplicada para comparar as hipóteses nula e alternativa, que são: igualdade das funções de distribuição das variáveis do balanço hídrico e da erosão do solo dentre os tratamentos considerados (usos do solo); e a diferença entre as funções de distribuição de, pelo menos, dois tratamentos. Além disso, o teste de comparações múltiplas entre os tratamentos (Tukey) foi aplicado (Montgomery, 2008)

O método de Ward (Ward, 1963) para o cálculo da distância euclidiana entre os grupos analisados, divididos por uso do solo, foi utilizado conforme realizado por Nacinovic *et al.* (2014). Através dessa técnica, foi possível verificar a distância dos grupos de forma hierárquica dos dados de escoamento superficial e erosão do solo. Os resultados foram expressos na forma gráfica por dendogramas, que mostraram os níveis de similaridade entre os usos do solo para o escoamento superficial e para erosão do solo, observados na área de estudo.

As diferenças relativas entre as repetições das parcelas experimentais contendo os usos do solo avaliados neste trabalho foram quantificadas de forma adimensional pela Equação 14 (Nearing *et al.*, 1999) para os dados observados de escoamento superficial e erosão do solo. Em seguida, os valores foram plotados em relação ao valor médio observado por amostragem.

$$DF = 100 * \frac{M_i - \bar{M}}{\bar{M}} \quad (14)$$

Em que: M é o valor observado nas parcelas experimentais contendo o mesmo uso do solo (escoamento superficial ou erosão do solo) e i é a repetição.

Os ganhos e perdas no balanço hídrico e os efeitos no controle da erosão do solo resultantes da substituição do Cerrado *sensu stricto* por solo exposto, pastagem ou cana-de-açúcar foram indicados em um quadro resumo (Frank *et al.*, 2014; Ghimire *et al.*, 2014). Os efeitos da foram representados pela diferença do residual do balanço hídrico entre cada uso agrícola do solo e o Cerrado *sensu stricto* (Equação 15). Os efeitos na erosão do solo em

decorrência da substituição do Cerrado *sensu stricto* por outros usos do solo foram expressos pelas diferenças entre as taxas anuais médias de perda de solo ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Equação 16).

$$\text{Efeitos}(\text{dS})_{\text{uso } i} = (\text{dS}_{\text{cerrado s.s.}} - \text{dS}_{\text{uso } i}) \quad (15)$$

$$\text{Efeitos}(\text{ER})_{\text{uso } i} = (\text{ER}_{\text{cerrado s.s.}} - \text{ER}_{\text{uso } i}) \quad (16)$$

Em que: dS é a variação no armazenamento de água no solo (mm ano^{-1}); ER é a taxa anual de perda de solo ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); uso i é o uso do solo que substituiu o Cerrado *sensu stricto* (solo exposto, pastagem ou cana-de-açúcar).

3.7.2. Dados simulados

Os dados de escoamento superficial e erosão do solo não violaram a hipótese de normalidade no intervalo de confiança de 99% pelo teste de Shapiro-Wilk. Análise de variância (ANOVA) de dois fatores foi aplicada para comparar as hipóteses nula e alternativa, que são: igualdade das funções de distribuição precipitação, escoamento superficial e erosão do solo dentre os tratamentos considerados (usos do solo e projeções climáticas); e a diferença entre as funções de distribuição de, pelo menos, dois tratamentos. Além disso, o teste de comparações múltiplas entre os tratamentos (Tukey) foi aplicado (Montgomery, 2008).

CAPÍTULO IV

Resultados e discussão

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Componentes do balanço hídrico

4.1.1. Precipitação

A precipitação média anual observada na área de estudo entre os anos de 2012 e 2016 foi de 1388 mm (Figura 12), aproximadamente 100 mm a menos que a média observada na região nos últimos 37 anos (Cabrera *et al.*, 2016) devido ao período de seca anômala que aconteceu em 2014 (Getirana, 2015), evidenciada pela baixa pluviosidade no mês de janeiro, que em geral, é o auge da estação chuvosa.

Figura 12 – Precipitação mensal ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).

Fonte: Autor

A precipitação interna no Cerrado *sensu stricto* (soma do escoamento fustal e das calhas de interceptação), que é a chuva que efetivamente chega ao sub-bosque, totalizou aproximadamente 73% da precipitação, ou seja, 27% da precipitação foi interceptada pelo

dossel. Menos de 1% da precipitação que atingiu o Cerrado *sensu stricto* escoou através dos troncos das árvores atingindo o solo, concordando com resultados de trabalhos anteriores (Oliveira *et al.*, 2015; Honda e Durigan, 2016), que reportaram o elevado grau de dificuldade em conhecer essas variáveis experimentalmente e a baixa significância no balanço hídrico. Na cana-de-açúcar, as calhas instaladas para monitoramento da precipitação interna não apresentaram resultados coerentes, os quais não foram considerados nesse estudo.

4.1.2. Escoamento superficial

O escoamento superficial foi a menor componente do balanço hídrico e a que sofreu maior influência do uso do solo (Figura 13) e apresentou concordância com os registros de erosão do solo. Observou-se que nos meses de agosto não houveram eventos chuvosos que ocasionaram escoamento superficial. No mês de julho, apenas o solo exposto foi sensível aos eventos de precipitação para geração de escoamento superficial. Os meses de janeiro, fevereiro e março apresentaram as maiores médias. Os dados brutos de escoamento superficial de cada evento amostral, bem como as características dos eventos de precipitação correspondentes, foram apresentados no [Apêndice B](#).

O Cerrado *sensu stricto* apresentou a menor taxa de escoamento superficial dentre os tratamentos avaliados, devido à maior proteção do solo, que evitou a formação do escoamento superficial. Taxas de escoamento superficial nessa ordem de grandeza são comuns em áreas com vegetação arbustiva e florestas (Dedecek, 1989; Silva *et al.*, 2011; Oliveira, 2012; Nacinovic *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015). Além disso, a serrapilheira, que é a camada de material orgânico proveniente da vegetação depositada na superfície do solo, ajuda a diminuir a formação do escoamento superficial. A remoção dessa camada pode aumentar o escoamento superficial em até 50% (Gomyo e Kuraji, 2017).

O escoamento superficial na pastagem apresentou valores significativamente maiores que a cana-de-açúcar e o Cerrado *sensu stricto*, pois ocorre a compactação das camadas superficiais do solo devido à presença do gado. A ordem de grandeza dos valores registrados condiz com resultados previamente divulgados (Saraiva *et al.*, 1981; Dedecek, 1986; Silva *et al.*, 2011; Rieger *et al.*, 2014). Como a presença de animais é variável ao longo do tempo e trata-se de pecuária extensiva, a variabilidade nas taxas de escoamento superficial foi elevada, pois as condições de compactação do solo e da vegetação ao longo das parcelas experimentais pode ser heterogênea (Nacinovic *et al.*, 2014).

O escoamento superficial na cana-de-açúcar ainda é pouco estudado apesar da importância econômica para o país. Os valores de escoamento superficial encontrados para esse

cultivo na área de estudo condizem com os resultados previamente reportados (Oliveira *et al.*, 2016; Youlton *et al.*, 2016b). As maiores taxas de escoamento superficial na cana-de-açúcar de açúcar ocorrem logo após o plantio ou a colheita, nos primeiros meses do ano, quando o solo está descoberto.

Figura 13 – Escoamento superficial mensal ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).

Fonte: Autor

A análise de cluster para o escoamento superficial (Figura 14) mostrou que houve maior similaridade entre solo exposto e pastagem (86,91%) e entre cana-de-açúcar e Cerrado *sensu stricto* (86,50%). Entretanto, a proximidade entre as taxas de escoamento superficial do solo exposto e da pastagem foram ligeiramente maiores. Os resultados concordaram com o trabalho realizado por Nacinovic *et al.* (2014), que evidenciou que a pastagem apresenta comportamento diferente de outros tipos de vegetação, como floresta nativa e olericultura.

Figura 14 – Distância Euclidiana (Método de Ward) do escoamento superficial (ES) entre diferentes usos do solo.

Fonte: Autor

Os dados adquiridos em 140 coletas realizadas entre 2012 e 2016 produziram 1665 valores para escoamento superficial nas 3 repetições dos 4 tratamentos considerados (12 parcelas experimentais). A diferença entre as repetições tendeu a ser menor que a magnitude do escoamento superficial medido para cada tratamento (média entre as três repetições) em 91% dos valores amostrados. Além disso, a variação entre as repetições diminuiu com o aumento do escoamento superficial medido após a ocorrência de eventos de precipitação (Figura 15). Por exemplo, medidas de escoamento superficial com valores próximos a zero variaram até 200% entre as repetições e valores próximos de 20 mm apresentaram diferenças relativas próximas de zero.

Em média, o escoamento superficial variou 41% entre as repetições por tratamento. O uso do solo que apresentou a maior variabilidade foi a cana-de-açúcar (em média 52%) devido ao ciclo da cultura e manejo do solo, que alteraram significativamente as condições do solo para geração do escoamento superficial. A menor variabilidade observada foi no solo exposto (em média 33%), que, dentre os usos do solo analisados, foi o mais homogêneo nas condições de formação do escoamento superficial. Devido à variabilidade característica desse tipo de observação, modelos matemáticos que estimem o escoamento superficial deveriam ser capazes de simular essas variações naturais (Wendt *et al.*, 1986; Gómez *et al.*, 2001).

Figura 15 – Diferenças relativas entre as repetições das parcelas experimentais para o escoamento superficial medido em cada amostragem (coleta).

Fonte: Autor

4.1.3. Evapotranspiração

As estimativas da evapotranspiração foram obtidas a partir de diferentes métodos: no Cerrado *sensu stricto*, utilizou-se o método de Priestley e Taylor (1972); na pastagem e na cana-de-açúcar, empregou-se o método da FAO 56 (Allen *et al.*, 1998); e no solo exposto, a evaporação foi calculada com o método de Ritchie (1972). A evapotranspiração foi diferente entre os usos do solo analisados (Figura 16). Observou-se que o Cerrado *sensu stricto* possuiu as maiores taxas de evapotranspiração e a menor variabilidade ao longo do ano. Devido ao maior consumo de água durante a fase inicial do ciclo anual da cana-de-açúcar, a sua evapotranspiração foi maior que a da pastagem, sendo mais suscetível às condições da vegetação, que teve maior controle dos processos envolvidos na evapotranspiração que o Cerrado *sensu stricto* (Ruhoff *et al.*, 2009).

Figura 16 – Evapotranspiração mensal ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).

Fonte: Autor

Durante a estiagem (mês de agosto), com exceção do Cerrado *sensu stricto*, nos outros usos do solo (pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto) a evapotranspiração atingiu níveis próximos a zero. Nos casos da cana-de-açúcar e da pastagem, os valores mínimos foram alcançados quando não havia água no solo para consumo das plantas, evidenciado pela variação do Ks, que governou a evapotranspiração nessas estimativas (Figura 17). O Ks é crucial para obtenção da evapotranspiração, porém, incertezas associadas ao método devem ser objeto de investigação (Lima *et al.*, 2001; Katerji *et al.*, 2011). Apesar disso, é evidente o controle que o conteúdo de água no solo e o uso e manejo do solo exercem sob a evapotranspiração e as sondas FDR auxiliam nesse monitoramento (Ihuoma e Madramootoo, 2017).

Figura 17 - Coeficientes de cultura (K_c) e de estresse hídrico (K_s) para pastagem e cana-de-açúcar ao longo do período de monitoramento (2012-2016).

Fonte: Autor

Observou-se concordância dos dados estimados de evapotranspiração com observações realizadas no Brasil utilizando a técnica da correlação de turbilhões (*eddy covariance*) (Tabela 2), considerada padrão para este tipo de medição (Wang e Dickinson, 2012). As estimativas para o Cerrado *sensu stricto* concordam com os dados publicados por Cabral *et al.* (2015), mas discordam das medições realizadas por Giambelluca *et al.* (2009) e Da Rocha *et al.* (2009). Assim, nesse uso do solo, são necessários mais estudos para melhor entender esta componente do ciclo hidrológico. A cana-de-açúcar teve estimativas próximas ao reportado por Cabral *et al.* (2012). A pastagem também teve valores estimados concordantes com a literatura (Sakai *et al.*, 2004).

Estima-se que, aproximadamente, 40% da evapotranspiração que ocorre na região do bioma Cerrado, onde está inserida a área de estudo, é responsável pela precipitação de áreas adjacentes ao sul (Van Der Ent *et al.*, 2010). A razão de reciclagem da evapotranspiração no Brasil diminui gradativamente do norte para o sul, e a região central, que inclui grande parte do Cerrado Brasileiro, desempenha importante função na manutenção desses fluxos de umidade provenientes da Amazônia, que mantêm a precipitação das regiões ao sul (Spangler *et al.*, 2017).

4.1.4. Variação do armazenamento de água no solo

A variação do armazenamento de água no solo, no caso deste estudo, foi o residual do balanço hídrico (Equação 5), que representou os excedentes (valores positivos) ou déficits (valores negativos) de água no solo (Figura 18). Apenas o Cerrado *sensu stricto* apresentou períodos de déficit hídrico nos meses de baixa ou nenhuma precipitação (período seco). Isso se deveu ao fato de que os outros usos do solo avaliados cessaram a transferência de água para atmosfera pela evapotranspiração, pois não tinham condições de retirar água de maiores profundidades da zona não saturada devido às raízes menos profundas e fisiologia vegetal da parte aérea das plantas.

Figura 18 – Variação do armazenamento de água mensal no solo ao longo do período de monitoramento da área de estudo (2012-2016).

Fonte: Autor

Dentre os quatro usos do solo analisados, o Cerrado *sensu stricto*, a pastagem e a cana-de-açúcar possuíram monitoramento do conteúdo de água no solo (S) através de sondas FDR (Figura 19). O Cerrado *sensu stricto* foi monitorado até 1,5 de profundidade e os demais usos do solo (cana-de-açúcar e pastagem) tinham sensores até 1,0 metro de profundidade, justificando o maior conteúdo de água no solo (S) registrado no Cerrado *sensu stricto*. Observou-se que, em todos os tratamentos, a variação no armazenamento de água no solo (dS), dado pelo residual do balanço hídrico, apresentou a mesma tendência do conteúdo de água no solo (S) (Youlton, 2013; Oliveira *et al.*, 2015). O Cerrado *sensu stricto* teve comportamento diferente para S, pois a profundidade monitorada foi maior e o sistema radicular teve maior influência sobre o conteúdo de água no solo, por ser mais profundo em relação aos outros usos do solo avaliados, viabilizando a ocorrência da evapotranspiração mesmo nos meses mais secos (junho, julho, agosto e setembro). Dessa maneira, confirmou-se que as componentes do ciclo hidrológico podem ser alteradas quando vegetações densas e arbustivas são substituídas por gramíneas e cultivos agrícolas (Oliveira *et al.*, 2005). No mês de janeiro de 2014, devido à estiagem atípica que ocorreu naquele ano, observou-se que o residual do balanço hídrico chegou próximo de zero.

Figura 19 – Comparação entre o conteúdo médio mensal de água no solo medido através de sondas FDR (S) e a variação média mensal do armazenamento de água no solo (dS) (residual do balanço hídrico) para Cerrado *sensu stricto* (A) (sondas FDR instaladas até 1,5 m), cana-de-açúcar (B) (sondas FDR instaladas até 1,0 m) e pastagem (C) (sondas FDR instaladas até 1,0 m) entre 2012 e 2016.

Fonte: Autor

4.2. Balanço hídrico

As componentes do balanço hídrico para cada uso do solo avaliado apresentaram comportamentos distintos (Tabela 13). Verificou-se com o teste de comparações múltiplas (Tukey) que a variação do armazenamento no Cerrado *sensu stricto* foi estatisticamente diferente dos demais usos do solo (pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto), que apresentaram médias similares. A evapotranspiração do Cerrado *sensu stricto* foi maior que as demais, que por sua vez são diferentes entre si. Entretanto, a pastagem apresentou similaridades com cana-de-açúcar e solo exposto, que por sua vez, foram diferentes entre si. Em relação ao escoamento superficial, somente o solo exposto apresentou diferença significativa em relação aos outros usos do solo. Portanto, os resultados concordam com estudos anteriores, em que o uso do solo exerce funções regulatórias no ciclo hidrológico, e a vegetação nativa possui o papel de equilíbrio dos fluxos de água e energia (Krishnaswamy *et al.*, 2013; Nobrega *et al.*, 2017).

Tabela 13 – Média e desvio padrão anuais das componentes do balanço hídrico para o período de 2012 a 2016 na área de estudo.

Uso do solo	Componentes do balanço hídrico (mm ano ⁻¹)			
	PP	dS	ET	ES
Cerrado s.s.		185±182 ^b	1201±49 ^a	2±2 ^c
Pastagem	1388±188	702±153 ^a	641±59 ^{bc}	45±26 ^b
Cana-de-açúcar		700±117 ^a	672±66 ^b	16±18 ^c
Solo exposto		769±96 ^a	482±40 ^c	137±62 ^a
Natureza dos dados	Observado	Residual	Estimado	Observado

dS: variação no armazenamento de água no solo; PP: precipitação; ET: evapotranspiração; ES: escoamento superficial; letras idênticas indicam diferenças não significativas entre as médias da mesma coluna (P valor > 0,05).

Fonte: Autor.

Dentre as variáveis do ciclo hidrológico, a precipitação (PP) e o armazenamento de água no solo (dS) foram as componentes do balanço hídrico tiveram a maior variação ao longo do período estudado (Figura 20). Observou-se que a cana-de-açúcar e a pastagem possuem semelhanças no comportamento e nas ordens de magnitude das componentes do balanço hídrico. Já o Cerrado *sensu stricto* e o solo exposto apresentaram características que os diferenciam dos demais usos do solo avaliados.

Figura 20 – Balanço hídrico anual para o período de 2012 a 2016 na área de estudo.

Fonte: Autor

O balanço hídrico acumulado (Figura 21) evidenciou que a evapotranspiração é a componente do ciclo hidrológico que governa a distribuição de água nos diferentes usos do solo. No solo exposto, em que o escoamento superficial foi maior e as perdas de água por evaporação foram menores, o residual do balanço hídrico se tornou maior em relação aos demais usos do solo avaliados. O Cerrado *sensu stricto* foi a condição em que o balanço hídrico ao longo do tempo teve o residual mais próximo de zero, evidenciando uma situação de equilíbrio. A cana-de-açúcar e a pastagem, como mencionado anteriormente, apresentaram comportamentos muito similares, apesar de a pastagem apresentar perdas por escoamento superficial maiores. Entretanto, o escoamento superficial possui a menor ordem de grandeza dentre as componentes do balanço hídrico.

Figura 21 - Balanço hídrico acumulado para Cerrado *sensu stricto* (A), pastagem (B), cana-de-açúcar (C) e solo exposto (D) no período de 2012 a 2016.

Fonte: Autor

O balanço hídrico ao longo dos 60 meses de monitoramento entre 2012 e 2016 pode ser visualizado para cada uso do solo avaliado (Cerrado *sensu stricto*, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto) nas Figuras 22 e 23, 24 e 25, respectivamente. Os dados mensais do balanço hídrico para cada uso do solo estão relacionados no [Apêndice C](#). Observou-se que no Cerrado *sensu stricto*, a vegetação adaptou-se ao período seco com a redução gradual da demanda de água pela evapotranspiração e o decréscimo no armazenamento de água no solo, que se tornou negativo à medida que as reservas acumuladas durante o período chuvoso foram consumidas (Oishi *et al.*, 2010; Christoffersen *et al.*, 2014; Cabral *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2015).

Figura 22 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em Cerrado *sensu stricto* ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; ET – evapotranspiração; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.

Fonte: Autor

Figura 23 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em pastagem ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; ET – evapotranspiração; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.

Fonte: Autor

Figura 24 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em cana-de-açúcar ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; ET – evapotranspiração; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.

Fonte: Autor

Figura 25 – Balanço hídrico das parcelas experimentais em solo exposto ao longo do período de monitoramento (2012-2016), em que: PP – precipitação; EV – evaporação; ES – escoamento superficial; dS – armazenamento de água no solo.

Fonte: Autor

4.3. Flutuação do nível freático do aquífero

A variação do nível freático do aquífero na área de Cerrado *sensu stricto* foi menor que na área de pastagem, sendo inferior a 1 metro por ano, provavelmente devido aos períodos de déficit hídrico que ocorrem nas épocas com menor volume de precipitação (Figura 26). No Cerrado, houveram mais períodos de escassez hídrica devido à alta demanda por água da vegetação densa com raízes mais profundas do que a pastagem. Mesmo havendo recarga do aquífero em quantidade semelhante ao fluxo lateral, o nível não é alterado, inviabilizando a aplicação do método do WTF (Healy e Cook, 2002; Wendland *et al.*, 2007). Observou-se que na pastagem, que tem praticamente a mesma espessura de zona não saturada e apresenta condutividade hidráulica semelhante ao poço na área de Cerrado, ocorreram variações no nível do aquífero na ordem de 2 a 3 metros por ano, devido ao grande excedente de água do balanço hídrico. Assim a evapotranspiração e a profundidade das raízes controlaram a quantidade de água que escoou verticalmente através da zona não saturada, e contribuindo para a recarga do aquífero (Finch, 1998; Krishnaswamy *et al.*, 2013; Domínguez *et al.*, 2016). Além disso, em áreas de Cerrado nativo, estimou-se que a taxa de recarga do aquífero decresce, quanto maior a densidade da vegetação (Oliveira *et al.*, 2017).

Figura 26 – Residual do balanço hídrico no Cerrado *sensu stricto* (A) e na pastagem (B), em que as áreas em azul representam o excedente hídrico (dS); as áreas em vermelho representam déficit hídrico; linha sólida preta representa o nível freático do aquífero.

Fonte: Autor

4.4. Erosão do solo

A variabilidade dos processos erosivos foi mais alta nos meses chuvosos (entre outubro e março), em especial na cana-de-açúcar, e no mês de agosto não houveram eventos que

causaram erosão do solo devido à estiagem (Figura 27). Além disso, o solo exposto apresentou ordem de magnitude superior aos demais usos do solo avaliados. Em suma, as observações em parcelas experimentais ao longo dos 5 anos de monitoramento revelaram que o solo exposto perde em média $16,00 \pm 5,97 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de solo, seguido pela cana-de-açúcar ($0,64 \pm 0,49 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), Cerrado *sensu stricto* ($0,14 \pm 0,06 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e pastagem ($0,11 \pm 0,04 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Os dados brutos de erosão do solo de cada evento amostral, bem como as características dos eventos de precipitação correspondentes, foram apresentados no [Apêndice B](#). A discussão mais aprofundada sobre o comportamento dos dados de erosão do solo foi inserida na seção 4.6.

Figura 27 – Erosão do solo mensal ao longo do período de monitoramento (2012-2016).

Fonte: Autor

Foram registrados 568 eventos chuvosos considerados erosivos pelo critério de Wischmeier e Smith (1978) durante o período do estudo (2012-2016) (Tabela 14). Observou-se que o ano de 2014 (precipitação total de 1084 mm) registrou o menor número de eventos erosivos. Por outro lado, o ano de 2015 teve o maior número de eventos, apesar de não ter sido o mais chuvoso. A possível justificativa para esse fato foi a ocorrência do fenômeno El-Niño-

Oscilação Sul (ENOS) nos anos de 2015-2016, que afetou os regimes de chuva em regiões tropicais e de latitudes médias, aumentando a intensidade dos eventos (Avery *et al.*, 2017).

Tabela 14 – Precipitação e número de eventos que causaram escoamento superficial e erosão do solo nas parcelas experimentais nos anos monitorados.

Ano	Precipitação (mm ano ⁻¹)	Número de eventos erosivos
2012	1588	129
2013	1405	147
2014	1084	112
2015	1483	181
2016	1381	128
Média	1388	139

Fonte: Autor.

Os dados adquiridos em 140 coletas realizadas entre 2012 e 2016 produziram 1665 valores para erosão do solo nas 3 repetições dos 4 tratamentos considerados (12 parcelas experimentais). Em média, foram acumulados 5 eventos erosivos por coleta, devido à logística para realização da amostragem e às condições meteorológicas. A diferença relativa entre as repetições tendeu a ser menor que a magnitude da erosão do solo medida para cada tratamento (média entre as três repetições) em 96% dos valores amostrados. Além disso, a variação entre as repetições diminuiu com o aumento da erosão do solo medida após a ocorrência de eventos de precipitação (Figura 28). Por exemplo, medidas com valores próximos a zero variaram até 200% entre as repetições e valores próximos de 3 t ha⁻¹ variaram na faixa de 50%.

Em média, a erosão do solo variou 31% entre as repetições por tratamento, concordando com valores previamente reportados por Oliveira *et al.* (2015). O uso do solo que apresentou maior variação entre as repetições foi o Cerrado *sensu stricto* (em média 38%) e a menor variação ocorreu na cana-de-açúcar (em média 26%). Esses resultados implicam na necessidade de melhoria no design experimental para quantificação da erosão do solo e na utilização de dados observados na calibração e validação de modelos preditivos (Wendt *et al.*, 1986; Nearing *et al.*, 1999).

Figura 28 – Diferenças relativas entre as repetições das parcelas experimentais para a erosão do solo medidas em cada amostragem (coleta).

Fonte: Autor

Quando os dados de erosão do solo e de escoamento superficial foram combinados em um gráfico de dispersão (Figura 29), observou-se que os pontos se agruparam por uso do solo, sendo facilmente identificáveis devido às diferentes condições de uso do solo (Keesstra *et al.*, 2016a). Além disso, verificou-se a tendência de que a erosão do solo aumentou com o escoamento superficial. Porém, as parcelas cobertas por pastagem apresentaram alta variabilidade de escoamento superficial para taxas similares de perda de solo, evidenciando que, nesse uso do solo, a erosão está ligada às características dos eventos chuvosos e às condições da vegetação.

Figura 29 – Relação entre o escoamento superficial e a erosão do solo observados em parcelas experimentais entre 2012 e 2016.

Fonte: Autor

A distância Euclidiana entre os dados de erosão do solo agrupados por uso do solo foi menor entre a cana-de-açúcar e a pastagem (Figura 30). Esses dois usos do solo agruparam-se com as taxas de perda de solo do solo exposto (83,00% de similaridade), e o Cerrado *sensu stricto* foi o grupo mais distante dos demais (76,04% de similaridade).

Figura 30 – Distância Euclidiana (Método de Ward) da erosão do solo (ER) entre diferentes usos do solo.

Fonte: Autor

4.5. Considerações sobre os erros e incertezas nas medições e estimativas das componentes do balanço hídrico e da erosão do solo

As incertezas podem ser vistas como as imperfeições das informações disponíveis em representar a realidade e depende do nível de conhecimento das variáveis que estão sendo estudadas (Refsgaard *et al.*, 2007). Nesta etapa experimental, as fontes de incertezas nas medições e estimativas foram comentadas a seguir para cada variável:

A precipitação na área de estudo foi medida através de pluviômetros de balsa com resolução de 0,254 mm. Os principais erros de medição foram causados por obstrução do funil que direciona a precipitação para a balsa e por falhas no sistema de coleta de dados. O erro das medições pode chegar até $\pm 3\%$ de acordo com o fabricante, dependendo da intensidade de precipitação.

O escoamento superficial e a erosão do solo foram medidos através das parcelas experimentais em três repetições por uso do solo avaliado. As principais fontes de incerteza estão nos erros de medição, por se tratar de um sistema operado manualmente, e na variabilidade entre as repetições, causada pela heterogeneidades das condições da superfície do solo (Wendt *et al.*, 1986; Nearing *et al.*, 1999; Gómez *et al.*, 2001; Sadeghi *et al.*, 2013). Como reportado anteriormente, as variações médias entre as repetições foram de 41% para o escoamento superficial e de 31% para erosão do solo.

A evapotranspiração foi estimada para todos os usos do solo. O método da FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) aplicado para as parcelas experimentais de pastagem e cana-de-açúcar. As incertezas no cálculo da evapotranspiração por esse método variam entre 10% e 40% e dependem principalmente da acurácia das medições de temperatura, radiação solar e umidade relativa (Westerhoff, 2015). Entretanto, as estimativas foram corrigidas com dados de umidade do solo (monitorados através de sondas FDR) para o cálculo do coeficiente de estresse hídrico, aumentando a confiabilidade das estimativas. O método de Priestley e Taylor (1972) utilizado no cálculo da evapotranspiração do Cerrado *sensu stricto* pode resultar em estimativas com erros de aproximadamente 10% em relação aos dados observados (Vourlitis *et al.*, 2002). A evaporação estimada para o solo exposto (superfície livre, sem vegetação) pode apresentar valores subestimados em até 11% (Cabrera *et al.*, 2016), com os métodos utilizados (Priestley e Taylor, 1972; Ritchie, 1972).

4.6. Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo

4.6.1. Calibração e validação

Em comparação às observações em campo de 2012 a 2014, utilizando o modelo WEPP, foram calculados o escoamento superficial e a erosão do solo depois da otimização com a abordagem do SCE durante a calibração. Em seguida, na etapa de validação, os parâmetros otimizados para cada uso do solo (Tabela 15) produziram estimativas aceitáveis de acordo com a avaliação de desempenho apresentada ao longo desta seção.

Tabela 15 – Parâmetros do WEPP calibrados para as condições da área de estudo.

Componente	Parâmetro	Unidade	Usos do solo			
			Solo exposto	Cerrado <i>sensu stricto</i>	Pastagem	Cana-de-açúcar
Solo	cs	Pa	0,68	3,36	4,04	3,36
	ke	mm.h ⁻¹	67,40	149,93	17,15	82,21
	ki	kg.s.m ⁻⁴	3,46E+06	3,46E+06	3,46E+06	3,46E+06
	kr	10 ³ s.m ⁻¹	22,79	22,79	22,79	22,79
Manejo	beinp	kg.MJ ⁻¹	-	2,44	12,03	0,85
	hmax	m	-	6,01	0,10	3,12
	rdmax	m	-	6,04	0,10	0,51
	bb	%	-	30,22	6,85	26,04
	rrinit	cm	-	3,05	2,52	2,22
	cov	%	-	40,24	56,87	82,99

Descrição dos parâmetros: cs – tensão crítica de cisalhamento; ke – condutividade hidráulica efetiva; ki – erodibilidade do solo entressulcos; kr – erodibilidade do solo no sulco; beinp – coeficiente de energia de biomassa; hmax – altura máxima do dossel; rdmax – profundidade máxima das raízes; bb – coeficiente de cobertura vegetal; rrinit – rugosidade inicial do solo; cov – cobertura inicial do solo.

Fonte: Autor.

As observações e estimativas do escoamento superficial e da erosão do solo acumulados ao final das vertentes (parcelas experimentais) durante os períodos de calibração e validação foram computados anualmente (Tabela 16). Na área de Cerrado *sensu stricto*, os valores estimados pelo WEPP nessa condição concordaram com a média observada ao longo dos anos de monitoramento. Entretanto, devido aos baixos valores de escoamento superficial e erosão do solo característicos dessas áreas, a representação das variabilidades do escoamento superficial e da erosão do solo ainda podem ser objetos de investigação.

Tabela 16 – Observações em campo e estimativas do WEPP para escoamento superficial e erosão do solo durante o período de calibração e validação do modelo (2012-2016).

Uso do solo	Ano	Precipitação (mm ano ⁻¹)	Escoamento superficial (mm ano ⁻¹)		Erosão do solo (t.ha ⁻¹ ano ⁻¹)	
		Observado	Observado	Modelado	Observado	Modelado
Solo exposto	2012	1587	202	115	16,63	20,92
	2013	1405	141	154	13,11	18,56
	2014	1084	51	109	6,87	10,90
	2015	1483	180	164	22,33	23,68
	2016	1381	115	148	21,72	15,86
Cerrado <i>sensu stricto</i>	2012	1587	5	0	0,25	0,00
	2013	1405	2	2	0,11	0,10
	2014	1084	1	0	0,06	0,00
	2015	1483	2	0	0,17	0,00
	2016	1381	2	45	0,13	0,08
Pastagem	2012	1587	30	29	0,16	0,03
	2013	1405	54	49	0,06	0,08
	2014	1084	9	41	0,06	0,05
	2015	1483	77	55	0,14	0,05
	2016	1381	55	63	0,13	0,02
Cana-de-açúcar	2012 ¹	1587	46	43	1,47	2,10
	2013 ²	1405	11	9	0,25	0,88
	2014 ²	1084	4	2	0,51	0,60
	2015 ¹	1483	12	17	0,58	0,31
	2016 ²	1381	7	46	0,35	0,05

1: anos de plantio da cana-de-açúcar; 2: anos de rebrota da cana-de-açúcar (cana soca).

Fonte: Autor.

Nas condições de solo exposto, as discordâncias entre dados observados e estimados podem ser explicadas pela dificuldade na manutenção do solo em preparo, sem a presença de plantas daninhas. A cana-de-açúcar também sofreu diversas intervenções ao longo do experimento, e os resíduos (palhada) deixados após as colheitas influenciaram diretamente a produção de escoamento superficial e a erosão do solo, com a diminuição nos anos de rebrota da cana-de-açúcar (2013, 2014 e 2016). Os serviços realizados nesses tratamentos estão detalhados no [Apêndice D](#).

A avaliação do desempenho do WEPP para as estimativas de escoamento superficial e erosão do solo foram expressos por métricas estatísticas calculadas considerando os períodos secos e chuvosos dos 5 anos de monitoramento (2012-2016) (Tabela 17). As estimativas para erosão do solo encontram-se mais perto do observado que os valores estimados do escoamento superficial, porém ambos apresentaram resultados aceitáveis durante as fases de calibração e validação, evidenciado pelo NSE maior que 0,50. De acordo com os valores de PBIAS, o WEPP subestimou em 4% o escoamento superficial e superestimou em 11% a erosão do solo para todo o período observado nas parcelas experimentais da área de estudo. Em geral, os períodos de validação apresentaram resultados estatisticamente melhores que a fase de calibração.

Tabela 17 – Avaliação do desempenho do WEPP para as estimativas de escoamento superficial e erosão do solo.

Período	Escoamento superficial				Erosão do solo			
	R ²	NSE	RSR	PBIAS	R ²	NSE	RSR	PBIAS
Calibração (2012-2014)	0,79	0,77	0,48	20%	0,92	0,64	0,60	-37%
Validação (2015-2016)	0,86	0,84	0,40	-35%	1,00	0,93	0,27	31%
Todo período (2012-2016)	0,77	0,79	0,46	4%	0,85	0,80	0,45	-11%

R² - coeficiente de determinação; NSE – Eficiência de Nash–Sutcliffe; RSR – Desvio padrão do RMSE; RMSE – Erro quadrático médio; PBIAS – Porcentagem de viés.

Fonte: Autor.

O gráfico de dispersão contendo dados simulados e observados (Figura 31) mostrou que o WEPP realmente superestimou o escoamento superficial e a erosão do solo, fato confirmado pelos valores negativos do PBIAS. Além disso, as estimativas para erosão do solo concordaram mais com os dados observados que o escoamento superficial. O NSE indicou que a erosão do solo está mais próxima da linha 1:1 que o escoamento superficial. Entretanto, ambos apresentaram concordância com os dados observados. Os valores de RSR, que refletem a normalização do RMSE, provaram que o WEPP apresentou valores aceitáveis de erro das estimativas nas fases de calibração e validação. O grau de colinearidade entre observações e estimativas, expresso pelo R² maior que 0,5, mostrou que os resultados das estimativas foram aceitáveis (Moriassi *et al.*, 2007). Consequentemente, o ajuste do modelo para as condições da área de estudo localizada no Sudeste brasileiro pode ser útil para delinear áreas adequadas para cultivos agrícolas, pastagem e vegetação nativa, no sentido de manter a reserva de recursos naturais e assegurar o desenvolvimento econômico de áreas agrícolas através da busca por alternativas sustentáveis de manter a produção agropecuária (Montgomery, 2007; Oliveira *et al.*, 2015).

Figura 31 - Comparação entre os dados observados e estimados pelo WEPP para o escoamento superficial (A) e erosão do solo (B) nos períodos de calibração e validação do modelo (2012-2016).

Fonte: Autor

4.6.2. Simulação com séries sintéticas

4.6.2.1. Simulação com dados climáticos históricos

Os resultados referentes ao escoamento superficial e erosão do solo para cada uso do solo em escala de vertente (parcela experimental) foram apresentados na Figura 32. Na simulação para cana-de-açúcar, foi observado que os valores máximos surgiram em decorrência dos anos que em a cana soca foi removida e replantada, após manejo do solo. Além disso, depois do primeiro ano de cana planta, a tendência foi o escoamento superficial e a erosão do solo diminuírem em decorrência dos resíduos deixados depois de cada ciclo anual e do sistema radicular (Cerdà *et al.*, 2016; Prosdocimi *et al.*, 2016; Youlton *et al.*, 2016b). Nesse uso do solo, é possível a ocorrência de reduções na porosidade, no carbono orgânico e no diâmetro médio dos agregados do solo, bem como, o aumento na densidade do solo (Valim *et al.*, 2016). O elevado escoamento superficial na pastagem em relação à cana-de-açúcar e ao Cerrado *sensu stricto* pôde ser explicado pela baixa porosidade e alta densidade do solo em sua camada superficial em decorrência do pastoreio de animais no local (Aderfer e Robinson, 1947; Haveren, 1983).

Figura 32 – Resultados das simulações do escoamento superficial (A) e da erosão do solo (B) para diferentes usos do solo no clima atual.

Fonte: Autor

A dispersão dos dados simulados de escoamento superficial na pastagem e no solo exposto foi menor que na cana-de-açúcar e no Cerrado *sensu stricto*, provavelmente devido às características da vegetação. No caso da erosão do solo, a condição de solo exposto apresentou média significativamente diferente ($P < 0,05$) dos outros usos do solo avaliados (Cerrado *sensu stricto*, pastagem e cana-de-açúcar). Entretanto, detectou-se uma forte similaridade entre a erosão do solo na pastagem e no Cerrado *sensu stricto*. A cana-de-açúcar apresentou maior variabilidade nas suas taxas devido ao manejo do solo mais intenso (Tabela 18). Essa cultura requer replantio a cada ciclo (5 a 6 anos), bem como a colheita (corte) e manejo do solo a cada ano, e consequentemente, o solo permanece exposto por alguns meses (Martinelli e Filoso, 2008). As taxas simuladas de escoamento superficial e erosão do solo também concordaram com outras observações realizadas, provando que os resultados do modelo WEPP foram coerentes (Montgomery, 2007; Auerswald *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2015; Anache *et al.*, 2017).

Assim como nos dados observados, os dados simulados com o modelo WEPP indicaram que a pastagem apresentou alto escoamento superficial e baixa erosão do solo. Isso pode ser explicado pelo pisoteio do gado, que pode ocasionar a compactação do solo e dificultar a infiltração, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a desagregação do solo. Entretanto, testes de infiltração nas parcelas experimentais são necessário para comprovar essa hipótese. A erosão do solo é baixa devido à alta coesão das partículas do solo ao sistema radicular da vegetação da pastagem (Nacinovic *et al.*, 2014).

Tabela 18 – Médias observadas (2012-2016), simuladas (utilizando 5 anos de dados meteorológicos) e preditas (utilizando 100 anos de dados climáticos gerados de forma estocástica com o CLIGEN a partir de dados históricos observados).

Variáveis	Uso do solo	Observações (2012-2016)	Simulações com 5 anos de dados meteorológicos (2012-2016)	Predições utilizando série estocástica de 100 anos gerada pelo WEPP
Precipitação (mm ano ⁻¹)	Cerrado s.s.	1388	1388	1323
	Solo exposto			
	Pastagem Cana-de-açúcar			
Escoamento superficial (mm ano ⁻¹)	Cerrado s.s.	2 ^c	9 ^c	3 ^c
	Solo exposto	138 ^a	144 ^a	190 ^a
	Pastagem Cana-de-açúcar	45 ^b 16 ^c	48 ^b 23 ^{bc}	74 ^b 11 ^c
Erosão do solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Cerrado s.s.	0,14 ^c	0,04 ^c	0,04 ^c
	Solo exposto	16,13 ^a	17,98 ^a	23,37 ^a
	Pastagem Cana-de-açúcar	0,11 ^c 0,63 ^b	0,05 ^c 0,79 ^b	0,08 ^c 0,64 ^b

Letras idênticas indicam diferenças não significativas entre as médias da mesma coluna (P valor > 0,05).

Fonte: Autor.

4.6.2.2. Simulação com climas futuros

O gerador climático (MarkSim DSSAT) permite a obtenção de séries estocásticas a partir de 2010, assim, optou-se em comparar as simulações futuras com as estimativas geradas a partir do clima base com a RCP correspondente. Os dados climáticos observados durante um longo período (1917-2017) combinados com cenários atuais do clima de múltiplos GCMs e RCPs foram usados para estimar valores de precipitação, escoamento superficial e erosão do solo para diferentes usos do solo (Tabela 19). Esses valores foram considerados como base para a comparação com as predições utilizando cenários climáticos futuros. Os padrões das estimativas de precipitação, escoamento superficial e erosão do solo utilizando apenas dados climáticos observados (Tabela 18) se repetiram nas simulações utilizando o clima base de múltiplos GCMs e RCPs (Tabela 19).

Simulações com WEPP considerando climas futuros indicaram potenciais alterações na precipitação, no escoamento superficial e na erosão do solo em diversas partes do mundo (Zhang, 2007; Li *et al.*, 2010; Mullan, 2013; Garbrecht e Zhang, 2015). No caso deste trabalho, as simulações com cenários climáticos projetados não alteraram significativamente as diferenças e similaridades entre o escoamento superficial e a erosão do solo dos diferentes usos do solo. Mudanças no escoamento superficial e na erosão devido às variações na precipitação (Figura 33) ocorreram em diferentes níveis de acordo com o uso do solo (Tabela 20). Entretanto,

essas alterações não foram significativas, mesmo considerando as alterações na precipitação que foram estatisticamente significativas nas RCPs 2.6 (apenas 2030) e 8.5 (2030, 2060 e 2090).

Tabela 19 – Médias de precipitação, escoamento superficial e erosão do solo simulados pelo WEPP utilizando o clima base que representa o presente

RCP	Uso do solo	Precipitação (mm ano ⁻¹)	Escoamento superficial (mm ano ⁻¹)	Erosão do solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)
2.6	Cerrado <i>sensu stricto</i>	1353,13	8	0,12
	Solo exposto		253	30,55
	Pastagem		103	0,12
	Cana-de-açúcar		19	0,91
4.5	Cerrado <i>sensu stricto</i>	1333,90	12	0,11
	Solo exposto		244	29,60
	Pastagem		97	0,11
	Cana-de-açúcar		23	0,87
6.0	Cerrado <i>sensu stricto</i>	1319,44	11	0,11
	Solo exposto		237	30,12
	Pastagem		96	0,11
	Cana-de-açúcar		21	0,85
8.5	Cerrado <i>sensu stricto</i>	1294,64	10	0,09
	Solo exposto		229	28,08
	Pastagem		91	0,11
	Cana-de-açúcar		20	0,99

RCP: Curvas Representativas de Concentração.

Fonte: Autor.

Figura 33 – Variabilidade da precipitação considerando diferentes cenários de mudanças climáticas (RCPs 2.5, 4.5, 6.0 e 8.5 projetadas para o presente, 2030, 2060 e 2090).

Fonte: Autor

Tabela 20 – Potenciais alterações (Δ) na precipitação, escoamento superficial e erosão do solo para 2030, 2060 e 2090 baseados nos dados climáticos de múltiplos GCMs e RCPs em relação às previsões para o clima base (presente).

R C P	Uso do solo	Δ Precipitação (mm ano ⁻¹)			Δ Escoamento superficial (mm ano ⁻¹)			Δ Erosão do solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)			Grupo		
		2030	2060	2090	2030	2060	2090	2030	2060	2090	2030	2060	2090
2.6	Cerrado <i>sensu stricto</i>				3 38%	2 29%	5 68%	-0,02 -14%	0,04 34%	0,07 61%	F	H	H
	Solo exposto	-57	-27	-8	-27 -11%	-18 -7%	-10 -4%	-1,95 -6%	-1,54 -5%	1,46 5%	B	B	D
	Pastagem	-4%*	-2%	-1%	-12 -12%	-6 -6%	-3 -3%	-0,02 -14%	-0,01 -5%	0,00 -2%	B	B	B
	Cana-de-açúcar				2 9%	0 2%	4 18%	-0,01 -1%	-0,12 -13%	0,13 14%	F	F	H
4.5	Cerrado <i>sensu stricto</i>				1 9%	-6 -48%	-6 -48%	0,04 37%	-0,03 -24%	-0,04 -41%	A	G	G
	Solo exposto	15	44	36	-2 -1%	-17 -7%	-18 -7%	1,79 6%	-1,47 -5%	-1,83 -6%	E	G	G
	Pastagem	1%	3%	3%	3 3%	-7 -7%	-5 -5%	0,01 7%	-0,01 -6%	-0,01 -5%	A	G	G
	Cana-de-açúcar				0 0%	-7 -29%	-6 -27%	-0,15 -17%	0,08 9%	0,01 1%	G	E	E
6.0	Cerrado <i>sensu stricto</i>				2 13%	-1 -11%	-6 -50%	0,04 33%	0,02 17%	-0,04 -32%	A	E	G
	Solo exposto	36	37	54	8 3%	0 0%	-4 -2%	0,22 1%	-1,38 -5%	-1,92 -6%	A	C	G
	Pastagem	3%	3%	4%	5 6%	3 3%	-1 -1%	0,01 8%	0,00 2%	0,00 -1%	A	A	G
	Cana-de-açúcar				2 8%	0 1%	-6 -28%	0,16 19%	0,11 13%	-0,22 -26%	A	A	G
8.5	Cerrado <i>sensu stricto</i>				2 16%	-3 -31%	3 30%	0,06 63%	0,05 55%	0,08 89%	A	E	A
	Solo exposto	63	80	118	20 9%	1 0%	17 8%	0,88 3%	0,76 3%	2,66 9%	A	A	A
	Pastagem	5%*	6%*	9%*	9 9%	4 5%	12 13%	0,01 8%	0,00 4%	0,01 12%	A	A	A
	Cana-de-açúcar				1 7%	-4 -18%	3 14%	0,00 0%	-0,10 -10%	-0,01 -1%	C	G	C
Grupo		Precipitação			Escoamento superficial			Erosão do solo					
A		↑			↑			↑					
B		↓			↓			↓					
C		↑			↑			↓					
D		↓			↓			↑					
E		↑			↓			↑					
F		↓			↑			↓					
G		↑			↓			↓					
H		↓			↑			↑					

*Indica diferença significativa em relação ao clima base (Tabela 19); RCP: Curvas Representativas de Concentração.

Fonte: Autor.

As potenciais alterações no clima podem não afetar o escoamento superficial e a erosão do solo, de acordo com as simulações considerando os quatro cenários de emissão (RCPs) e os anos projetados (2030, 2060 e 2090). A precipitação poderá aumentar até 118 mm em 2090, considerando o pior cenário em termos emissão de gases estufa (Tabela 20). Esse aumento da precipitação na área de estudo concordou com os cenários projetados de erosividade das chuvas para a região do estudo simulados por Almagro *et al.* (2017), que considerou também as premissas do IPCC-AR5 em seus métodos. Entretanto, as mudanças na precipitação, por serem menores que 10% da precipitação atual, não tiveram influência significativa no escoamento superficial e na erosão do solo, discordando de outros estudos semelhantes, localizados em regiões onde as projeções climáticas preveem cenários mais drásticos, em que estas alterações foram significativas (Nearing *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2010; Mullan, 2013; Garbrecht e Zhang, 2015).

Foram encontradas oito combinações (grupos) possíveis de tendências nas mudanças na precipitação, no escoamento superficial e na erosão do solo. O RCP 2.6 apresentou diminuição significativa na precipitação em 2030, seguido por diminuições não significativas em 2060 e 2090. Essas alterações na precipitação, no escoamento superficial e na erosão do solo nessa RCP foram classificadas como grupo B (diminuição na precipitação, no escoamento superficial e na erosão do solo), grupo D (diminuição na precipitação e no escoamento superficial, e aumento na erosão do solo), grupo F (diminuição na precipitação e na erosão do solo, e aumento no escoamento superficial), grupo H (diminuição na precipitação, e aumento no escoamento superficial e na erosão do solo). Diminuições na precipitação também foram encontradas no estudo desenvolvido por Li *et al.* (2010), cujas simulações com o WEPP também revelaram impactos na produtividade dos cultivos agrícolas em condições de mudanças climáticas.

As simulações com RCPs 4.5, 6.0 e 8.5 tiveram tendências que foram classificadas nos grupos A, C, E e G. Todos apresentaram aumento na precipitação, aumento no escoamento superficial e na erosão do solo (grupo A), aumento no escoamento superficial e diminuição na erosão do solo (grupo C), diminuição no escoamento superficial e aumento na erosão do solo (grupo E) e diminuição no escoamento superficial e na erosão do solo (grupo G). Em geral, o comportamento predominante é o do grupo A, que ocorreu principalmente nos cenários mais extremos, com maiores níveis de emissão de gases estufa (RCPs 6.0 e 8.5). Cana-de-açúcar e Cerrado *sensu stricto* tiveram mudanças relativas maiores no escoamento superficial e na erosão do solo, enquanto que a pastagem e o solo exposto foram menos sensíveis às mudanças na precipitação. Ao mesmo tempo, a cana-de-açúcar também apresentou um comportamento singular em relação aos outros usos do solo, apresentando ligeiras diminuições na erosão do

solo, apesar do aumento da precipitação e temperatura nas projeções futuras com a RCP 8.5. Isso pôde ser explicado pelo aumento da produção de biomassa em plantações de cana-de-açúcar devido às temperaturas maiores em cenários futuros (Marin *et al.*, 2012), aumentando a proteção do solo à erosão.

As diferenças entre as ordens de grandeza do escoamento superficial para cada uso do solo foram diferentes daquelas encontradas para as simulações da erosão do solo. O comportamento do escoamento superficial, conforme reportado em estudo experimental anterior (Oliveira *et al.*, 2016), teve o solo exposto como a condição que produziu o maior volume de escoamento superficial após um evento de chuva, seguido pela pastagem, cana-de-açúcar e o Cerrado *sensu stricto*, respectivamente. Pôde ser observada grande variação no alcance dos resultados das simulações quando foram considerados todos os climas (presente e futuro) sob os diferentes níveis de emissão de gases estufa (RCPs) (Figura 34).

Figura 34 – Escoamento superficial considerando diferentes cenários de mudanças climáticas (RCPs 2.5, 4.5, 6.0 e 8.5 projetadas para o presente, 2030, 2060 e 2090) em quatro diferentes usos do solo.

Fonte: Autor

As taxas de erosão do solo apresentaram menor variação, porém a condição de solo exposto teve ordem de magnitude superior aos outros usos do solo (Cerrado *sensu stricto*, pastagem e cana-de-açúcar). Quando cenários futuros são considerados neste tipo de simulação, um aumento nas incertezas é esperado (Vanwalleghem *et al.*, 2017). Como discutido por Oliveira *et al.* (2015), as respostas de condições naturais como o Cerrado para a erosão do solo foram muito menores em comparação aos cultivos agrícolas. Entretanto, este estudo indicou que pastagens podem produzir quantidades de sedimentos similares a uma área natural como o Cerrado *sensu stricto* (Figura 35). Desse modo, este estudo confirmou que a expansão de cultivos como a cana-de-açúcar no bioma Cerrado pode aumentar significativamente a erosão do solo no Brasil, conforme também reportou Merten e Minella (2013).

Figura 35 – Erosão do solo considerando diferentes cenários de mudanças climáticas (RCPs 2.5, 4.5, 6.0 e 8.5 projetadas para o presente, 2030, 2060 e 2090) em quatro diferentes usos do solo.

Fonte: Autor

A modelagem a longo prazo do escoamento superficial e da erosão do solo possui a limitação das incertezas relacionadas com as variáveis de entrada dos modelos utilizados nas projeções, que tendem a crescer com tempo (Vanwalleghem *et al.*, 2017). Modelos como o WEPP são mais adequados para tais projeções, pois conseguem reproduzir as interações entre as mudanças na precipitação e temperatura, proveniente dos GCMs, nos fatores que governam o escoamento superficial e a erosão do solo ligados ao uso e manejo do solo. Porém, ainda existem limitações e incertezas que devem ser superadas com o avanço no desenvolvimento de modelos mais robustos (Mullan *et al.*, 2012).

4.7. Ganhos e perdas nos processos hidrológicos e nos processos erosivos devido às mudanças no uso do solo

A região do Cerrado brasileiro é muito importante economicamente, pois é responsável por grande parte da produção agrícola que alimenta os mercados interno e externo (Klink e Machado, 2005). Atualmente, há um esforço em melhor entender os ganhos e perdas (*trade-offs*) entre as necessidades ecossistêmicas e econômicas que governam a dinâmica do uso do solo no bioma Cerrado (Marris, 2005). Com o uso intensificado do solo (Alkimim *et al.*, 2015), as áreas de Cerrado nativo foram reduzidas aproximadamente em 50% da cobertura original (Lapola *et al.*, 2013). As áreas de vegetação nativa ajudam a manter o ciclo hidrológico, com o baixo escoamento superficial e altas taxas de evapotranspiração.

Neste estudo, ficou evidente que, quando ocorre a substituição do Cerrado *sensu stricto* por cultivos não florestais, como a pastagem e a cana-de-açúcar, ocorreram o aumento das taxas de escoamento superficial e a diminuição da evapotranspiração, apesar das incertezas associadas às medições e estimativas. Consequentemente, o residual do balanço hídrico (dS) aumentou consideravelmente, sugerindo que a infiltração de água no solo também aumentou. Porém, como a evapotranspiração reduziu substancialmente no período seco (entre abril e setembro), essa água aparentemente não ficou disponível para o sistema radicular da vegetação como em sistemas florestais (caso do Cerrado *sensu stricto*). Assim, ocorreu o aumento da percolação e da recarga do aquífero, evidenciados pelas variações no nível freático que ocorreram em poço localizado em área de pastagem e que não ocorreram no poço construído na área de Cerrado *sensu stricto*.

A literatura mostra que florestas nativas ajudam a manter a recarga dos aquíferos pela elevada taxa de infiltração, como ocorreu nos estudos realizados em florestas tropicais no Sul da Índia e em regiões montanhosas do Himalaia (Krishnaswamy *et al.*, 2013; Ghimire *et al.*, 2014). Todavia, a evapotranspiração surge como um componente chave no controle da recarga

do aquífero nas condições da área de estudo, que faz parte da zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) (Lucas e Wendland, 2015). Logo, as taxas de recarga podem ser reduzidas em áreas de mata nativa pela priorização das demandas por água da atmosfera e da vegetação, sugerindo que o serviço ecossistêmico, nesse caso, não seria a manutenção da recarga de água subterrânea, e sim a manutenção do constante retorno de água para atmosfera ao longo do ano.

A erosão do solo está relacionada aos processos hidrológicos e, geralmente, está atrelada ao escoamento superficial quando se trata da erosão hídrica (Beskow *et al.*, 2009). Desse modo, o controle dos processos erosivos também ajuda a diminuir o escoamento superficial e aumentar a infiltração de água no solo (Frank *et al.*, 2014). No caso dos usos do solo considerados neste estudo, a pastagem apresentou níveis de perda de solo ($0,11 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) similares aos do Cerrado *sensu stricto* ($0,14 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), mesmo quando o escoamento superficial foi elevado ($45,20 \text{ mm ano}^{-1}$). Isso ocorreu porque o solo não sofreu nenhuma perturbação recorrente em cultivos semi-perenes como a cana-de-açúcar, que apresentou menor escoamento superficial ($15,92 \text{ mm ano}^{-1}$), mas a perda de solo ($0,63 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi significativamente maior que em condições naturais de Cerrado *sensu stricto* ($0,14 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Martinelli e Filoso, 2008; Auerswald *et al.*, 2009; Cerdan *et al.*, 2010).

Alterações (significativas ou não) no balanço hídrico e na erosão do solo poderão ser observadas se o Cerrado *sensu stricto* for substituído pelo solo exposto, pela pastagem ou pela cana-de-açúcar (Figura 36). Destacam-se a redução na evapotranspiração (ET) (mais de 500 mm ano^{-1} de redução) e o aumento do residual do balanço hídrico (dS) (mais de 500 mm ano^{-1} de aumento) com a remoção do Cerrado *sensu stricto*. Geralmente, o solo exposto ocorre nas transições entre os usos do solo (pousio), ocasionando grandes aumentos no escoamento superficial e na erosão do solo, não havendo benefícios ambientais na ocorrência dessa condição por seu elevado impacto na conservação da água e do solo.

Quando o solo exposto é coberto por uma pastagem ou por um canavial, como os encontrados na área de estudo, podemos ter redução significativa do escoamento superficial e da erosão do solo (mais de 60 mm ano^{-1} e $15 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente). Entretanto, há aumento significativo na erosão do solo quando o Cerrado *sensu stricto* é substituído pela cana-de-açúcar ($0,49 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), que não ocorre quando a pastagem é adotada como uso do solo. No caso do escoamento superficial, há aumento significativo quando a pastagem substitui o Cerrado *sensu stricto* (42 mm ano^{-1}), e não significativo quando a cana-de-açúcar é o cultivo adotado (14 mm ano^{-1}).

Figura 36 – Médias anuais observadas (2012-2016) em escala experimental (local) dos ganhos e perdas na evapotranspiração (ET), no escoamento superficial (ES), no armazenamento de água no solo (dS) e na erosão do solo (ER) devido às potenciais alterações no uso do solo que ocorrem no Cerrado do Sudeste do Brasil.

Fonte: Autor.

A partir das observações realizadas entre 2012 e 2016 e das inferências estatísticas nesses dados, resumidos na Figura 36, foi possível mostrar os ganhos e perdas, bem como os efeitos nos processos hidrológicos e no controle da erosão do solo na forma de uma matriz (Tabela 21). Como as projeções climáticas apresentadas na seção 4.6 não indicaram alteração significativas no escoamento superficial e na erosão do solo, a variabilidade climática não trouxe ganhos ou perdas para os usos do solo considerados neste trabalho.

Tabela 21 – Efeitos anuais no balanço hídrico, com os ganhos (armazenamento de água no solo) e perdas (evapotranspiração e escoamento superficial), e na erosão do solo, quando ocorre a substituição do Cerrado *sensu stricto* por solo exposto, pastagem e cana-de-açúcar.

Uso do solo	Trade-offs	
	Balanço hídrico Efeito (mm ano ⁻¹)	Erosão do solo Efeito (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Solo exposto	-584	16
Pastagem	-517	0,03
Cana-de-açúcar	-515	0,49

Trade-offs: maior efeito (vermelho); efeito intermediário (amarelo); menor efeito (verde).

Fonte: Autor.

Observou-se que o Cerrado *sensu stricto* é eficiente no controle da erosão do solo, tendo em vista o aumento da erosão que aconteceu quando da sua substituição. Porém, existem questões em aberto no que se refere à potencial recarga dos aquíferos em áreas com essa densidade de vegetação (Oliveira *et al.*, 2017). O pior cenário (solo exposto) causou maior desequilíbrio no ciclo hidrológico com o elevado escoamento superficial (Pimentel *et al.*, 1995). A cana-de-açúcar e a pastagem tiveram ganhos e perdas que se equilibraram, uma vez que a erosão do solo na pastagem foi menor, mas a redução do escoamento superficial e o pequeno aumento da evapotranspiração na cana-de-açúcar foram menos distantes das condições hidrológicas de uma vegetação nativa (Loarie *et al.*, 2011).

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

CAPÍTULO V

Considerações finais

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Este trabalho reúne abordagens teóricas, experimentais e computacionais em torno dos possíveis *trade-offs* (ganhos e perdas) que acontecem com a distribuição de água e com os processos erosivos frente às alterações no uso do solo e ao caráter estocástico do clima. A revisão bibliográfica agrupa os principais trabalhos anteriores e as tendências e perspectivas sobre o tema, mostrando uma análise de estudos similares no Brasil. Ao longo da execução deste projeto, o balanço hídrico e a erosão do solo foram monitorados em parcelas experimentais contendo diferentes usos do solo: Cerrado *sensu stricto*, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto. Eles fazem parte da atual dinâmica das alterações no uso do solo que ocorrem principalmente na região Sudeste do Brasil. Com base nas observações contínuas das variáveis meteorológicas, taxas de escoamento superficial e erosão do solo na área de estudo realizadas entre 2012 e 2016, apresenta-se um modelo de base física (WEPP) calibrado para simulação dos processos de escoamento superficial e erosão do solo nos diferentes usos do solo abordados. As simulações consideram dados climáticos históricos (1917-2016) como cenário-base dos dados de entrada do modelo e projeções de climas futuros, considerando diferentes níveis de emissão de gases do efeito estufa e GCMs.

A observação de processos hidrológicos, como o escoamento superficial e a erosão do solo sob chuva natural, é realizada em aproximadamente 52 localidades distribuídas no território brasileiro. Cerca de 50% dos estudos possuem até dois anos de monitoramento contínuo, revelando que, além do número de estudos, a duração dos mesmos deveria ser maior.

As componentes do balanço hídrico que foram observadas em diferentes usos do solo (Cerrado *sensu stricto*, pastagem, cana-de-açúcar e solo exposto) confirmaram que as alterações no uso do solo podem alterá-lo significativamente. Destacam-se a diminuição da evapotranspiração e o aumento do escoamento superficial com a substituição do Cerrado *sensu stricto* por culturas agrícolas.

O elevado consumo de água de áreas de vegetação densa e nativa, como o Cerrado *sensu stricto*, acontece devido às altas taxas de infiltração que aumentam a quantidade de água disponível para as plantas. Essas possuem sistema radicular mais profundo que a pastagem e a cana-de-açúcar e têm a capacidade de alcançar água para transpiração em níveis mais profundos ao longo da zona não saturada do solo, mantendo a evapotranspiração mesmo nos períodos de estiagem (secos). Dessa maneira, o residual do balanço hídrico evidencia que menos água fica disponível para percolação e a recarga do aquífero em áreas de cobertura vegetal mais densa.

Pelo menos 90% das observações de escoamento superficial e erosão do solo variam menos que a magnitude da média entre as repetições de parcelas experimentais, porém, a alta variabilidade que existe nesse tipo de dado prejudica a modelagem em escalas temporais mais detalhadas (mensal ou diária). A erosão do solo observada na pastagem não é variável como o escoamento superficial e ela é similar às taxas que ocorrem no Cerrado *sensu stricto*. A cana-de-açúcar, apesar de apresentar escoamento superficial similar ao Cerrado *sensu stricto*, possui erosão do solo menor apenas que o solo exposto, devido ao constante manejo do solo a cada ciclo da cultura e à variação do porte da cobertura vegetal ao longo do ano.

Considerando os 5 anos de observações e estimativas das variáveis do balanço hídrico e a precipitação anual média de $1388 \pm 188 \text{ mm ano}^{-1}$, o Cerrado *sensu stricto* apresenta a maior evapotranspiração ($1201 \pm 49 \text{ mm ano}^{-1}$), seguido pela cana-de-açúcar ($672 \pm 66 \text{ mm ano}^{-1}$), pastagem ($641 \pm 59 \text{ mm ano}^{-1}$) e solo exposto (somente evaporação, $482 \pm 40 \text{ mm ano}^{-1}$); o solo exposto gera o maior escoamento superficial ($137 \pm 62 \text{ mm ano}^{-1}$), seguido pela pastagem ($45 \pm 26 \text{ mm ano}^{-1}$), cana-de-açúcar ($16 \pm 18 \text{ mm ano}^{-1}$) e Cerrado *sensu stricto* ($2 \pm 2 \text{ mm ano}^{-1}$). Para a erosão do solo, as medições revelam que o solo exposto perde em média $16,00 \pm 5,97 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, seguido pela cana-de-açúcar ($0,64 \pm 0,49 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), Cerrado *sensu stricto* ($0,14 \pm 0,06 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e pastagem ($0,11 \pm 0,04 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Assim como os dados experimentais, as simulações utilizando dados climáticos gerados de forma estocástica revelam que as mudanças no uso do solo podem alterar os padrões de escoamento superficial e erosão do solo. O comportamento do escoamento superficial é distinto para os usos do solo analisados. Em relação à erosão do solo, existem semelhanças significativas entre a pastagem e o Cerrado *sensu stricto*.

Não são observadas alterações significativas no escoamento superficial e na erosão do solo entre o clima atual e as suas projeções. Mesmo assim, sob os maiores e mais significativos aumentos na precipitação (entre 5% e 9%) no pior cenário de mudança climática, a tendência de aumento do escoamento superficial e da erosão do solo acontece em quase todos os usos do solo (Cerrado *sensu stricto*, pastagem e solo exposto), exceto na cana-de-açúcar, que pode ter ligeiros decréscimos na erosão do solo. Tal fato é justificado pelo aumento da produção de biomassa da cana-de-açúcar devido ao aumento da temperatura e da precipitação, e consequente maior proteção do solo.

Em suma, no contexto do balanço hídrico e dos processos erosivos devido às mudanças no uso do solo e variações climáticas em condições subtropicais, o Cerrado *sensu stricto* é eficiente no controle da erosão do solo e na manutenção do ciclo hidrológico, mas a potencial recarga dos aquíferos em áreas com essa densidade de vegetação pode ser menor que em áreas

agrícolas. O solo exposto pode desequilibrar o ciclo hidrológico devido ao elevado escoamento superficial. A cana-de-açúcar e a pastagem têm ganhos e perdas no balanço hídrico e na ocorrência de processos erosivos que se equilibram, sendo duas alternativas concorrentes para uso do solo: a erosão do solo na pastagem é menor, mas na cana-de-açúcar, o escoamento superficial é reduzido e a evapotranspiração é ligeiramente maior.

5.2. Recomendações

Durante a execução deste trabalho, principalmente ao longo da etapa de análise de dados, surgiram novas hipóteses e ideias para a continuidade das pesquisas no tema proposto por esta tese, resumidas nos tópicos abaixo:

- Expansão da duração e quantidade de séries contínuas de monitoramento do escoamento superficial e erosão do solo sob chuva natural no Brasil, incluindo o experimento realizado neste trabalho, além da automatização da medição e amostragem das parcelas experimentais e melhora na disponibilidade dos dados para uso público;
- Como este trabalho priorizou a comparação de médias, sugere-se analisar as consequências dos eventos extremos (máximos e mínimos) monitorados no ciclo hidrológico e na erosão do solo;
- Estudos de interceptação da precipitação em áreas de vegetação nativa e em cultivos agrícolas;
- Aumentar a rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas de Cerrado nativo em suas diferentes formações;
- Aumentar a utilização de modelos matemáticos de base física como o WEPP no Brasil, calibrados com dados observados localmente;
- Verificar as estimativas de evapotranspiração realizadas neste estudo;
- Disponibilizar os produtos decorrentes deste trabalho para os organismos gestores (meio ambiente e recursos hídricos) e produtores rurais da região da área de estudo através da divulgação científica.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil (2012). **Sustainability** 4 (12), pp. 574-585.
- ADEKALU, K. O.; OLORUNFEMI, I. A.; OSUNBITAN, J. A. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria (2007). **Bioresour Technol** 98 (4), pp. 912-7.
- ADERFER, R. B.; ROBINSON, R. R. Runoff from pastures in relation to grazing intensity and soil compaction (1947). **Journal of the American Society of Agronomy**, pp. 948-958.
- AGUIAR, M. I.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAUJO FILHO, J. A. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE (2006). **Revista Ciência Agronômica** 37 (3), pp. 270-278.
- ALBERTON, B.; ALMEIDA, J.; HELM, R.; DA S. TORRES, R.; MENZEL, A.; MORELLATO, L. P. C. Using phenological cameras to track the green up in a cerrado savanna and its on-the-ground validation (2014). **Ecological Informatics** 19, pp. 62-70.
- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI-NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB (2002). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 6 (1), pp. 136-141.
- ALKIMIM, A.; SPAROVEK, G.; CLARKE, K. C. Converting Brazil's pastures to cropland: An alternative way to meet sugarcane demand and to spare forestlands (2015). **Applied Geography** 62, pp. 75-84.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56** (1998). Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. p.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; HAGEMANN, S. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil (2017). **Scientific Reports** 7 (1), pp. 1-12.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil (2014). **Meteorologische Zeitschrift** 22 (6).
- AMADO, T. J. C.; PROCHNOW, D.; ELTZ, F. L. Perdas de solo e água em períodos de anomalias climáticas: “El niño” e “La niña” no sul do Brasil (2002). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26, pp. 819-827.
- AMARAL, A. J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; BARBOSA, F. T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do planalto sul-catarinense (2008). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32, pp. 2145-2155.
- ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. C.; OLIVEIRA, P. T. S.; FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience (2017). **Catena** 152, pp. 29-39.

AUERSWALD, K.; FIENER, P.; DIKAU, R. Rates of sheet and rill erosion in Germany — A meta-analysis (2009). **Geomorphology** 111 (3-4), pp. 182-193.

AVERY, M. A.; DAVIS, S. M.; ROSENLOF, K. H.; YE, H.; DESSLER, A. E. Large anomalies in lower stratospheric water vapour and ice during the 2015–2016 El Niño (2017). **Nature Geoscience** 10 (6), pp. 405-409.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A. D.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. D.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil (2011). **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 46, pp. 0-0.

BAPTISTA, J.; LEVIEN, R. Métodos de preparo de solo e sua influência na erosão hídrica e no acúmulo de biomassa da parte aérea de eucalyptus saligna em um Cambissolo Háplico da depressão central do Rio Grande do Sul (2010). **Revista Árvore** 34 (4), pp. 561-575.

BARRETTO, A. G.; BERNDES, G.; SPAROVEK, G.; WIRSENIUS, S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975-2006 period (2013). **Glob Chang Biol** 19 (6), pp. 1804-15.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; MAFRA, Á. L.; FLORES, M. C. Soil water erosion under different cultivation systems and different fertilization rates and forms over 10 years (2014). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38, pp. 1918-1928.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUADAGNIN, J. C.; AMARAL, A. J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo (2007). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31, pp. 133-142.

BERTOL, I.; MIQUELLUTI, D. J. Perdas de solo, água e nutrientes reduzidas pela cultura do milho (1993). **Pesquisa agropecuária brasileira** 28 (10), pp. 1205-1213.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para as culturas de soja e trigo em três sistemas de preparo em um Cambissolo Húmico alumínico (2001). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25, pp. 451-461.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; AMARAL, A. J. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico alumínico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Lages (SC) (2002). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26, pp. 465-471.

BERTOLINO, A. V. F. A.; SOARES, I. L. P.; CUNHA, L. Dinâmica hidrológica e erosiva em agricultura tradicional de corte e queima no mioma de Mata Atlântica (RJ) – Brasil (2015). **Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança** (22).

BERTONI, J.; LOMBARDI-NETO, F. **Conservação do solo** (2012). 8th edition. São Paulo, SP: 2012. 355 p.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling (2009). **Catena** 79 (1), pp. 49-59.

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests (2008). **Science** 320 (5882), pp. 1444-9.

BOUWER, H.; RICE, R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells (1976). **Water Resources Research** 12 (3), pp. 423-428.

BOWEN, I. S. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface (1926). **Physical Review** 27 (6), pp. 779-787.

BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; FILIPPI, A. M.; REDO, D.; XU, Z.; GANESH, S. Land change in the Brazilian Savanna (Cerrado), 1986–2002: Comparative analysis and implications for land-use policy (2008). **Land Use Policy** 25 (4), pp. 579-595.

BREVIK, E. C.; CERDÀ, A.; MATAIX-SOLERA, J.; PEREG, L.; QUINTON, J. N.; SIX, J.; VAN OOST, K. The interdisciplinary nature of *SOIL* (2015). **SOIL** 1 (1), pp. 117-129.

BRONSTERT, A.; DE ARAÚJO, J.-C.; BATALLA, R. J.; COSTA, A. C.; DELGADO, J. M.; FRANCKE, T.; FOERSTER, S.; GUENTNER, A.; LÓPEZ-TARAZÓN, J. A.; MAMEDE, G. L.; MEDEIROS, P. H.; MUELLER, E.; VERICAT, D. Process-based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments (2014). **Journal of Soils and Sediments** 14 (12), pp. 2001-2018.

BROWNING, G. M.; PARISH, C. L.; GLASS, J. A. A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa (1947). **Soil Science Society of America Journal** 23.

BURT, T. P.; MCDONNELL, J. J. Whither field hydrology? The need for discovery science and outrageous hydrological hypotheses (2015). **Water Resources Research** 51 (8), pp. 5919-5928.

BUSTAMANTE, M. M. C.; NOBRE, C. A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A. P. D.; BARIONI, L. G.; FERREIRA, L. G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A. S.; OMETTO, J. P. H. B. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil (2012). **Climatic Change** 115 (3), pp. 559-577.

CABRAL, C. E. A.; AMORIM, R. S. S.; DORES, E. F. G. C.; BONFIM-SILVA, E. M. Estimativa de perda de solo em sistemas de cultivo em lavouras de algodão (2010a). **Enciclopédia Biosfera** 6 (11), pp. 8.

CABRAL, O. M. R.; DA ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; FREITAS, H. C.; LIGO, M. A. V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil (2015). **Journal of Hydrology: Regional Studies** 4, pp. 22-40.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A. V.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation (2012). **GCB Bioenergy** 4 (5), pp. 555-565.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H. C.; LIGO, M. A. V.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D. The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil (2010b). **Journal of Hydrology** 388 (3-4), pp. 208-216.

CABRERA, M. C. M.; ANACHE, J. A. A.; YOULTON, C.; WENDLAND, E. Performance of evaporation estimation methods compared with standard 20 m² tank (2016). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 20 (10), pp. 874-879.

CAMPOS FILHO, O. R.; SILVA, I. F.; ANDRADE, A. P.; LEPRUN, J. C. Erosividade da chuva e erodibilidade do solo no agreste pernambucano (1992). **Pesquisa agropecuária brasileira** 27 (9), pp. 1363-1370.

CANADELL, J.; JACKSON, R. B.; EHLERINGER, J. B.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E.; SCHULZE, E.-D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale (1996). **Oecologia** 108 (4), pp. 583-595.

CÂNDIDO, B. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BATISTA, P. V. G. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul (2014). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38, pp. 1565-1575.

CARDOSO, D. P.; SILVA, M. L. N.; CARVALHO, G. J.; FREITAS, D. A. F.; AVANZI, J. C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica (2012). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16 (6), pp. 632-638.

CARVALHO, M. P.; HERNANI, L. C. Parâmetros de erosividade da chuva e da enxurrada correlacionados com perdas de solo e erodibilidade de um Latossolo Roxo de Dourados (MS) (2001). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25, pp. 137-146.

CARVALHO, R.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; CURI, N.; SOUZA, F. S. Erosão hídrica em Latossolo Vermelho sob diversos sistemas de manejo do cafeeiro no sul de Minas Gerais (2007). **Ciência e Agrotecnologia** 31 (6), pp. 1679-1687.

CASTRO, N. M. R.; AUZET, A. V.; CHEVALLIER, P.; LEPRUN, J. C. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil (1999). **Hydrological Processes** 13, pp. 1621-1628.

CASTRO, S. S. D.; NETO, J. P. D. Q. Soil Erosion in Brazil from Coffee to the Present-day Soy Bean Production (2009). 13, pp. 195-221.

CERDÀ, A.; GONZÁLEZ-PELAYO, Ó.; GIMÉNEZ-MORERA, A.; JORDÁN, A.; PEREIRA, P.; NOVARA, A.; BREVIK, E. C.; PROSDOCIMI, M.; MAHMOODABADI, M.; KEESSTRA, S.; ORENES, F. G.; RITSEMA, C. J. Use of barley straw residues to avoid high erosion and runoff rates on persimmon plantations in Eastern Spain under low frequency-high magnitude simulated rainfall events (2016). **Soil Research** 54 (2), pp. 154.

CERDAN, O.; GOVERS, G.; LE BISSONNAIS, Y.; VAN OOST, K.; POESEN, J.; SABY, N.; GOBIN, A.; VACCA, A.; QUINTON, J.; AUERSWALD, K.; KLIK, A.; KWAAD, F. J. P. M.; RACLOT, D.; IONITA, I.; REJMAN, J.; ROUSSEVA, S.; MUXART, T.; ROXO, M. J.; DOSTAL, T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data (2010). **Geomorphology** 122 (1-2), pp. 167-177.

CHRISTOFFERSEN, B. O.; RESTREPO-COUBE, N.; ARAIN, M. A.; BAKER, I. T.; CESTARO, B. P.; CIAIS, P.; FISHER, J. B.; GALBRAITH, D.; GUAN, X.; GULDEN, L.; VAN DEN HURK, B.; ICHII, K.; IMBUZEIRO, H.; JAIN, A.; LEVINE, N.; MIGUEZ-MACHO, G.; POULTER, B.; ROBERTI, D. R.; SAKAGUCHI, K.; SAHOO, A.; SCHAEFER, K.; SHI, M.; VERBEECK, H.; YANG, Z.-L.; ARAÚJO, A. C.; KRUIJT, B.; MANZI, A. O.; DA ROCHA, H. R.; VON RANDOW, C.; MUZA, M. N.; BORAK, J.; COSTA, M. H.; GONÇALVES DE GONÇALVES, L. G.; ZENG, X.; SALESKA, S. R. Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado (2014). **Agricultural and Forest Meteorology** 191 (0), pp. 33-50.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo (2003). **Revista Brasileira de Ciências do Solo** 27, pp. 743-753.

COOK, H. L. The Nature and Controlling Variables of the Water Erosion Process (1937). **Soil Science Society of America Journal** 1 (C), pp. 487-494.

CORRECHEL, V.; BACCHI, O. O. S.; DE MARIA, I. C.; DECHEN, S. C. F.; REICHARDT, K. Erosion rates evaluated by the ¹³⁷Cs technique and direct measurements on long-term runoff plots under tropical conditions (2006). **Soil and Tillage Research** 86 (2), pp. 199-208.

COUTINHO, L. M. O conceito de cerrado (1978). **Revista Brasileira de Botânica** 1, pp. 17-23.

CRUZ, E. S. **Influência do Preparo do Solo e de Plantas de Cobertura na Erosão Hídrica de um Argissolo Vermelho-Amarelo**. 2006. (MSc.). Soil Science, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

DA ROCHA, H. R.; MANZI, A. O.; CABRAL, O. M.; MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; SALESKA, S. R.; R.-COUBE, N.; WOFSY, S. C.; BORMA, L. S.; ARTAXO, P.; VOURLITIS, G.; NOGUEIRA, J. S.; CARDOSO, F. L.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; FREITAS, H. C.; VON RANDOW, C.; AGUIAR, R. G.; MAIA, J. F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil (2009). **Journal of Geophysical Research** 114.

DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance (1987). **Journal of Hydrology** 93 (1-2), pp. 67-78.

DEBARBA, L.; AMADO, T. J. C. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no sul do Brasil com características de sustentabilidade (1997). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 21, pp. 473-480.

DEDECEK, R. **Erosao e praticas conservacionistas nos cerrados** (1986). Planaltina, DF: Embrapa, 1986. 16 p.

DEDECEK, R. A. Coberturas permanentes do solo na erosão sob condições de cerrados (1989). **Pesquisa agropecuária brasileira** 24 (4), pp. 483-488.

DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology** (2014). 3rd. Prentice Hall, 2014. p.

DOHERTY, J. **Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models** (2015). Brisbane, Australia: 2015. p.

DOMÍNGUEZ, C. G.; PRYET, A.; GARCÍA VERA, M.; GONZALEZ, A.; CHAUMONT, C.; TOURNEBIZE, J.; VILLACIS, M.; D'OZOUVILLE, N.; VIOLETTE, S. Comparison of deep percolation rates below contrasting land covers with a joint canopy and soil model (2016). **Journal of Hydrology** 532, pp. 65-79.

DOTTERWEICH, M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation—A global synopsis (2013). **Geomorphology** 201, pp. 1-34.

DUAN, Q. Y.; GUPTA, V. K.; SOROOSHIAN, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization (1993). **Journal of Optimization Theory and Applications** 76 (3), pp. 501-521.

EDUARDO, E. N.; CARVALHO, D. F. D.; MACHADO, R. L.; SOARES, P. F. C.; ALMEIDA, W. S. D. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em argissolo vermelho-amarelo, sob condições de chuva natural (2013). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37, pp. 796-803.

ELLIOT, W. J.; LIEBENOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. D. **A Compendium of Soil Erodibility Data from WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 and 1988**. West Lafayette, Indiana. 1989

ENCINAS, O. C. **Avaliação de processos erosivos na base de operações Geólogo Pedro de Mora - Coari, AM**. 2010. 79 (Mestrado). Agricultura do Trópico Úmido, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

FALCÃO SOBRINHO, J. Precipitação e erosão do solo na serra das matas no ambiente do semiárido cearense (2015). **Fórum Ambiental da Alta Paulista** 11 (6).

FAO. FAOSTAT. 2016. Disponível em: < <http://faostat3.fao.org/home/> >.

FEKETE, B. M.; VÖRÖSMARTY, C. J.; ROADS, J. O.; WILLMOTT, C. J. Uncertainties in Precipitation and Their Impacts on Runoff Estimates (2004). **Journal of Climate** 17 (2), pp. 294-304.

FINCH, J. W. Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model – sensitivity to land surface parameters (1998). **Journal of Hydrology** 211 (1), pp. 112-125.

FISHER, J. B.; MALHI, Y.; BONAL, D.; DA ROCHA, H. R.; DE ARAÚJO, A. C.; GAMO, M.; GOULDEN, M. L.; HIRANO, T.; HUETE, A. R.; KONDO, H.; KUMAGAI, T. O.; LOESCHER, H. W.; MILLER, S.; NOBRE, A. D.; NOUVELLON, Y.; OBERBAUER, S. F.; PANUTHAI, S.; ROUPSARD, O.; SALESKA, S.; TANAKA, K.; TANAKA, N.; TU, K. P.; VON RANDOW, C. The land-atmosphere water flux in the tropics (2009). **Global Change Biology** 15 (11), pp. 2694-2714.

FLANAGAN, D. C.; ASCOUGH II, J. C.; NIEBER, J. L.; MISRA, D.; DOUGLAS-MANKIN, K. R. Advances in soil erosion research: Processes, measurement, and modeling (2013). **Transactions of the ASABE** 56 (2), pp. 455-463.

FLANAGAN, D. C.; ASCOUGH, J. C.; NEARING, M. A.; LAFLEN, J. M. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. In: HARMON, R. S. e DOE, W. W. (Ed.). **Landscape Erosion and Evolution Modeling**. Boston, MA: Springer US, 2001. pp.145-199. ISBN 978-1-4615-0575-4.

FLANAGAN, D. C.; FRANKENBERGER, J. R.; ASCOUGH II, J. C. WEPP: Model use, calibration and validation (2012). **Transactions of the ASABE** 55 (4), pp. 1463-1477.

FLANAGAN, D. C.; GILLEY, J. E.; FRANTI, T. G. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements (2007). **Transactions of the ASABE** 50 (5), pp. 1603-1612.

FRANK, S.; FÜRST, C.; WITT, A.; KOSCHKE, L.; MAKESCHIN, F. Making use of the ecosystem services concept in regional planning—trade-offs from reducing water erosion (2014). **Landscape Ecology** 29 (8), pp. 1377-1391.

FREIRE, R.; TAVARES, C. R. G.; SOARES, P. F.; ABREU, M. H. M. D. Correlação entre condição da superfície do solo agrícola e o coeficiente de absorção acústica (2014). **Revista Ambiente & Água** 9, pp. 708-721.

FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R.; KASSAM, A. Overview of the Global Spread of Conservation (2012). **Field Actions Science Reports** (6), pp. 1-8.

FULLEN, M. A.; DOS SANTOS PEREIRA, L.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. D. C. O.; GUERRA, A. J. T. Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade (2016). **Revista Brasileira de Geomorfologia** 17 (2), pp. 299-316.

GARBRECHT, J. D.; ZHANG, X. C. Soil erosion from winter wheat cropland under climate change in Central Oklahoma (2015). **Applied Engineering in Agriculture** 31 (3), pp. 439-454.

GARCIA-MONTIEL, D. C.; COE, M. T.; CRUZ, M. P.; FERREIRA, J. N.; DA SILVA, E. M.; DAVIDSON, E. A. Estimating seasonal changes in volumetric soil water content at landscape scales in a savanna ecosystem using two-dimensional resistivity profiling (2008). **Earth Interactions** 12 (2), pp. 1-25.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; NADAL-ROMERO, E.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; LANA-RENAULT, N.; SANJUÁN, Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world (2015). **Geomorphology** 239, pp. 160-173.

GATTI, L. V.; GLOOR, M.; MILLER, J. B.; DOUGHTY, C. E.; MALHI, Y.; DOMINGUES, L. G.; BASSO, L. S.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C. S.; BORGES, V. F.; FREITAS, S.; BRAZ, R.; ANDERSON, L. O.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, O. L.; LLOYD, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements (2014). **Nature** 506 (7486), pp. 76-80.

GETIRANA, A. C. V. Extreme water deficit in Brazil detected from space (2015). **Journal of Hydrometeorology** 17, pp. 591-599.

GHIMIRE, C. P.; BRUIJNZEEL, L. A.; LUBCZYNSKI, M. W.; BONELL, M. Negative trade-off between changes in vegetation water use and infiltration recovery after reforestation degraded pasture land in the Nepalese Lesser Himalaya (2014). **Hydrology and Earth System Sciences** 18 (12), pp. 4933-4949.

GIAMBELLUCA, T. W.; SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S. J.; MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C.; BUCHERT, M. P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density (2009). **Agricultural and Forest Meteorology** 149 (8), pp. 1365-1376.

GIBBS, H. K.; RUESCH, A. S.; ACHARD, F.; CLAYTON, M. K.; HOLMGREN, P.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s (2010). **Proceedings of the National Academy of Sciences** 107 (38), pp. 16732-16737.

GILLEY, J. E.; FLANAGAN, D. Early investment in soil conservation research continues to provide dividends (2007). **Transactions of the ASABE** 50 (5), pp. 1595-1601.

GÓMEZ, J. A.; NEARING, M. A.; GIRALDEZ, J. V.; ALBERTS, E. E. Analysis of sources of variability of runoff volume in a 40 plot experiment using a numerical model (2001). **Journal of Hydrology** 248, pp. 183-197.

GOMYO, M.; KURAJI, K. Effect of the litter layer on runoff and evapotranspiration using the paired watershed method (2017). **Journal of Forest Research** 21 (6), pp. 306-313.

GOOD, S. P.; NOONE, D.; BOWEN, G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes (2015). **Science** 349 (6244), pp. 175-177.

GRECCHI, R. C.; GWYN, Q. H. J.; BÉNIÉ, G. B.; FORMAGGIO, A. R.; FAHL, F. C. Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion (2014). **Applied Geography** 55, pp. 300-312.

GUADAGNIN, J. C.; BERTOL, I.; CASSOL, P. C.; AMARAL, A. J. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo (2005). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29, pp. 277-286.

GUIMARÃES, G.; DE ANDRADE, K.; MENDONÇA, E. D. S. Rainfall erosion and compartments soil organic matter in coffee systems conservationist and conventional (2015). **Coffee Science** 10 (3), pp. 365-374.

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

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling (2009). **Journal of Hydrology** 377 (1-2), pp. 80-91.

HAVEREN, B. P. V. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site (1983). **Journal of Range Management** 36 (5), pp. 586-588.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge (2002). **Hydrogeology Journal** 10 (1), pp. 91-109.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão (1999). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23, pp. 145-154.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; DEDECEK, R.; ALVES JÚNIOR, M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS) (1997). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 21, pp. 667-676.

HONDA, E. A.; DURIGAN, G. Woody encroachment and its consequences on hydrological processes in the savannah (2016). **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci** 371 (1703).

HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D.; NELKIN, E. The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA). In: GEBREMICHAEL, M. e HOSSAIN, F. (Ed.). **Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology**: Springer Netherlands, 2010. cap. 1, pp.3-22. ISBN 978-90-481-2914-0.

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Recent advances in crop water stress detection (2017). **Computers and Electronics in Agriculture** 141, pp. 267-275.

IPCC. **Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (2014). Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p.

JACKSON, R. B.; CANADELL, J.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E.; SCHULZE, E. D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes (1996). **Oecologia** 108 (3), pp. 389-411.

JETTEN, V. G.; MANETA, M. P. Calibration of Erosion Models. In: MORGAN, R. P. C. e NEARING, M. A. (Ed.). **Handbook of Erosion Modelling**. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2011. cap. 3, pp.33-51.

JONES, P. G.; THORNTON, P. K. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications (2013). **Agricultural Systems** 114, pp. 1-5.

JUSTICE, V. **Rainfall Intensity Summarization Tool**. DABNEY, S. Oxford, Mississippi: United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service 2016.

KATERJI, N.; MASTRORILLI, M.; LAHMAR, F. FAO-56 methodology for the stress coefficient evaluation under saline environment conditions: Validation on potato and broad bean crops (2011). **Agricultural Water Management** 98 (4), pp. 588-596.

KEESSTRA, S.; PEREIRA, P.; NOVARA, A.; BREVIK, E. C.; AZORIN-MOLINA, C.; PARRAS-ALCÁNTARA, L.; JORDÁN, A.; CERDÀ, A. Effects of soil management

techniques on soil water erosion in apricot orchards (2016a). **Science of The Total Environment** 551 (Supplement C), pp. 357-366.

KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDÀ, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J. N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals (2016b). **SOIL** 2 (2), pp. 111-128.

KIM, J.; IVANOV, V. Y.; FATICHI, S. Environmental stochasticity controls soil erosion variability (2016). **Sci Rep** 6, pp. 22065.

KINNELL, P. I. A. A review of the design and operation of runoff and soil loss plots (2016). **Catena** 145, pp. 257-265.

_____. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas (2017). **Sci Total Environ** 596-597, pp. 32-42.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado
Conservación del Cerrado Brasileño (2005). **Conservation Biology** 19 (3), pp. 707-713.

KRISHNASWAMY, J.; BONELL, M.; VENKATESH, B.; PURANDARA, B. K.; RAKESH, K. N.; LELE, S.; KIRAN, M. C.; REDDY, V.; BADIGER, S. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis” (2013). **Journal of Hydrology** 498, pp. 191-209.

LAFLÉN, J. M.; MOLDENHAUER, W. C. **Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story** (2003). Beijing, China: World Association of Soil and Water Conservation, 2003. 54 p.

LANZANOVA, M. E.; ELTZ, F. L. F.; NICOLOSO, R. D. S.; CASSOL, E. A.; BERTOL, I.; AMADO, T. J. C.; GIRARDELLO, V. C. Residual effect of soil tillage on water erosion from a Typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems (2013). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37, pp. 1689-1698.

LAPOLA, D. M.; MARTINELLI, L. A.; PERES, C. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERREIRA, M. E.; NOBRE, C. A.; AGUIAR, A. P. D.; BUSTAMANTE, M. M. C.; CARDOSO, M. F.; COSTA, M. H.; JOLY, C. A.; LEITE, C. C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B. B. N.; VIEIRA, I. C. G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system (2013). **Nature Climate Change** 4 (1), pp. 27-35.

LEITE, M. H. S.; COUTO, E. G.; AMORIM, R. S. S.; COSTA, E. L.; MARASCHIN, L. Perdas de solo e nutrientes num Latossolo Vermelho-amarelo ácrico típico, com diferentes sistemas de preparo e sob chuva natural (2009). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33, pp. 689-699.

LI, Z.; FANG, H. Impacts of climate change on water erosion: A review (2016). **Earth-Science Reviews** 163, pp. 94-117.

LI, Z.; LIU, W.-Z.; ZHANG, X.-C.; ZHENG, F.-L. Assessing the site-specific impacts of climate change on hydrology, soil erosion and crop yields in the Loess Plateau of China (2010). **Climatic Change** 105 (1-2), pp. 223-242.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo** (2005). São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (edUSP), 2005. 346 p.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, C. L. D.; OLIVEIRA, C. A. D. S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado (2001). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 5, pp. 33-41.

LIMA, W. P. Escoamento superficial, perdas de solo e de nutriente em microparcels reflorestadas com eucalipto em solos arenosos no município de São Simão, SP (1988). **IPEF** 38, pp. 5-16.

LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil (2011). **Nature Climate Change** 1 (2), pp. 105-109.

LUCAS, M.; OLIVEIRA, P. T. S.; MELO, D. C. D.; WENDLAND, E. Evaluation of remotely sensed data for estimating recharge to an outcrop zone of the Guarani Aquifer System (South America) (2015). **Hydrogeology Journal** 23 (5), pp. 961-969.

LUCAS, M.; WENDLAND, E. Recharge estimates for various land uses in the Guarani Aquifer System outcrop area (2015). **Hydrological Sciences Journal**, pp. 150527103244004.

MARCHIORO, E.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Dimensão de parcelas experimentais: influência nas medidas de escoamento superficial e erosão do solo em Gouveia/MG (2007). **Geografias** 3 (2), pp. 7-16.

MARGOLIS, E.; GALINDO, I. C. L.; MELLO NETTO, A. V. Comportamento de sistemas de cultivo da mandioca em relação à produção e às perdas por erosão (1991). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 15, pp. 357-362.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil (2012). **Climatic Change** 117 (1-2), pp. 227-239.

MARQUES, S. R.; WEILL, M. A. M.; SILVA, L. F. S. Qualidade física de um latossolo vermelho, perdas por erosão e desenvolvimento do milho em dois sistemas de manejo (2010). **Ciência e Agrotecnologia** 34 (4).

MARRIS, E. Conservation in Brazil: The forgotten ecosystem (2005). **Nature** 437 (7061), pp. 944-945.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges (2008). **Ecological Applications** 18 (4), pp. 885-898.

MARTINS FILHO, F. M. **Balanço hídrico e erosão do solo em uma plantação de eucaliptos novos**. 2014. (Mestrado). Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

MARTINS, S. G. **Erosão hídrica em povoamento de eucalipto sobre solos coesos nos tabuleiros Costeiros, ES**. 2005. (PhD). Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MEHAN, S.; GUO, T.; GITAU, M.; FLANAGAN, D. C. Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation (2017). **Climate** 5 (2), pp. 26.

MELO, D. D. C. D.; SCANLON, B. R.; ZHANG, Z.; WENDLAND, E.; YIN, L. Reservoir storage and hydrologic responses to droughts in the Paraná River basin, south-eastern Brazil (2016). **Hydrology and Earth System Sciences** 20 (11), pp. 4673-4688.

MERTEN, G. H.; ARAÚJO, A. G.; BISCAIA, R. C. M.; BARBOSA, G. M. C.; CONTE, O. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil (2015). **Soil and Tillage Research** 152, pp. 85-93.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: Soil erosion scenarios (2013). **International Soil and Water Conservation Research** 1 (3), pp. 37-48.

MONTEITH, J. Evaporation and environment (1965). Symp Soc Exp Biol. pp.205-234.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments** (2008). John Wiley & Sons, 2008. 752 p.

MONTGOMERY, D. R. Soil erosion and agricultural sustainability (2007). **Proc Natl Acad Sci U S A** 104 (33), pp. 13268-72.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation** (2009). Wiley, 2009. 320 p.

MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J.; AUESWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E.; FOLLY, A. J. V. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide (1998). **Cranfield University**.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations (2007). **Transactions of the ASABE** 50 (3), pp. 885-900

MULLAN, D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems (2013). **Catena** 109, pp. 234-246.

MULLAN, D.; FAVIS-MORTLOCK, D.; FEALY, R. Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change (2012). **Agricultural and Forest Meteorology** 156, pp. 18-30.

MUSGRAVE, G. W. The quantitative evaluation of factors in water erosion: A first approximation (1947). **Journal of Soil and Water conservation** 2.

MWANGO, S. B.; MSANYA, B. M.; MTAKWA, P. W.; KIMARO, D. N.; DECKERS, J.; POESEN, J. Effectiveness OF Mulching UnderMirabain Controlling Soil Erosion, Fertility Restoration and Crop Yield in the Usambara Mountains, Tanzania (2016). **Land Degradation & Development** 27 (4), pp. 1266-1275.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities (2000). **Nature** 403 (6772), pp. 853-858.

NACINOVIC, M. G. G.; MAHLER, C. F.; AVELAR, A. D. S. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro (2014). **Soil and Tillage Research** 144, pp. 164-173.

NASCIMENTO, P. C.; LOMBARDI-NETO, F. Razão de perdas de solo sob cultivo de três leguminosas (1999). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23, pp. 121-125.

NEARING, M.; PRUSKI, F.; O'NEAL, M. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review (2004). **Journal of soil and water conservation** 59 (1), pp. 43-50.

NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; FINKNER, S. C. A Process-based soil erosion model for USDA - Water Erosion Prediction Project technology (1989). **Trasactions of the ASAE** 32 (5), pp. 1587-1593.

NEARING, M. A.; GOVERS, G.; NORTON, L. D. Variability in Soil Erosion Data from Replicated Plots (1999). **Soil Science Society of America Journal** 63, pp. 1829-1835.

NICKS, A. D.; LANE, L. J.; GANDER, G. A. Chapter 2. Weather Generator. In: FLANAGAN, D. e NEARING, M. A. (Ed.). **Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10**. West Lafayette, Indiana: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.

NOBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; TORRES, G. N.; KOVACS, K.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E.; GEROLD, G. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier (2017). **PLoS One** 12 (6), pp. e0179414.

OISHI, A. C.; OREN, R.; NOVICK, K. A.; PALMROTH, S.; KATUL, G. G. Interannual Invariability of Forest Evapotranspiration and Its Consequence to Water Flow Downstream (2010). **Ecosystems** 13 (3), pp. 421-436.

OLIVEIRA, A. H. **Erosão hídrica e seus componentes na sub-bacia hidrográfica do Horto Florestal Terra Dura, Eldorado do Sul (RS)**. 2011. 179 (Doutorado). Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C.; KLINKE NETO, G.; ARAÚJO, E. F. Water erosion in soils under eucalyptus forest as affected by development stages and management systems (2013a). **Ciência e Agrotecnologia** 37, pp. 159-169.

OLIVEIRA, L. C. **Erosão hídrica e alguns processos hidrológicos em plantios de pinus, mata e campo nativos e estrada florestal**. 2012. (PhD.). Ciências Agrárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC.

OLIVEIRA, P. T. S. **Balanco hídrico e erosão do solo em mata nativa do bioma Cerrado**. 2014. (PhD). Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

OLIVEIRA, P. T. S.; LEITE, M. B.; MATTOS, T.; NEARING, M. A.; SCOTT, R. L.; DE OLIVEIRA XAVIER, R.; DA SILVA MATOS, D. M.; WENDLAND, E. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado (2017). **Ecohydrology** 10 (1), pp. e1759.

OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; HAWKINS, R. H.; STONE, J. J.; RODRIGUES, D. B. B.; PANACHUKI, E.; WENDLAND, E. Curve number estimation from Brazilian Cerrado rainfall and runoff data (2016). **Journal of Soil and Water Conservation** 71 (5), pp. 420-429.

OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; MORAN, M. S.; GOODRICH, D. C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H. V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado (2014). **Water Resources Research** 50 (9), pp. 7100-7114.

OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; WENDLAND, E. Orders of magnitude increase in soil erosion associated with land use change from native to cultivated vegetation in a Brazilian savannah environment (2015). **Earth Surface Processes and Landforms** 40, pp. 1524-1532.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review (2013b). **Catena** 100, pp. 139-147.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A.; SCOTT, R. L.; ROSOLEM, R.; DA ROCHA, H. R. The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado (2015). **Hydrology and Earth System Sciences** 19 (6), pp. 2899-2910.

OLIVEIRA, R. S.; BEZERRA, L.; DAVIDSON, E. A.; PINTO, F.; KLINK, C. A.; NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil (2005). **Functional Ecology** 19 (4), pp. 574-581.

PANDEY, A.; HIMANSHU, S. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited (2016). **Catena** 147, pp. 595-620.

PENMAN, H. L. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass (1948). **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** 193 (1032), pp. 120-145.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits (1995). **Science-AAAS-Weekly Paper Edition** 267 (5201), pp. 1117-1122.

PINESE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, L. M.; RODRIGUES, S. C. Monitoramento de erosão laminar em diferentes usos da terra, Uberlândia - MG (2008). **Sociedade & Natureza** 20, pp. 157-175.

PIRES, L. S.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LEITE, F. P.; BRITO, L. F. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais (2006). **Pesquisa agropecuária brasileira** 41 (4), pp. 687-695.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? (1996). **Journal of Hydrologic Engineering** 1 (1), pp. 11-19.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters (1972). **Monthly Weather Review** 100 (2), pp. 81-92.

PROCHNOW, D. **Perdas de terra e água em sistemas de manejo na cultura do café no oeste do Estado De São Paulo**. 2003. (MSc.). Agricultura tropical e subtropical, Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, SP.

PROCHNOW, D.; DECHEN, S. C. F.; DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M. D.; VIEIRA, S. R. Razão de perdas de terra e fator C da cultura do cafeeiro em cinco espaçamentos, em Pindorama (SP) (2005). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29, pp. 91-98.

PROSDOCIMI, M.; JORDAN, A.; TAROLLI, P.; KEESSTRA, S.; NOVARA, A.; CERDA, A. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards (2016). **Sci Total Environ** 547, pp. 323-330.

REFSGAARD, J. C.; VAN DER SLUIJS, J. P.; HØJBERG, A. L.; VANROLLEGHEM, P. A. Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance (2007). **Environmental Modelling & Software** 22 (11), pp. 1543-1556.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; K., M. D.; YODER, D. C. Predicting Soil Erosion by water: A guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (1997). **USDA Agriculture Handbook** 703, pp. 407.

RIEGER, F. A.; ZOLIN, C. A.; MAGALHÃES, C. A. S.; PAULINO, J.; FARIAS NETO, A. L.; MENEGUCI, J. L. P. **Perda de Água e Sedimentos em Diferentes Usos do Solo. II Inovagri International Meeting**. Fortaleza, CE: 5203-5211 pp. 2014.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover (1972). **Water Resources Research** 8 (5), pp. 1204-1213.

ROCKSTROM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C. A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SORLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity (2009). **Nature** 461 (7263), pp. 472-475.

RODRIGUES, H. M.; LEMES, M. W.; CUNHA, C. D.; MENDONÇA, P.; O., R. R. Produção de sedimentos em encostas de diferentes domínios geomorfológicos na sub-bacia Santo Antônio do Maratuã, Silva Jardim/RJ (2014). **Revista Geonorte** 5 (14), pp. 236-242.

ROMANO, N. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations (2014). **Journal of Hydrology** 516, pp. 6-20.

RUDORFF, B. F. T.; DE AGUIAR, D. A.; DA SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data (2010). **Remote Sensing** 2 (4), pp. 1057-1076.

RUHOFF, A. L.; SALDANHA, C. B.; COLLISCHONN, W.; UVO, C. B.; ROCHA, H. B.; CABRAL, O. M. R. Análise Multivariada do Processo de Evapotranspiração em Áreas de Cerrado e Cana-de-Açúcar (2009). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 14 (4), pp. 137-146.

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

SAKAI, R. K.; FITZJARRALD, D. R.; MORAES, O. L. L.; STAEBLER, R. M.; ACEVEDO, O. C.; CZIKOWSKY, M. J.; SILVA, R. D.; BRAIT, E.; MIRANDA, V. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field (2004). **Global Change Biology** 10 (5), pp. 895-907.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba (2007). **Revista OKARA: Geografia em debate** 1 (1), pp. 1-152.

SANTOS, D.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; EVANGELISTA, A. R.; CRUZ FILHO, A. B.; TEIXEIRA, W. G. Perdas de solo e produtividade de pastagens nativas melhoradas sob diferentes práticas de manejo (1998). **Pesquisa agropecuária brasileira** 33 (2), pp. 183-189.

SANTOS, J. C. N. D.; PALÁCIO, H. A. D. Q.; ANDRADE, E. M. D.; MEIRELES, A. C. M.; ARAÚJO NETO, J. R. D. Runoff and soil and nutrient losses in semiarid uncultivated fields (2011). **Revista Ciência Agronômica** 42, pp. 813-820.

SARAIVA, O. F.; COGO, N. P.; MIELNICZUK, J. Erosividade das chuvas e perdas por erosão em diferentes manejos de solo e coberturas vegetais (1981). **Pesquisa agropecuária brasileira** 16 (1), pp. 121-128.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JÚNIOR, A. A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico (2000). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico sob chuva natural (2014). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38, pp. 1906-1917.

SCHMIDT, J. **Soil Erosion: Application of Physically Based Models** (2013). Springer Berlin Heidelberg, 2013. p.

SCHOLES, R. J.; ARCHER, S. R. Tree-grass interactions in savannas (1997). **Annual Review of Ecology and Systematics** 28, pp. 517-544.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural (2005). **Pesquisa agropecuária brasileira** 40 (12), pp. 1223-1230.

SILVA, B. P. C.; SILVA, M. L. N.; BATISTA, P. V. G.; PONTES, L. M.; ARAÚJO, E. F.; CURI, N. Soil and water losses in eucalyptus plantation and natural forest and determination of the USLE factors at a pilot sub-basin in Rio Grande do Sul, Brazil (2016). **Ciência e Agrotecnologia** 40, pp. 432-442.

SILVA, J. V.; ALECRIM, M. A. B.; SILVA, D. O.; COSTA, D. O.; COSTA, C. C.; OLIVEIRA, R. J. Perdas de solo e água por erosão hídrica em floresta equiânea em um Latossolo Vermelho-Amarelo (2010). **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 5 (4), pp. 579-584.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C.; LEITE, F. P. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG (2011). **Ciência Florestal** 21 (4), pp. 765-776.

SINGH, H. V.; PANUSKA, J.; THOMPSON, A. M. Estimating sediment delivery ratios for grassed waterways using WEPP (2017). **Land Degradation & Development**, pp. n/a-n/a.

SMETS, T.; POESEN, J.; BOCHET, E. Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water (2008). **Progress in Physical Geography** 32 (6), pp. 654-677.

SMITH, D. D. Interpretation of soil loss conservation data for field use (1941). **Agricultural Engineering** 22.

SMITH, D. D.; WHITT, D. M. Estimating soil losses from field areas of claypan soil (1947). **Soil Science Society of America Journal** 12.

_____. Evaluating soil losses from field areas (1948). **Agricultural Engineering** 29.

SOARES-FILHO, B.; RAJÃO, R.; MACEDO, M.; CARNEIRO, A.; COSTA, W.; COE, M.; RODRIGUES, H.; ALENCAR, A. Cracking Brazil's Forest Code (2014). **Science** 344 (6182), pp. 363-364.

SPANGLER, K. R.; LYNCH, A. H.; SPERA, S. A. Precipitation Drivers of Cropping Frequency in the Brazilian Cerrado: Evidence and Implications for Decision-Making (2017). **Weather, Climate, and Society** 9 (2), pp. 201-213.

STEVENS, N.; LEHMANN, C. E.; MURPHY, B. P.; DURIGAN, G. Savanna woody encroachment is widespread across three continents (2017). **Glob Chang Biol** 23 (1), pp. 235-244.

STROHMEIER, S.; LAAHA, G.; HOLZMANN, H.; KLIK, A. Magnitude and Occurrence Probability of Soil Loss: A Risk Analytical Approach for the Plot Scale For Two Sites in Lower Austria (2016). **Land Degradation & Development** 27 (1), pp. 43-51.

TENBERG, A.; STOCKING, M.; DECHEN, S. C. F. The impact of erosion on soil productivity: an experimental design applied in São Paulo state, Brazil (1997). **Geografiska Annaler** 79A (1-2), pp. 95-107.

THOMAZ, E. L. The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff and soil loss (2009). **Agriculture, Ecosystems & Environment** 130 (1-2), pp. 23-30.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate (1948). **Geographical Review** 38 (1), pp. 55-94.

TIWARI, A. K.; RISSE, L. M.; NEARING, M. A. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE (2000). **Transactions of the ASABE** 43 (5).

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G. **Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control** (2002). Wiley, 2002. p.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; MACKARO, J. Atmospheric Moisture Transports from Ocean to Land and Global Energy Flows in Reanalyses (2011). **Journal of Climate** 24 (18), pp. 4907-4924.

TROTOCHAUD, J.; FLANAGAN, D.; ENGEL, B. A. A simple technique for obtaining future climate data inputs for natural resource models (2016). **Applied Engineering in Agriculture** 32 (3), pp. 371-381.

VALIM, W. C.; PANACHUKI, E.; PAVEI, D. S.; ALVES SOBRINHO, T.; ALMEIDA, W. S. Effect of sugarcane waste in the control of interrill erosion (2016). **Semina: Ciências Agrárias** 37 (3), pp. 1155.

VAN DER ENT, R. J.; SAVENIJE, H. H. G.; SCHAEFLI, B.; STEELE-DUNNE, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents (2010). **Water Resources Research** 46 (9).

VANWALLEGHEM, T.; GÓMEZ, J. A.; INFANTE AMATE, J.; GONZÁLEZ DE MOLINA, M.; VANDERLINDEN, K.; GUZMÁN, G.; LAGUNA, A.; GIRÁLDEZ, J. V. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene (2017). **Anthropocene** 17, pp. 13-29.

VOURLITIS, G. L.; FILHO, N. P.; HAYASHI, M. M. S.; DE S. NOGUEIRA, J.; CASEIRO, F. T.; CAMPELO, J. H. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil (2002). **Water Resources Research** 38 (6), pp. 30-1-30-11.

WANG, K.; DICKINSON, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability (2012). **Reviews of Geophysics** 50 (2).

WARD, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function (1963). **Journal of the American Statistical Association** 58 (301), pp. 236-244.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring (2007). **Journal of Hydrology** 342 (3-4), pp. 261-269.

WENDT, R. C.; ALBERTS, E. E.; HJELMFELT JR, A. T. Variability of Runoff and Soil Loss from Fallow Experimental Plots (1986). **Soil Science Society of America Journal** 50, pp. 730-736.

WESTERHOFF, R. S. Using uncertainty of Penman and Penman–Monteith methods in combined satellite and ground-based evapotranspiration estimates (2015). **Remote Sensing of Environment** 169, pp. 102-112.

WICHERT, M. C. P. **Erosão hídrica e desenvolvimento inicial do Eucalyptus grandis em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes métodos de preparo de solo no Vale do Paraíba-SP**. 2005. (MSc.). Forest Engineering, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

WILBY, R. L.; TRONI, J.; BIOT, Y.; TEDD, L.; HEWITSON, B. C.; SMITH, D. M.; SUTTON, R. T. A review of climate risk information for adaptation and development planning (2009). **International Journal of Climatology** 29 (9), pp. 1193-1215.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor - Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources (1975). **Agricultural Research Service - U. S. Department of Agriculture** 40.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation (1965). **USDA Agriculture Handbook** 282.

_____. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. (1978). **USDA Agriculture Handbook** 537, pp. 58.

WOHL, E.; BARROS, A.; BRUNSELL, N.; CHAPPELL, N. A.; COE, M.; GIAMBELLUCA, T.; GOLDSMITH, S.; HARMON, R.; HENDRICKX, J. M. H.; JUVIK, J.; MCDONNELL, J.; OGDEN, F. The hydrology of the humid tropics (2012). **Nature Climate Change** 2 (9), pp. 655-662.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model (1990). **Agricultural Research Service - U. S. Department of Agriculture** 77, pp. 130.

YOULTON, C.; BRAGION, A. P.; WENDLAND, E. Experimental evaluation of sediment yield in the first year after replacement of pastures by sugarcane (2016a). **Ciencia e investigación agraria** 43, pp. 374-383.

YOULTON, C.; WENDLAND, E.; ANACHE, J. A. A.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; DABNEY, S. Changes in erosion and runoff due to replacement of pasture land with sugarcane crops (2016b). **Sustainability** 8 (685).

YOULTON, C. P. Y. M. **Quantificação experimental da alteração no balanço hídrico e erosão em um Neossolo Quartzarênico devido à substituição de pastagem por cana-de-açúcar**. 2013. (PhD). Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

ZHANG, X. C. A comparison of explicit and implicit spatial downscaling of GCM output for soil erosion and crop production assessments (2007). **Climatic Change** 84 (3-4), pp. 337-363.

ZHAO, C.; GAO, J. E.; HUANG, Y.; WANG, G.; XU, Z. The Contribution of Astragalus adsurgens Roots and Canopy to Water Erosion Control in the Water-Wind Crisscrossed Erosion Region of the Loess Plateau, China (2017). **Land Degradation & Development** 28 (1), pp. 265-273.

ZINGG, A. W. Degree and lenght of land slope as it affects soil loss in runoff (1940). **Agricultural Engineering** 21.

APÊNDICES

Apêndice A – Levantamento fotográfico da área experimental

A1 – Estação meteorológica na área 1
(Tripé com 2 m de altura)

A2 – Torre meteorológica (11 m de altura)
na área 2

A3 – Parcelas experimentais cana-de-açúcar (vista frontal)

A4 – Parcelas experimentais pastagem
(vista frontal)

A5 – Parcelas experimentais solo exposto
(vista frontal)

A6 – Parcelas experimentais Cerrado *sensu stricto* (vista frontal)

A7 – Parcelas experimentais da área 1
(vista lateral)

A8 – Sistema coletor de escoamento superficial

A9 – Solo erodido em suspensão retido nos tanques de escoamento superficial

A10 – Solo erodido retido nas calhas de escoamento superficial (fração sólida)

A11 – Poço de monitoramento do nível do aquífero na área 1

A12 – Poço de monitoramento do nível do aquífero na área 2

A13 – Parcelas experimentais de cana-de-açúcar após o replantio (2014)

A14 – Parcelas experimentais de cana-de-açúcar após o corte (2015)

A15 – Parcelas experimentais de cana-de-açúcar durante o corte (2016)

A16 – Sensor de umidade do solo na cana-de-açúcar

A17 – Sensor de umidade do solo na pastagem

A18 – Sensor de umidade do solo no Cerrado *sensu stricto*

Fonte: Autor.

Apêndice B – Dados de precipitação, escoamento superficial e erosão do solo em parcelas experimentais em Itirapina, SP

Legenda:

A: cana-de-açúcar

B: pastagem

C: Cerrado *sensu stricto*

D: solo exposto

ES: escoamento superficial

R: repetições

M: média

ER: erosão do solo

R: repetições

M: média

PP: precipitação

T: total

D: duração

I: intensidade média

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
02/01/2012	A	1,34	0,93	0,42	0,90	0,11	0,12	0,09	0,11	107,17	47,66	2,25
02/01/2012	B	0,14	0,04	0,04	0,07	0,01	0,01	0,02	0,01	107,17	47,66	2,25
02/01/2012	D	2,05	1,10	1,49	1,55	0,08	0,12	0,15	0,12	143,19	51,33	2,79
06/01/2012	A	0,14	0,06	0,03	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	17,40	2,17	8,02
06/01/2012	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,40	2,17	8,02
06/01/2012	D	0,07	0,11	0,15	0,11	0,01	0,02	0,02	0,01	17,40	2,17	8,02
09/01/2012	A	0,36	0,25	0,12	0,24	0,04	0,04	0,04	0,04	16,23	8,34	1,95
09/01/2012	B	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	16,23	8,34	1,95
09/01/2012	D	0,45	0,55	0,55	0,52	0,06	0,09	0,08	0,08	16,23	8,34	1,95
12/01/2012	A	0,99	0,71	0,56	0,75	0,01	0,02	0,01	0,01	65,07	20,01	3,25
12/01/2012	B	0,20	0,02	0,04	0,09	0,01	0,01	0,00	0,01	65,07	20,01	3,25
12/01/2012	D	1,15	1,44	1,28	1,29	0,02	0,03	0,06	0,04	65,07	20,01	3,25
16/01/2012	A	0,06	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	34,15	28,00	1,22
16/01/2012	B	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	34,15	28,00	1,22
16/01/2012	D	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	34,15	28,00	1,22
17/01/2012	A	1,88	1,37	1,51	1,59	0,09	0,06	0,06	0,07	24,60	11,50	2,14
17/01/2012	B	0,99	0,20	0,49	0,56	0,01	0,00	0,01	0,01	24,60	11,50	2,14

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
17/01/2012	D	5,02	3,99	3,47	4,16	0,12	0,16	0,40	0,23	24,60	11,50	2,14
18/01/2012	A	0,84	0,63	0,56	0,68	0,04	0,04	0,03	0,04	26,58	11,50	2,31
18/01/2012	B	0,19	0,02	0,03	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	26,58	11,50	2,31
18/01/2012	D	1,89	1,59	1,51	1,66	0,10	0,10	0,19	0,13	26,58	11,50	2,31
19/01/2012	A	6,31	5,97	6,30	6,19	0,10	0,08	0,08	0,09	22,95	6,00	3,83
19/01/2012	B	3,46	2,87	3,30	3,21	0,02	0,01	0,03	0,02	22,95	6,00	3,83
19/01/2012	D	2,31	2,41	2,33	2,35	0,04	0,08	0,19	0,10	22,95	6,00	3,83
20/01/2012	A	0,34	0,23	0,12	0,23	0,01	0,01	0,01	0,01	20,56	9,50	2,16
20/01/2012	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,56	9,50	2,16
20/01/2012	D	1,10	1,05	0,76	0,97	0,05	0,11	0,11	0,09	20,56	9,50	2,16
22/01/2012	A	0,15	0,09	0,04	0,09	0,03	0,03	0,02	0,03	21,07	11,00	1,92
22/01/2012	B	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	21,07	11,00	1,92
22/01/2012	D	0,41	0,44	0,28	0,38	0,03	0,04	0,05	0,04	21,07	11,00	1,92
23/01/2012	A	6,82	6,62	5,19	6,21	0,10	0,09	0,06	0,09	21,23	1,67	12,71
23/01/2012	B	4,43	3,46	4,20	4,03	0,01	0,01	0,03	0,02	21,23	1,67	12,71
23/01/2012	D	15,02	6,81	10,27	10,70	0,25	0,16	0,35	0,25	21,23	1,67	12,71
26/01/2012	A	0,07	0,03	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	6,33	2,67	2,37
26/01/2012	B	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	6,33	2,67	2,37
27/01/2012	A	0,27	0,17	0,08	0,17	0,02	0,02	0,01	0,02	19,81	5,50	3,60
27/01/2012	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,81	5,50	3,60
27/01/2012	C	0,27	0,26	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	19,81	5,50	3,60
27/01/2012	D	0,64	0,65	0,48	0,59	0,04	0,05	0,05	0,05	26,14	8,17	3,20
28/01/2012	A	1,24	0,77	0,18	0,73	0,02	0,01	0,01	0,01	27,98	11,83	2,37
28/01/2012	B	0,97	0,11	0,31	0,46	0,01	0,00	0,01	0,01	27,98	11,83	2,37
28/01/2012	C	0,32	0,22	0,00	0,18	0,02	0,02	0,00	0,01	27,98	11,83	2,37
28/01/2012	D	5,19	4,15	2,58	3,98	0,04	0,10	0,11	0,09	27,98	11,83	2,37
11/02/2012	A	1,72	1,31	0,33	1,12	0,12	0,07	0,06	0,08	34,89	6,50	5,37
11/02/2012	B	1,23	0,74	1,13	1,03	0,01	0,01	0,01	0,01	34,89	6,50	5,37
11/02/2012	C	0,33	0,30	0,26	0,29	0,01	0,02	0,02	0,02	34,89	6,50	5,37
11/02/2012	D	2,25	2,31	2,43	2,33	0,34	0,29	0,46	0,36	34,89	6,50	5,37
12/02/2012	A	2,42	1,91	1,80	2,05	0,04	0,03	0,02	0,03	44,67	5,67	7,88
12/02/2012	B	2,15	1,23	1,35	1,58	0,00	0,00	0,00	0,00	44,67	5,67	7,88
12/02/2012	C	0,32	0,33	0,74	0,46	0,00	0,00	0,01	0,00	44,67	5,67	7,88
12/02/2012	D	2,28	2,35	2,42	2,35	0,28	0,25	0,27	0,27	44,67	5,67	7,88
20/02/2012	A	0,29	0,13	0,29	0,24	0,08	0,04	0,04	0,05	20,34	5,01	4,06
20/02/2012	B	0,01	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	20,34	5,01	4,06
20/02/2012	C	0,06	0,08	0,14	0,09	0,01	0,01	0,04	0,02	20,34	5,01	4,06
20/02/2012	D	1,22	1,44	1,13	1,26	0,09	0,21	0,41	0,24	20,34	5,01	4,06
24/02/2012	A	12,84	11,19	13,60	12,54	0,27	0,16	0,14	0,19	84,85	18,50	4,59
24/02/2012	B	8,65	5,97	8,13	7,59	0,02	0,01	0,01	0,02	84,85	18,50	4,59
24/02/2012	C	0,39	0,39	0,84	0,54	0,01	0,02	0,02	0,02	84,85	18,50	4,59
24/02/2012	D	20,11	22,47	17,51	20,03	0,98	0,84	1,29	1,04	84,85	18,50	4,59
27/02/2012	A	3,63	2,81	3,49	3,31	0,11	0,06	0,04	0,07	42,43	4,00	10,61

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
27/02/2012	B	1,93	0,79	0,97	1,23	0,01	0,00	0,01	0,00	42,43	4,00	10,61
27/02/2012	C	0,87	0,49	1,17	0,84	0,02	0,02	0,03	0,02	42,43	4,00	10,61
27/02/2012	D	6,79	10,13	6,81	7,91	0,52	0,43	0,87	0,60	42,43	4,00	10,61
02/03/2012	A	0,57	0,36	0,10	0,34	0,05	0,03	0,02	0,03	23,42	3,84	6,10
02/03/2012	B	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	23,42	3,84	6,10
02/03/2012	C	0,04	0,07	0,18	0,10	0,01	0,01	0,02	0,01	23,42	3,84	6,10
02/03/2012	D	1,37	1,58	1,27	1,41	0,47	0,32	0,56	0,45	23,42	3,84	6,10
06/03/2012	A	0,04	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	24,10	7,67	3,14
06/03/2012	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	24,10	7,67	3,14
06/03/2012	C	0,04	0,02	0,13	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	24,10	7,67	3,14
06/03/2012	D	0,17	0,21	0,20	0,19	0,11	0,11	0,14	0,12	24,10	7,67	3,14
16/03/2012	A	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	15,68	4,83	3,25
16/03/2012	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,68	4,83	3,25
17/03/2012	C	0,10	0,11	0,14	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	15,68	4,83	3,25
17/03/2012	D	0,23	0,28	0,29	0,27	0,15	0,21	0,23	0,19	15,68	4,83	3,25
09/04/2012	A	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	25,57	18,18	1,41
09/04/2012	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,57	18,18	1,41
09/04/2012	C	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	25,57	18,18	1,41
09/04/2012	D	0,02	0,02	0,03	0,02	0,09	0,11	0,12	0,11	25,57	18,18	1,41
23/04/2012	A	1,25	0,64	0,87	0,92	0,03	0,01	0,01	0,02	49,29	18,34	2,69
23/04/2012	B	1,94	1,32	2,03	1,77	0,00	0,00	0,00	0,00	49,29	18,34	2,69
23/04/2012	C	0,47	0,36	0,53	0,45	0,01	0,01	0,02	0,01	49,29	18,34	2,69
23/04/2012	D	7,88	9,26	8,64	8,60	1,17	0,90	1,67	1,25	49,29	18,34	2,69
27/04/2012	A	0,09	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	19,67	6,00	3,28
27/04/2012	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,67	6,00	3,28
27/04/2012	C	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	19,67	6,00	3,28
27/04/2012	D	0,87	0,91	0,90	0,89	0,09	0,19	0,46	0,25	19,67	6,00	3,28
02/05/2012	A	0,52	0,12	0,07	0,24	0,02	0,01	0,01	0,01	115,43	40,33	2,86
02/05/2012	B	0,02	0,04	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	115,43	40,33	2,86
02/05/2012	C	0,12	0,10	0,42	0,22	0,02	0,01	0,02	0,02	115,43	40,33	2,86
02/05/2012	D	10,07	7,89	5,20	7,72	1,03	1,00	1,34	1,12	115,43	40,33	2,86
15/05/2012	A	0,12	0,02	0,03	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	73,42	17,67	4,16
15/05/2012	B	0,00	0,04	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	73,42	17,67	4,16
15/05/2012	C	0,12	0,08	0,28	0,16	0,01	0,01	0,02	0,01	73,42	17,67	4,16
15/05/2012	D	1,47	1,82	1,48	1,59	0,30	0,28	0,36	0,31	73,42	17,67	4,16
25/05/2012	C	0,09	0,08	0,09	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	5,39	0,50	10,78
25/05/2012	D	1,66	1,63	1,55	1,61	0,07	0,11	0,48	0,22	5,39	0,50	10,78
08/06/2012	A	1,75	0,94	0,62	1,10	0,02	0,01	0,01	0,01	82,54	53,51	1,54
08/06/2012	B	0,69	0,18	0,36	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	82,54	53,51	1,54
10/06/2012	C	0,14	0,21	0,44	0,26	0,01	0,02	0,02	0,01	123,93	66,68	1,86
10/06/2012	D	23,45	21,37	15,04	19,95	0,46	0,50	1,49	0,82	123,93	66,68	1,86
25/06/2012	A	0,61	0,11	0,06	0,26	0,01	0,01	0,01	0,01	177,66	60,52	2,94
25/06/2012	B	0,27	0,08	0,13	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	177,66	60,52	2,94

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
26/06/2012	C	0,15	0,18	0,62	0,31	0,02	0,01	0,02	0,01	130,88	46,85	2,79
26/06/2012	D	14,36	14,98	11,74	13,69	0,80	0,62	0,98	0,80	130,88	46,85	2,79
17/07/2012	D	1,52	1,89	1,71	1,71	0,28	0,28	0,74	0,43	28,09	25,01	1,12
20/07/2012	A	0,28	0,02	0,01	0,10	0,01	0,01	0,01	0,01	52,88	32,85	1,61
20/07/2012	B	0,05	0,02	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	52,88	32,85	1,61
20/07/2012	C	0,13	0,15	0,29	0,19	0,01	0,00	0,01	0,01	52,88	32,85	1,61
20/07/2012	D	5,52	9,30	4,48	6,43	0,23	0,29	0,58	0,37	24,79	7,84	3,16
22/09/2012	A	0,21	0,03	0,02	0,08	0,01	0,01	0,00	0,01	88,85	22,00	4,04
22/09/2012	B	0,16	0,14	0,31	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	88,85	22,00	4,04
22/09/2012	C	0,11	0,05	0,04	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	88,85	22,00	4,04
22/09/2012	D	1,65	1,54	3,13	2,11	0,24	0,26	0,48	0,33	88,85	22,00	4,04
27/09/2012	A	1,09	0,39	0,26	0,58	0,02	0,01	0,00	0,01	32,99	11,84	2,79
27/09/2012	B	0,93	0,31	0,49	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	32,99	11,84	2,79
27/09/2012	C	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	32,99	11,84	2,79
27/09/2012	D	1,37	6,32	3,15	3,62	0,14	0,19	0,38	0,23	32,99	11,84	2,79
24/10/2012	A	0,22	0,06	0,03	0,10	0,02	0,01	0,01	0,01	120,33	51,99	2,31
24/10/2012	B	0,02	0,07	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	120,33	51,99	2,31
24/10/2012	C	0,05	0,05	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	120,33	51,99	2,31
24/10/2012	D	3,62	3,75	2,58	3,32	0,30	0,33	0,66	0,43	120,33	51,99	2,31
26/10/2012	A	3,93	1,81	2,65	2,80	0,01	0,01	0,01	0,01	39,47	3,00	13,16
26/10/2012	B	3,84	2,12	2,77	2,91	0,01	0,01	0,01	0,01	39,47	3,00	13,16
26/10/2012	C	0,07	0,05	0,12	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	39,47	3,00	13,16
26/10/2012	D	10,40	29,54	9,49	16,48	0,46	0,87	1,60	0,97	39,47	3,00	13,16
10/11/2012	A	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	95,57	28,50	3,35
10/11/2012	B	0,13	0,04	0,04	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	95,57	28,50	3,35
10/11/2012	C	0,04	0,04	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	95,57	28,50	3,35
10/11/2012	D	6,71	12,12	3,40	7,41	0,22	0,34	1,13	0,56	95,57	28,50	3,35
20/11/2012	C	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	8,80	10,17	0,87
20/11/2012	D	0,30	0,53	0,11	0,31	0,10	0,08	0,19	0,12	8,80	10,17	0,87
03/12/2012	A	0,45	0,25	0,10	0,27	0,09	0,09	0,09	0,09	88,49	46,68	1,90
03/12/2012	B	0,38	0,13	0,12	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	88,49	46,68	1,90
03/12/2012	C	0,05	0,04	0,04	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	79,69	36,51	2,18
03/12/2012	D	9,36	8,31	5,44	7,70	0,23	0,45	0,95	0,54	79,69	36,51	2,18
10/12/2012	A	0,09	0,06	0,02	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	26,99	4,85	5,56
10/12/2012	B	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	26,99	4,85	5,56
10/12/2012	C	0,08	0,05	0,06	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	26,99	4,85	5,56
10/12/2012	D	3,22	4,52	2,57	3,44	0,24	0,34	0,95	0,51	26,99	4,85	5,56
13/12/2012	A	0,01	0,03	0,12	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	25,56	7,00	3,65
13/12/2012	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	25,56	7,00	3,65
13/12/2012	C	0,05	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	25,56	7,00	3,65
13/12/2012	D	2,25	2,53	1,69	2,16	0,07	0,23	0,47	0,26	25,56	7,00	3,65
14/12/2012	A	0,11	0,02	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01	27,47	4,50	6,10
14/12/2012	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	27,47	4,50	6,10

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
14/12/2012	C	0,04	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	27,47	4,50	6,10
14/12/2012	D	3,47	4,45	2,46	3,46	0,09	0,24	0,59	0,31	27,47	4,50	6,10
18/12/2012	A	0,71	0,30	0,09	0,37	0,06	0,08	0,07	0,07	110,28	52,50	2,10
18/12/2012	B	0,03	0,04	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	110,28	52,50	2,10
18/12/2012	C	0,07	0,08	0,06	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	110,28	52,50	2,10
18/12/2012	D	15,10	9,30	8,94	11,11	0,58	0,57	0,96	0,70	110,28	52,50	2,10
29/12/2012	A	3,49	2,00	1,81	2,43	0,08	0,09	0,07	0,08	83,43	17,51	4,76
29/12/2012	B	4,70	2,47	4,60	3,92	0,01	0,01	0,01	0,01	83,43	17,51	4,76
29/12/2012	C	0,06	0,03	0,08	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	83,43	17,51	4,76
29/12/2012	D	19,12	15,93	12,23	15,76	1,51	1,37	1,82	1,57	83,43	17,51	4,76
14/01/2013	A	3,58	1,43	1,20	2,07	0,05	0,04	0,03	0,04	184,12	69,34	2,66
14/01/2013	B	3,80	2,27	5,66	3,91	0,00	0,00	0,01	0,00	184,12	69,34	2,66
14/01/2013	C	0,20	0,17	0,35	0,24	0,02	0,00	0,01	0,01	184,12	69,34	2,66
14/01/2013	D	13,77	19,57	10,13	14,49	1,19	1,11	0,94	1,08	184,12	69,34	2,66
15/01/2013	A	1,25	0,58	0,38	0,74	0,01	0,00	0,00	0,01	46,02	26,67	1,73
15/01/2013	B	0,97	0,25	0,53	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	46,02	26,67	1,73
16/01/2013	C	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	46,02	26,67	1,73
16/01/2013	D	9,12	11,46	5,45	8,68	0,38	0,37	0,74	0,50	46,02	26,67	1,73
17/01/2013	A	0,08	0,06	0,02	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01	31,54	7,50	4,21
17/01/2013	B	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	31,54	7,50	4,21
17/01/2013	C	0,08	0,03	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	31,54	7,50	4,21
17/01/2013	D	1,33	1,06	0,42	0,94	0,12	0,19	0,38	0,23	31,54	7,50	4,21
24/01/2013	A	0,03	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	11,57	1,00	11,57
24/01/2013	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	1,00	11,57
04/02/2013	A	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	44,42	24,49	1,81
04/02/2013	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	44,42	24,49	1,81
04/02/2013	C	0,04	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	55,99	25,49	2,20
04/02/2013	D	2,07	1,61	0,60	1,43	0,21	0,27	0,47	0,32	55,99	25,49	2,20
07/02/2013	A	2,34	1,50	1,24	1,70	0,01	0,01	0,00	0,01	35,85	5,50	6,52
07/02/2013	B	5,19	2,48	5,24	4,30	0,00	0,00	0,00	0,00	35,85	5,50	6,52
07/02/2013	C	0,12	0,06	0,19	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	35,85	5,50	6,52
07/02/2013	D	11,61	11,56	5,75	9,64	0,59	0,44	0,71	0,58	35,85	5,50	6,52
10/02/2013	A	0,02	0,02	0,16	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	29,70	17,50	1,70
10/02/2013	B	0,12	0,03	0,05	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	29,70	17,50	1,70
10/02/2013	C	0,03	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	29,70	17,50	1,70
10/02/2013	D	3,36	2,46	2,14	2,65	0,13	0,10	0,29	0,17	29,70	17,50	1,70
28/02/2013	A	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	77,36	28,51	2,71
28/02/2013	B	0,07	0,02	0,14	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	77,36	28,51	2,71
28/02/2013	C	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	77,36	28,51	2,71
28/02/2013	D	3,30	3,79	2,85	3,31	0,27	0,18	0,45	0,30	77,36	28,51	2,71
04/03/2013	A	0,05	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	0,67	4,93
04/03/2013	B	0,34	0,09	0,37	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	0,67	4,93
06/03/2013	D	3,98	2,81	2,46	3,08	0,29	0,12	0,32	0,24	20,88	2,34	8,92

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
11/03/2013	A	0,10	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	85,84	23,00	3,73
11/03/2013	B	0,90	0,32	0,75	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	85,84	23,00	3,73
11/03/2013	C	0,12	0,04	0,05	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	89,14	23,67	3,77
11/03/2013	D	5,45	5,16	2,39	4,33	0,25	0,21	0,32	0,26	68,26	21,33	3,20
12/03/2013	A	3,88	2,30	3,11	3,09	0,01	0,00	0,00	0,00	58,48	8,33	7,02
12/03/2013	B	9,91	7,91	13,19	10,34	0,00	0,00	0,00	0,00	58,48	8,33	7,02
13/03/2013	C	0,07	0,05	0,09	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	58,78	8,50	6,92
13/03/2013	D	0,00	19,72	0,00	6,57	0,00	0,61	0,00	0,20	58,78	8,50	6,92
14/03/2013	A	0,14	0,03	0,01	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	21,58	6,00	3,60
14/03/2013	B	1,19	0,43	0,93	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	21,58	6,00	3,60
21/03/2013	A	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	48,30	35,01	1,38
21/03/2013	B	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	48,30	35,01	1,38
21/03/2013	C	0,04	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	69,58	40,84	1,70
21/03/2013	D	14,92	6,66	11,00	10,86	0,54	0,21	0,31	0,35	69,58	40,84	1,70
03/04/2013	A	1,20	0,48	0,40	0,70	0,00	0,01	0,00	0,01	55,72	27,18	2,05
03/04/2013	B	5,11	2,87	6,06	4,68	0,00	0,00	0,00	0,00	55,72	27,18	2,05
03/04/2013	C	0,14	0,09	0,18	0,14	0,01	0,00	0,00	0,00	55,72	27,18	2,05
03/04/2013	D	19,45	14,62	11,51	15,19	0,59	0,28	0,48	0,45	55,72	27,18	2,05
15/04/2013	A	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	17,10	38,19	0,45
15/04/2013	B	0,46	0,05	0,70	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	17,10	38,19	0,45
10/05/2013	D	10,38	6,63	2,26	6,43	0,59	0,44	1,81	0,95	17,40	38,36	0,45
30/05/2013	D	0,00	20,66	0,00	6,89	0,00	1,83	0,00	0,61	200,64	60,68	3,31
02/06/2013	A	0,17	0,15	0,10	0,14	0,02	0,02	0,01	0,02	200,94	60,85	3,30
02/06/2013	B	12,91	2,52	29,30	14,91	0,01	0,00	0,01	0,01	200,94	60,85	3,30
05/06/2013	C	0,33	0,35	0,50	0,39	0,02	0,02	0,02	0,02	233,58	104,38	2,24
05/06/2013	D	19,72	0,00	2,58	7,43	0,00	0,00	1,62	0,54	15,54	5,34	2,91
17/06/2013	B	0,09	0,02	0,24	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	44,31	9,02	4,91
01/07/2013	C	0,07	0,07	0,07	0,07	0,01	0,00	0,00	0,01	74,94	28,20	2,66
19/09/2013	B	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	136,15	75,68	1,80
19/09/2013	C	0,04	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	89,98	51,16	1,76
19/09/2013	D	3,09	3,06	2,07	2,74	1,09	1,51	2,03	1,55	164,92	79,36	2,08
01/10/2013	A	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	218,74	102,37	2,14
01/10/2013	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	38,28	17,67	2,17
01/10/2013	C	0,04	0,02	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	38,28	17,67	2,17
01/10/2013	D	0,87	0,56	0,54	0,66	0,17	0,21	0,34	0,24	38,28	17,67	2,17
03/10/2013	A	0,35	0,45	2,02	0,94	0,00	0,00	0,01	0,00	67,71	7,83	8,65
03/10/2013	B	11,39	5,56	11,18	9,38	0,01	0,00	0,00	0,01	67,71	7,83	8,65
03/10/2013	C	0,13	0,09	0,13	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	67,71	7,83	8,65
03/10/2013	D	19,68	18,40	17,10	18,39	0,81	0,60	1,64	1,01	67,71	7,83	8,65
08/10/2013	A	0,10	0,19	0,14	0,14	0,00	0,01	0,01	0,01	57,33	13,84	4,14
08/10/2013	B	2,34	1,01	2,14	1,83	0,00	0,00	0,00	0,00	57,33	13,84	4,14
08/10/2013	C	0,08	0,05	0,09	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	57,33	13,84	4,14
08/10/2013	D	3,53	13,10	4,76	7,13	1,02	0,95	1,90	1,29	57,33	13,84	4,14

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
18/10/2013	A	0,01	0,01	0,19	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	67,52	33,33	2,03
18/10/2013	B	0,15	0,03	0,22	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	67,52	33,33	2,03
18/10/2013	C	0,08	0,04	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	67,52	33,33	2,03
18/10/2013	D	2,64	7,79	3,25	4,56	0,60	0,49	1,35	0,81	67,52	33,33	2,03
08/11/2013	A	0,02	0,02	0,12	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	154,39	48,17	3,21
08/11/2013	B	0,50	0,31	1,41	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	154,39	48,17	3,21
08/11/2013	C	0,08	0,03	0,13	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	154,39	48,17	3,21
08/11/2013	D	2,46	4,63	2,01	3,04	0,63	0,61	0,82	0,69	154,39	48,17	3,21
18/11/2013	A	0,01	0,03	0,11	0,05	0,02	0,01	0,01	0,02	29,52	4,67	6,32
18/11/2013	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	29,52	4,67	6,32
18/11/2013	C	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	29,52	4,67	6,32
18/11/2013	D	0,60	0,63	0,25	0,49	0,18	0,20	0,21	0,20	29,52	4,67	6,32
25/11/2013	A	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	28,32	27,34	1,04
25/11/2013	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,32	27,34	1,04
30/11/2013	A	0,08	0,28	0,38	0,25	0,04	0,03	0,04	0,04	28,32	1,67	16,96
30/11/2013	B	0,31	0,02	0,73	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	28,32	1,67	16,96
30/11/2013	C	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	56,64	29,01	1,95
30/11/2013	D	2,46	2,20	1,89	2,18	0,29	0,19	0,30	0,26	56,64	29,01	1,95
12/12/2013	A	0,01	0,03	0,06	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	51,68	21,02	2,46
12/12/2013	B	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	51,68	21,02	2,46
12/12/2013	C	0,04	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	51,68	21,02	2,46
12/12/2013	D	0,15	0,00	0,08	0,08	0,08	0,14	0,20	0,14	51,68	21,02	2,46
22/12/2013	A	0,02	0,15	0,20	0,12	0,01	0,01	0,01	0,01	45,13	2,18	20,70
22/12/2013	B	1,29	0,05	0,96	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	45,13	2,18	20,70
22/12/2013	C	0,19	0,20	0,29	0,23	0,00	0,01	0,00	0,00	45,13	2,18	20,70
22/12/2013	D	0,54	0,00	0,00	0,18	0,05	0,06	0,13	0,08	45,13	2,18	20,70
03/01/2014	A	0,21	0,09	0,30	0,20	0,01	0,01	0,01	0,01	81,03	32,85	2,47
03/01/2014	B	0,01	0,01	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	81,03	32,85	2,47
03/01/2014	C	0,06	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	81,03	32,85	2,47
03/01/2014	D	0,30	0,01	0,00	0,10	0,05	0,06	0,10	0,07	81,03	32,85	2,47
15/01/2014	A	0,01	0,05	0,23	0,10	0,01	0,01	0,02	0,01	53,52	18,51	2,89
15/01/2014	B	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	53,52	18,51	2,89
15/01/2014	C	0,06	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	53,52	18,51	2,89
15/01/2014	D	0,38	0,20	0,17	0,25	0,11	0,15	0,23	0,16	53,52	18,51	2,89
23/01/2014	A	0,01	0,10	0,38	0,16	0,01	0,01	0,01	0,01	29,32	5,34	5,49
23/01/2014	B	0,12	0,01	0,55	0,23	0,01	0,00	0,00	0,00	29,32	5,34	5,49
23/01/2014	C	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	29,32	5,34	5,49
23/01/2014	D	1,52	0,96	1,41	1,30	0,18	0,21	0,27	0,22	29,32	5,34	5,49
18/02/2014	A	0,01	0,04	0,15	0,07	0,01	0,01	0,03	0,02	140,72	41,17	3,42
18/02/2014	B	0,03	0,01	0,11	0,05	0,02	0,00	0,00	0,01	140,72	41,17	3,42
18/02/2014	C	0,04	0,04	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	140,72	41,17	3,42
18/02/2014	D	1,35	1,90	2,48	1,91	0,25	0,33	0,38	0,32	140,72	41,17	3,42
26/02/2014	A	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	55,73	15,17	3,67

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
26/02/2014	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	55,73	15,17	3,67
26/02/2014	C	0,16	0,01	0,01	0,06	0,00	0,01	0,00	0,00	55,73	15,17	3,67
26/02/2014	D	0,50	1,10	1,40	1,00	0,07	0,12	0,13	0,11	55,73	15,17	3,67
02/03/2014	A	0,21	0,32	0,95	0,49	0,01	0,01	0,01	0,01	119,16	20,50	5,81
02/03/2014	B	2,28	2,08	2,62	2,32	0,00	0,00	0,00	0,00	119,16	20,50	5,81
02/03/2014	C	0,07	0,07	0,06	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	119,16	20,50	5,81
02/03/2014	D	2,62	2,62	2,62	2,62	0,49	0,58	0,75	0,61	119,16	20,50	5,81
06/03/2014	A	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	40,92	23,84	1,72
06/03/2014	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	40,92	23,84	1,72
06/03/2014	C	0,09	0,01	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	40,92	23,84	1,72
06/03/2014	D	0,03	0,01	0,00	0,01	0,04	0,06	0,04	0,04	40,92	23,84	1,72
08/03/2014	A	1,18	1,18	2,55	1,63	0,00	0,01	0,01	0,01	49,74	3,66	13,59
08/03/2014	B	2,69	2,76	2,62	2,69	0,00	0,00	0,00	0,00	49,74	3,66	13,59
08/03/2014	C	0,07	0,05	0,06	0,06	0,01	0,01	0,00	0,01	49,74	3,66	13,59
08/03/2014	D	2,62	2,55	2,69	2,62	0,22	0,30	0,45	0,32	49,74	3,66	13,59
10/03/2014	A	0,03	0,09	0,16	0,09	0,01	0,01	0,01	0,01	14,42	4,34	3,32
10/03/2014	B	0,02	0,01	0,12	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	14,42	4,34	3,32
10/03/2014	C	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	14,42	4,34	3,32
10/03/2014	D	1,41	1,29	1,89	1,53	0,09	0,13	0,25	0,16	14,42	4,34	3,32
14/03/2014	A	0,02	0,09	0,17	0,09	0,00	0,00	0,01	0,01	59,53	16,17	3,68
14/03/2014	B	0,91	0,23	1,35	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	59,53	16,17	3,68
14/03/2014	C	0,03	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	59,53	16,17	3,68
14/03/2014	D	2,34	2,28	2,62	2,41	0,17	0,23	0,40	0,27	59,53	16,17	3,68
23/04/2014	C	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	113,07	47,34	2,39
27/05/2014	A	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	179,64	71,19	2,52
27/05/2014	B	0,03	0,01	0,07	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	179,64	71,19	2,52
27/05/2014	C	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	66,57	23,85	2,79
27/05/2014	D	0,28	0,27	0,05	0,20	0,38	0,64	0,67	0,57	179,64	71,19	2,52
05/09/2014	D	0,20	0,20	0,20	0,20	0,60	0,80	0,70	0,70	71,72	51,68	1,39
30/09/2014	A	0,03	0,07	0,15	0,08	0,01	0,01	0,02	0,01	166,52	102,19	1,63
30/09/2014	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	166,52	102,19	1,63
30/09/2014	C	0,05	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	166,52	102,19	1,63
30/09/2014	D	1,70	1,01	0,60	1,11	0,73	0,55	0,42	0,57	94,80	50,51	1,88
28/10/2014	A	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,87	16,17	1,29
28/10/2014	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,87	16,17	1,29
28/10/2014	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,87	16,17	1,29
28/10/2014	D	0,29	0,07	0,03	0,13	0,14	0,19	0,14	0,16	20,87	16,17	1,29
03/11/2014	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,06	0,03	62,60	14,67	4,27
03/11/2014	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,60	14,67	4,27
03/11/2014	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,60	14,67	4,27
03/11/2014	D	2,14	1,83	1,23	1,74	0,21	0,27	0,10	0,19	62,60	14,67	4,27
04/11/2014	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	34,82	7,50	4,64
04/11/2014	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,82	7,50	4,64

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
04/11/2014	C	0,00	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	34,82	7,50	4,64
04/11/2014	D	4,07	6,76	2,55	4,46	0,26	0,20	0,05	0,17	34,82	7,50	4,64
09/11/2014	A	0,17	0,16	0,37	0,23	0,02	0,03	0,03	0,03	62,98	41,33	1,52
09/11/2014	B	0,09	0,04	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	62,98	41,33	1,52
09/11/2014	C	0,05	0,03	0,05	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	62,98	41,33	1,52
09/11/2014	D	3,67	5,28	2,76	3,90	0,48	0,49	0,35	0,44	62,98	41,33	1,52
27/11/2014	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,05	0,04	63,97	28,51	2,24
27/11/2014	B	0,01	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	63,97	28,51	2,24
27/11/2014	C	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	63,97	28,51	2,24
27/11/2014	D	2,62	1,83	1,70	2,05	0,20	0,22	0,07	0,16	63,97	28,51	2,24
09/12/2014	A	0,01	0,01	0,17	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02	54,13	10,34	5,24
09/12/2014	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	54,13	10,34	5,24
09/12/2014	C	0,08	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	54,13	10,34	5,24
09/12/2014	D	4,44	7,75	2,75	4,98	0,19	0,18	0,07	0,14	54,13	10,34	5,24
15/12/2014	A	0,02	0,01	0,12	0,05	0,01	0,02	0,02	0,02	91,88	33,50	2,74
15/12/2014	B	1,12	0,55	1,46	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	91,88	33,50	2,74
15/12/2014	C	0,11	0,08	0,11	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	91,88	33,50	2,74
15/12/2014	D	7,11	9,27	4,78	7,05	0,32	0,15	0,08	0,19	91,88	33,50	2,74
22/12/2014	A	0,06	0,00	0,20	0,09	0,08	0,08	0,07	0,08	55,28	19,17	2,88
22/12/2014	B	0,06	0,01	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	55,28	19,17	2,88
22/12/2014	C	0,07	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	55,28	19,17	2,88
22/12/2014	D	2,55	0,70	0,80	1,35	0,38	0,26	0,10	0,25	55,28	19,17	2,88
25/12/2014	A	0,36	0,55	0,60	0,51	0,06	0,06	0,05	0,06	91,38	53,67	1,70
25/12/2014	B	1,95	1,07	1,64	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	91,38	53,67	1,70
25/12/2014	C	0,06	0,05	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	91,38	53,67	1,70
25/12/2014	D	4,85	8,24	4,22	5,77	0,56	0,52	0,21	0,43	91,38	53,67	1,70
04/01/2015	A	0,11	0,30	0,41	0,27	0,12	0,13	0,12	0,12	19,58	41,84	0,47
04/01/2015	B	0,17	0,03	0,12	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	19,58	41,84	0,47
04/01/2015	C	0,10	0,04	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	19,58	41,84	0,47
04/01/2015	D	2,62	6,83	2,62	4,02	0,97	0,90	0,25	0,71	19,58	41,84	0,47
14/01/2015	A	0,03	0,09	0,13	0,08	0,05	0,07	0,06	0,06	44,98	17,33	2,60
14/01/2015	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	44,98	17,33	2,60
14/01/2015	C	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	44,98	17,33	2,60
14/01/2015	D	2,76	2,90	2,55	2,73	0,60	0,45	0,07	0,37	44,98	17,33	2,60
28/01/2015	A	0,65	0,75	1,07	0,82	0,15	0,14	0,14	0,14	63,44	75,69	0,84
28/01/2015	B	4,44	4,51	5,24	4,73	0,00	0,00	0,00	0,00	63,44	75,69	0,84
28/01/2015	C	0,09	0,13	0,12	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	63,44	75,69	0,84
28/01/2015	D	13,21	13,21	8,90	11,77	0,90	0,77	0,43	0,70	63,44	75,69	0,84
03/02/2015	A	0,10	0,16	0,19	0,15	0,06	0,06	0,06	0,06	19,82	12,69	1,56
03/02/2015	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	19,82	12,69	1,56
03/02/2015	C	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	19,82	12,69	1,56
03/02/2015	D	3,25	3,25	2,76	3,08	0,57	0,33	0,15	0,35	19,82	12,69	1,56
10/02/2015	A	0,51	0,55	0,96	0,67	0,04	0,02	0,04	0,03	39,12	24,85	1,57

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
10/02/2015	B	3,04	3,18	3,04	3,08	0,00	0,02	0,03	0,02	39,12	24,85	1,57
10/02/2015	C	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	39,12	24,85	1,57
10/02/2015	D	13,69	3,39	7,88	8,32	0,75	0,40	0,16	0,44	39,12	24,85	1,57
12/02/2015	A	0,27	0,27	0,36	0,30	0,04	0,05	0,04	0,04	4,36	3,17	1,38
12/02/2015	B	2,41	1,64	1,52	1,86	0,01	0,01	0,00	0,01	4,36	3,17	1,38
12/02/2015	C	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,05	0,04	0,04	4,36	3,17	1,38
12/02/2015	D	11,12	2,95	3,54	5,87	0,70	0,40	0,21	0,44	4,36	3,17	1,38
19/02/2015	A	1,23	1,76	2,69	1,89	0,06	0,07	0,08	0,07	139,83	34,84	4,01
19/02/2015	B	10,09	21,91	16,28	16,09	0,00	0,01	0,01	0,01	139,83	34,84	4,01
19/02/2015	C	0,25	0,20	0,08	0,18	0,00	0,02	0,00	0,01	139,83	34,84	4,01
19/02/2015	D	20,93	4,02	6,49	10,48	1,98	0,90	0,63	1,17	139,83	34,84	4,01
05/03/2015	A	0,02	0,13	0,17	0,11	0,02	0,03	0,02	0,03	75,12	29,17	2,58
05/03/2015	B	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	75,12	29,17	2,58
05/03/2015	C	0,04	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	75,12	29,17	2,58
05/03/2015	D	0,22	0,03	0,05	0,10	0,17	0,18	0,10	0,15	75,12	29,17	2,58
11/03/2015	A	0,08	0,70	0,46	0,41	0,02	0,02	0,02	0,02	113,70	36,82	3,09
11/03/2015	B	3,32	3,74	4,09	3,71	0,00	0,00	0,00	0,00	113,70	36,82	3,09
11/03/2015	C	0,06	0,12	0,03	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	113,70	36,82	3,09
11/03/2015	D	21,49	3,74	2,90	9,37	2,28	0,93	0,82	1,34	113,70	36,82	3,09
19/03/2015	A	0,27	0,86	0,60	0,58	0,01	0,00	0,01	0,01	121,36	53,68	2,26
19/03/2015	B	5,24	6,56	5,24	5,68	0,00	0,00	0,00	0,00	121,36	53,68	2,26
19/03/2015	C	0,39	0,04	0,04	0,16	0,00	0,01	0,00	0,01	121,36	53,68	2,26
19/03/2015	D	21,49	4,09	5,89	10,49	1,52	0,87	1,68	1,36	121,36	53,68	2,26
23/03/2015	A	0,80	4,09	8,31	4,40	0,01	0,00	0,02	0,01	127,96	38,66	3,31
23/03/2015	B	21,49	21,49	20,52	21,16	0,00	0,05	0,01	0,02	127,96	38,66	3,31
23/03/2015	C	0,30	0,27	0,25	0,27	0,01	0,03	0,00	0,02	127,96	38,66	3,31
23/03/2015	D	21,49	12,93	11,32	15,25	2,06	1,00	0,93	1,33	127,96	38,66	3,31
07/04/2015	C	0,02	0,05	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,01	39,67	28,01	1,42
29/04/2015	A	0,10	0,10	0,08	0,09	0,01	0,02	0,02	0,02	111,20	40,02	2,78
29/04/2015	B	1,58	1,01	1,52	1,37	0,00	0,00	0,00	0,00	111,20	40,02	2,78
29/04/2015	C	0,15	0,17	0,05	0,12	0,02	0,03	0,00	0,02	71,53	12,01	5,96
29/04/2015	D	16,02	9,64	11,02	12,23	3,04	1,49	1,62	2,05	111,20	40,02	2,78
12/05/2015	A	0,01	0,01	0,05	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	48,06	21,66	2,22
12/05/2015	B	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	48,06	21,66	2,22
12/05/2015	C	0,08	0,09	0,05	0,07	0,01	0,02	0,00	0,01	48,06	21,66	2,22
12/05/2015	D	4,02	2,21	2,62	2,95	1,50	0,62	0,64	0,92	48,06	21,66	2,22
10/06/2015	A	0,06	0,06	0,06	0,06	0,01	0,02	0,01	0,01	101,23	46,34	2,18
10/06/2015	B	0,06	0,06	0,14	0,09	0,02	0,01	0,01	0,01	101,23	46,34	2,18
10/06/2015	C	0,10	0,18	0,05	0,11	0,01	0,02	0,00	0,01	101,23	46,34	2,18
10/06/2015	D	13,97	4,33	4,08	7,46	1,73	1,28	1,04	1,35	101,23	46,34	2,18
10/07/2015	A	0,02	0,01	0,10	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	59,84	30,33	1,97
10/07/2015	B	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	59,84	30,33	1,97
10/07/2015	C	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	59,84	30,33	1,97

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
10/07/2015	D	0,04	0,01	0,11	0,05	0,09	0,08	0,07	0,08	59,84	30,33	1,97
11/09/2015	A	0,01	0,15	0,30	0,15	0,01	0,00	0,01	0,01	231,14	74,85	3,09
11/09/2015	B	1,83	1,52	13,21	5,52	0,01	0,01	0,02	0,02	231,14	74,85	3,09
11/09/2015	C	0,04	0,32	0,07	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	231,14	74,85	3,09
11/09/2015	D	20,38	20,38	15,33	18,69	2,88	1,60	1,59	2,02	231,14	74,85	3,09
27/09/2015	A	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	57,85	34,50	1,68
27/09/2015	B	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	57,85	34,50	1,68
27/09/2015	C	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00	0,01	57,85	34,50	1,68
27/09/2015	D	0,12	0,01	0,08	0,07	0,67	0,41	0,43	0,51	57,85	34,50	1,68
23/10/2015	A	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	61,11	18,00	3,40
23/10/2015	B	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	61,11	18,00	3,40
23/10/2015	C	0,03	0,02	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	61,11	18,00	3,40
23/10/2015	D	0,65	1,29	1,83	1,26	0,48	0,38	0,40	0,42	61,11	18,00	3,40
04/11/2015	A	0,02	0,11	0,04	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00	108,87	67,50	1,61
04/11/2015	B	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	108,87	67,50	1,61
04/11/2015	C	0,18	0,23	0,09	0,17	0,00	0,01	0,00	0,00	108,87	67,50	1,61
04/11/2015	D	0,17	0,96	2,21	1,11	0,33	0,26	0,40	0,33	108,87	67,50	1,61
21/11/2015	A	0,03	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	139,18	45,33	3,07
21/11/2015	B	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	139,18	45,33	3,07
21/11/2015	C	0,18	0,07	0,06	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	139,18	45,33	3,07
21/11/2015	D	3,81	22,07	2,08	9,32	0,70	0,60	0,88	0,73	139,18	45,33	3,07
25/11/2015	A	0,04	0,08	0,12	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	82,78	13,16	6,29
25/11/2015	B	12,32	10,74	17,63	13,56	0,01	0,01	0,01	0,01	82,78	13,16	6,29
25/11/2015	C	0,01	0,36	0,23	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	82,78	13,16	6,29
25/11/2015	D	11,62	21,35	21,35	18,10	1,88	1,34	1,69	1,64	82,78	13,16	6,29
28/12/2015	A	0,01	4,72	0,41	1,71	0,03	0,04	0,03	0,04	196,36	79,00	2,49
28/12/2015	B	0,02	0,01	0,21	0,08	0,00	0,01	0,01	0,01	196,36	79,00	2,49
28/12/2015	C	0,10	0,10	0,57	0,26	0,01	0,01	0,00	0,01	196,36	79,00	2,49
28/12/2015	D	2,62	3,32	3,67	3,20	2,09	1,51	1,92	1,84	196,36	79,00	2,49
31/12/2015	A	0,02	0,26	0,21	0,16	0,01	0,01	0,01	0,01	71,88	35,83	2,01
31/12/2015	B	0,21	0,02	0,41	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	71,88	35,83	2,01
31/12/2015	C	0,09	0,11	0,07	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	71,88	35,83	2,01
31/12/2015	D	2,69	2,76	3,32	2,92	1,71	2,69	3,96	2,79	71,88	35,83	2,01
10/01/2016	A	0,00	2,41	2,76	1,72	0,06	0,04	0,05	0,05	252,16	68,01	3,71
10/01/2016	B	12,86	11,25	20,93	15,02	0,01	0,01	0,01	0,01	252,16	68,01	3,71
10/01/2016	C	0,30	0,36	0,09	0,25	0,01	0,03	0,00	0,01	252,16	68,01	3,71
10/01/2016	D	2,62	20,93	2,62	8,72	4,14	3,19	2,08	3,14	252,16	68,01	3,71
13/01/2016	A	0,75	0,70	1,07	0,84	0,02	0,01	0,02	0,02	295,79	52,50	5,63
13/01/2016	B	5,89	12,93	22,91	13,91	0,01	0,01	0,00	0,01	295,79	52,50	5,63
13/01/2016	C	0,17	0,23	0,08	0,16	0,01	0,01	0,00	0,01	295,79	52,50	5,63
13/01/2016	D	21,42	19,42	20,86	20,57	3,18	3,09	3,21	3,16	295,79	52,50	5,63
31/01/2016	A	1,35	0,23	1,12	0,90	0,01	0,01	0,01	0,01	225,33	75,68	2,98
31/01/2016	B	10,93	10,09	19,49	13,51	0,05	0,05	0,04	0,05	225,33	75,68	2,98

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
31/01/2016	C	0,24	0,25	0,07	0,19	0,02	0,03	0,01	0,02	225,33	75,68	2,98
31/01/2016	D	21,91	21,84	15,84	19,86	1,16	1,63	0,78	1,19	225,33	75,68	2,98
14/02/2016	A	0,14	0,14	0,14	0,14	0,02	0,01	0,03	0,02	53,65	14,17	3,79
14/02/2016	B	1,23	0,96	2,62	1,60	0,01	0,01	0,01	0,01	53,65	14,17	3,79
14/02/2016	C	0,09	0,08	0,03	0,07	0,01	0,01	0,00	0,01	53,65	14,17	3,79
14/02/2016	D	15,47	10,41	10,09	11,99	2,01	1,77	2,82	2,20	53,65	14,17	3,79
23/02/2016	A	0,00	0,08	0,14	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	50,74	34,00	1,49
23/02/2016	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	50,74	34,00	1,49
23/02/2016	C	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	50,74	34,00	1,49
23/02/2016	D	0,19	0,00	0,14	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	50,74	34,00	1,49
02/03/2016	A	0,53	0,48	0,23	0,41	0,00	0,01	0,01	0,01	76,12	32,67	2,33
02/03/2016	B	0,25	2,55	0,63	1,14	0,01	0,01	0,00	0,01	76,12	32,67	2,33
02/03/2016	C	0,05	0,07	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	76,12	32,67	2,33
02/03/2016	D	8,41	0,23	0,00	2,88	1,43	1,00	1,04	1,16	76,12	32,67	2,33
09/03/2016	A	0,00	0,10	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	33,08	7,33	4,51
09/03/2016	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	33,08	7,33	4,51
09/03/2016	C	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	33,08	7,33	4,51
09/03/2016	D	1,29	0,19	0,23	0,57	0,39	0,38	0,36	0,38	33,08	7,33	4,51
13/03/2016	A	0,10	0,21	0,21	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	62,84	30,33	2,07
13/03/2016	B	0,30	0,78	1,41	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	62,84	30,33	2,07
13/03/2016	C	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	62,84	30,33	2,07
13/03/2016	D	5,42	8,90	3,78	6,03	0,47	0,54	0,91	0,64	62,84	30,33	2,07
18/03/2016	A	0,08	0,17	0,12	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	39,53	16,17	2,44
18/03/2016	B	0,00	0,06	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	39,53	16,17	2,44
18/03/2016	C	0,06	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	39,53	16,17	2,44
18/03/2016	D	0,07	0,09	0,21	0,12	0,16	0,07	0,12	0,12	39,53	16,17	2,44
28/03/2016	A	0,06	0,06	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	31,93	4,33	7,37
28/03/2016	B	1,01	0,99	0,19	0,73	0,01	0,00	0,00	0,00	31,93	4,33	7,37
28/03/2016	C	0,03	0,06	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	31,93	4,33	7,37
28/03/2016	D	2,41	1,89	3,85	2,71	0,51	0,56	0,80	0,62	31,93	4,33	7,37
18/05/2016	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	64,85	35,01	1,85
18/05/2016	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	64,85	35,01	1,85
18/05/2016	C	0,00	0,09	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	64,85	35,01	1,85
18/05/2016	D	0,23	1,12	1,95	1,10	0,35	0,30	0,58	0,41	64,85	35,01	1,85
25/05/2016	A	0,00	0,27	0,27	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	35,96	37,51	0,96
25/05/2016	B	0,70	0,75	1,64	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	35,96	37,51	0,96
25/05/2016	C	0,08	0,13	0,05	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	35,96	37,51	0,96
25/05/2016	D	13,49	4,81	6,42	8,24	1,71	0,46	0,49	0,88	35,96	37,51	0,96
08/06/2016	A	0,96	0,91	0,75	0,87	0,00	0,01	0,01	0,01	47,28	11,86	3,99
08/06/2016	B	0,19	0,91	0,23	0,44	0,00	0,00	0,01	0,00	47,28	11,86	3,99
08/06/2016	C	0,31	0,22	0,16	0,23	0,01	0,01	0,02	0,02	47,28	11,86	3,99
08/06/2016	D	14,04	4,15	10,02	9,41	2,01	1,15	1,99	1,72	47,28	11,86	3,99
02/09/2016	A	0,00	0,06	0,14	0,07	0,00	0,00	0,01	0,01	66,18	40,51	1,63

Data da coleta	Uso do solo	ES (mm)				ER (t ha ⁻¹)				PP		
		R1	R2	R3	M	R1	R2	R3	M	T (mm)	D (h)	I (mm h ⁻¹)
02/09/2016	B	0,06	0,06	0,06	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	66,18	40,51	1,63
02/09/2016	C	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	66,18	40,51	1,63
02/09/2016	D	0,14	0,14	0,51	0,26	0,84	0,53	0,67	0,68	66,18	40,51	1,63
17/10/2016	A	0,00	0,06	0,02	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	68,41	39,01	1,75
17/10/2016	B	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	68,41	39,01	1,75
17/10/2016	C	0,03	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	68,41	39,01	1,75
17/10/2016	D	0,84	0,23	2,18	1,08	0,64	0,24	0,87	0,58	68,41	39,01	1,75
27/10/2016	A	0,25	0,21	0,60	0,35	0,00	0,01	0,01	0,01	112,97	36,67	3,08
27/10/2016	B	2,69	2,48	6,09	3,75	0,00	0,00	0,00	0,00	112,97	36,67	3,08
27/10/2016	C	0,13	0,22	0,09	0,14	0,01	0,00	0,00	0,00	112,97	36,67	3,08
27/10/2016	D	6,49	6,49	4,15	5,71	1,04	0,41	2,19	1,21	112,97	36,67	3,08
10/11/2016	A	0,16	0,25	0,39	0,27	0,01	0,01	0,01	0,01	72,70	13,33	5,45
10/11/2016	B	0,30	0,43	1,23	0,65	0,00	0,00	0,01	0,00	72,70	13,33	5,45
10/11/2016	C	0,10	0,09	0,02	0,07	0,01	0,02	0,01	0,01	72,70	13,33	5,45
10/11/2016	D	4,03	2,58	3,28	3,30	1,69	0,79	1,16	1,22	72,70	13,33	5,45
18/11/2016	A	0,01	0,43	0,14	0,19	0,00	0,00	0,01	0,00	77,99	25,51	3,06
18/11/2016	B	0,06	0,06	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	77,99	25,51	3,06
18/11/2016	C	0,21	0,02	0,04	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	77,99	25,51	3,06
18/11/2016	D	1,61	0,65	1,23	1,17	0,27	0,13	0,20	0,20	77,99	25,51	3,06
06/12/2016	A	0,14	0,21	0,19	0,18	0,07	0,06	0,06	0,07	52,80	16,34	3,23
06/12/2016	B	0,00	0,01	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	52,80	16,34	3,23
06/12/2016	C	0,12	0,07	0,02	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	52,80	16,34	3,23
06/12/2016	D	3,91	2,28	3,28	3,16	1,09	0,45	0,76	0,77	52,80	16,34	3,23
14/12/2016	A	0,07	0,27	0,19	0,18	0,06	0,07	0,05	0,06	69,36	39,17	1,77
14/12/2016	B	0,04	0,06	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	69,36	39,17	1,77
14/12/2016	C	0,07	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	69,36	39,17	1,77
14/12/2016	D	1,31	0,58	0,73	0,87	0,63	0,30	0,49	0,47	69,36	39,17	1,77
22/12/2016	A	0,00	0,10	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	26,26	9,50	2,76
22/12/2016	B	0,00	0,01	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	26,26	9,50	2,76
22/12/2016	C	0,05	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	26,26	9,50	2,76
22/12/2016	D	0,46	0,14	0,41	0,34	0,25	0,15	0,17	0,19	26,26	9,50	2,76
06/01/2017	A	0,02	0,25	0,25	0,17	0,05	0,05	0,04	0,04	63,42	18,18	3,49
06/01/2017	B	1,18	1,41	2,75	1,78	0,00	0,00	0,01	0,00	63,42	18,18	3,49
06/01/2017	C	0,12	0,03	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	63,42	18,18	3,49
06/01/2017	D	9,22	7,08	5,03	7,11	1,15	0,42	0,76	0,78	63,42	18,18	3,49

Apêndice C – Dados mensais do balanço hídrico das parcelas experimentais em Itirapina, SP

Ano/Meses	Balanço hídrico (mm mês ⁻¹) para diferentes usos do solo												
	Cerrado s.s.				Cana-de-açúcar			Pastagem			Solo exposto		
	PP	dS	ET	ES	dS	ET	ES	dS	ET	ES	dS	EV	ES
2012													
jan	295	176	118	0	201	75	18	224	62	9	169	97	28
fev	214	73	139	2	88	107	19	122	81	11	116	64	34
mar	58	69	127	0	8	49	0	5	53	0	25	31	2
abr	158	72	85	0	130	27	1	137	19	2	121	27	10
mai	72	3	69	0	8	80	0	16	56	0	21	41	11
jun	167	114	52	1	102	63	1	124	42	1	98	35	34
jul	37	24	61	0	8	29	0	13	51	0	8	21	8
ago	0	91	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
set	91	18	109	0	53	38	1	66	24	1	64	22	6
out	117	24	141	0	52	62	3	51	64	3	53	45	20
nov	84	50	134	0	15	69	0	14	70	0	35	42	8
dez	294	146	148	0	181	110	3	187	103	4	154	97	44
2013													
jan	219	90	128	0	108	108	3	121	94	5	137	58	24
fev	146	29	117	0	58	85	2	60	81	4	69	60	17
mar	160	41	118	0	70	87	3	66	82	12	71	65	25
abr	36	47	83	0	1	37	1	13	44	5	3	18	15
mai	162	98	63	0	154	8	0	156	6	0	137	11	13
jun	75	26	49	0	4	78	0	3	57	15	28	40	7
jul	21	28	48	0	4	24	0	19	40	0	3	17	0
ago	5	61	65	0	5	0	0	5	0	0	2	2	0
set	65	6	72	0	36	29	0	36	29	0	35	28	3
out	172	44	128	0	98	74	1	87	74	11	88	54	31
nov	189	60	129	0	118	70	0	100	88	1	123	60	6
dez	156	9	146	0	38	117	0	49	107	1	98	57	0
2014													
jan	88	60	148	0	29	116	0	15	103	0	34	53	2
fev	151	9	142	0	93	58	0	105	46	0	104	44	3
mar	188	58	130	0	97	88	2	99	84	6	113	66	9
abr	54	33	87	0	20	34	0	17	37	0	21	33	0
mai	52	9	61	0	27	25	0	33	20	0	34	18	0
jun	2	49	51	0	13	14	0	18	19	0	1	3	0
jul	25	17	41	0	19	6	0	18	7	0	13	12	0
ago	6	59	65	0	6	0	0	6	0	0	3	3	0
set	96	25	71	0	61	35	0	52	43	0	52	42	1
out	14	127	140	0	15	29	0	11	25	0	4	10	0
nov	172	46	126	0	106	66	0	93	79	0	103	57	12
dez	236	92	143	0	151	85	1	130	104	3	128	89	19

Ano/Meses	Balanço hídrico (mm mês ⁻¹) para diferentes usos do solo												
	Cerrado s.s.				Cana-de-açúcar			Pastagem			Solo exposto		
	PP	dS	ET	ES	dS	ET	ES	dS	ET	ES	dS	EV	ES
2015													
jan	99	67	167	0	25	73	1	23	71	5	29	52	19
fev	192	91	101	0	94	95	3	91	80	21	109	56	28
mar	271	169	101	1	158	108	5	166	74	31	158	78	35
abr	52	37	89	0	1	53	0	15	65	1	7	33	12
mai	104	45	59	0	70	34	0	52	52	0	72	29	3
jun	4	49	53	0	29	32	0	30	33	0	19	15	7
jul	58	16	43	0	26	32	0	19	39	0	30	29	0
ago	17	48	64	0	14	3	0	13	3	0	9	7	0
set	161	89	71	0	96	65	0	102	53	6	96	46	19
out	66	73	138	0	34	31	0	20	46	0	34	30	1
nov	264	143	120	0	200	64	0	165	86	14	130	81	53
dez	195	36	159	0	90	103	2	97	98	0	122	67	6
2016													
jan	497	366	130	1	378	115	3	358	96	42	363	85	49
fev	142	11	131	0	28	114	0	48	93	2	64	66	12
mar	139	15	125	0	22	117	1	49	88	3	59	69	12
abr	8	89	97	0	5	3	0	2	10	0	3	5	0
mai	64	5	68	0	27	37	0	36	27	1	25	30	9
jun	28	23	51	0	13	41	1	12	40	0	5	14	9
jul	3	50	53	0	3	0	0	3	0	0	2	2	0
ago	47	13	59	0	36	10	0	37	10	0	34	13	0
set	22	55	77	0	8	29	0	7	29	0	0	21	0
out	120	10	129	0	90	29	0	84	31	4	77	36	7
nov	164	30	134	0	92	72	0	77	86	1	97	62	4
dez	148	9	158	0	32	116	0	43	105	0	77	67	4

PP: Precipitação; dS: variação no armazenamento de água no solo; ET: evapotranspiração; EV: evaporação; ES: escoamento superficial.

Apêndice D – Serviços realizados nas parcelas de cana-de-açúcar e solo exposto

Data	Uso do solo	Serviço
27/10/2011	Cana-de-açúcar	Preparo do solo
27/10/2011	Cana-de-açúcar	Adubagem e correção do solo
27/10/2011	Cana-de-açúcar	Plantio
1/11/2012	Cana-de-açúcar	Corte / colheita
1/11/2012	Cana-de-açúcar	Preparo do solo
1/11/2012	Cana-de-açúcar	Resíduo da safra anterior não removido
1/11/2013	Cana-de-açúcar	Corte / colheita
1/11/2013	Cana-de-açúcar	Preparo do solo
1/11/2013	Cana-de-açúcar	Adubagem do solo
1/11/2013	Cana-de-açúcar	Resíduo da safra anterior não removido
21/10/2014	Cana-de-açúcar	Corte / colheita / Remoção do cultivo
28/10/2014	Cana-de-açúcar	Preparo do solo
28/10/2014	Cana-de-açúcar	Adubagem e correção do solo
6/11/2014	Cana-de-açúcar	Plantio
18/12/2015	Cana-de-açúcar	Corte / colheita
18/12/2015	Cana-de-açúcar	Preparo do solo
18/12/2015	Cana-de-açúcar	Adubagem do solo
18/12/2015	Cana-de-açúcar	Resíduo da safra anterior não removido
2/12/2016	Cana-de-açúcar	Corte / colheita
2/12/2016	Cana-de-açúcar	Preparo do solo
2/12/2016	Cana-de-açúcar	Adubagem do solo
2/12/2016	Cana-de-açúcar	Resíduo da safra anterior não removido
10/11/2011	Solo exposto	Preparo do solo
2012	Solo exposto	O preparo do solo e a remoção de plantas daninhas foi realizado sem o registro das respectivas datas
2013	Solo exposto	
1/3/2014	Solo exposto	
5/9/2014	Solo exposto	Preparo do solo e remoção de plantas daninhas (enxada)
28/10/2014	Solo exposto	Preparo do solo e remoção de plantas daninhas (enxada)
15/5/2015	Solo exposto	Preparo do solo e remoção de plantas daninhas (enxada)
20/5/2015	Solo exposto	Controle químico de plantas daninhas com glifosato
9/11/2015	Solo exposto	Preparo do solo e remoção de plantas daninhas (enxada)
23/2/2016	Solo exposto	Preparo do solo e remoção de plantas daninhas (enxada)
13/3/2016	Solo exposto	Controle químico de plantas daninhas com glifosato
18/5/2016	Solo exposto	Preparo do solo e remoção de plantas daninhas (enxada)
21/10/2016	Solo exposto	Preparo do solo e remoção de plantas daninhas (enxada)
14/11/2016	Solo exposto	Controle químico de plantas daninhas com glifosato

ANEXO

Anexo A – Equações governantes do modelo WEPP (escoamento superficial e erosão do solo)

O conteúdo apresentado neste anexo é baseado nos trabalhos de Nearing *et al.* (1989) e Flanagan *et al.* (2001). Para estimativas de perda de solo através do WEPP são necessárias três variáveis hidrológicas: P_r é vazão de pico do escoamento superficial (m s^{-1}); t_r é duração do escoamento superficial (s); e I_e é intensidade efetiva da precipitação (m s^{-1}). Consequentemente, o escoamento superficial também é calculado nesse processo. Essas variáveis são calculadas a partir de séries de dados de precipitação e hidrogramas de escoamento superficial. Para a utilização de informações hidrodinâmicas em equações de regime permanente, característico das equações de erosão do solo, o escoamento superficial de pico é atribuído como a vazão em regime permanente no hidrograma. A duração efetiva do escoamento superficial é calculada a partir do tempo necessário para produzir o volume total de escoamento:

$$t_r = V_r / P_r \quad (\text{A1})$$

Em que: V_r é o volume total do escoamento superficial para um determinado evento dado em lâmina d'água (m).

A tensão de cisalhamento do escoamento superficial no sulco no final de uma vertente é calculado assumindo geometria retangular do canal. A largura do canal é calculada a partir da relação:

$$w = c Q_e^d \quad (\text{A2})$$

Em que: w é a largura do canal (m); Q_e é a vazão ao final da vertente ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); e c e d são coeficientes adimensionais.

$$Q_e = P_r L R_s \quad (\text{A3})$$

Em que: P_r é a vazão de pico (m s^{-1}); L é o comprimento da vertente (m); e R_s é a distância entre os canais de escoamento.

Modelos dinâmicos de infiltração e escoamento para estimativa do escoamento superficial consistem em uma função de infiltração que calcula a taxa de infiltração no tempo de um evento de precipitação discreto e em um código que transforma o excesso de precipitação (volume não infiltrado) em lâminas de escoamento em uma superfície. A função que calcula a infiltração é baseada no modelo de Green-Ampt e o escoamento superficial é calculado a partir das equações de Saint Venant para fluxo raso na forma do modelo da onda cinemática. No caso da presente pesquisa, em que a simulação é contínua, a solução é semi-analítica baseada no método das características. As equações do movimento para escoamento em um plano é baseada na equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \quad (\text{A4})$$

E na relação lâmina de escoamento e vazão:

$$q = C S_o^{0,5} h^m \quad (\text{A5})$$

Em que: h é a altura do escoamento (m); q é a vazão unitária ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$); t é o tempo (s); x é a distância no plano de escoamento; v é o volume do escoamento superficial (m^3); C é o coeficiente de Chèzy ($\text{m}^{0,5} \text{s}^{-1}$), e m é igual a 1,5.

As condições de contorno e iniciais são:

$$h(x, 0) = h(0, t) = 0 \quad (\text{A6})$$

Equação da continuidade para produção de sedimentos

O WEPP calcula as estimativas de deposição e desagregação de sedimentos provenientes das camadas superficiais do solo a partir da equação da continuidade de fluxo de sedimentos em regime permanente.

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (\text{A7})$$

Em que: G é a carga de sedimentos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$); x é a distância declive a baixo; D_f é a taxa de erosão do solo no sulco ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); e D_i é a taxa de aporte de sedimentos entressulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

O aporte de sedimentos entressulcos é estimado no WEPP a partir da equação:

$$Di = K_{iadj} I_e S_{ir} SDR_{RR} F_{nozzle} (R_s / w_{rill}) \quad (A8)$$

Em que: K_{iadj} é a erodibilidade do solo entressulcos ajustada (kg s m^{-4}); I_e é a intensidade efetiva da precipitação (m s^{-1}); S_{ir} é a taxa de escoamento superficial (m s^{-1}); SDR_{RR} é a relação aporte de sedimentos em função da rugosidade, declividade do sulco e tamanho das partículas do solo, F_{nozzle} é o fator de correção para culturas irrigadas (1 para quando a chuva é natural), R_s e w_{rill} são o espaçamento e largura do sulco, respectivamente (m).

A intensidade efetiva da precipitação é estimada a partir da taxa de infiltração:

$$I_e = \int_0^{te} (I/te) I dt \quad (A9)$$

Em que: I_e é intensidade efetiva da chuva (m s^{-1}); I é a intensidade da chuva no tempo t (m s^{-1}); t é o tempo (s); e te é o tempo total em que a precipitação excede taxa de infiltração (s).

$$RIF = -23 RR + 1,14 \quad (A10)$$

Em que: RIF é o fator de rugosidade entressulcos; e RR é a rugosidade aleatória (m) em relação ao escoamento superficial.

$$DR_i = az (RIF)^{bz} \quad (A11)$$

Em que:

$$az = e^{(0,072+6,59 v_{fi})} \quad (A12)$$

$$bz = 0,1286 + 2209 v_{fi} \quad (A13)$$

E para as partículas com velocidade de queda maior ou igual a $0,01 \text{ m s}^{-1}$ a relação utilizada é:

$$DR_i = 2,5 RIF - 1,5 \quad (A14)$$

Em que o subscrito i representa cada classe de tamanho das partículas e o DR varia entre 0 e 1.

$$SDR_{RR} = \sum f_{deti}(DR_i) \quad (A15)$$

Em que f_{deti} é a fração de cada classe de tamanho de partículas entressulcos. Nos sulcos a fração é calculada como sendo:

$$f_{ideli} = f_{deti}(DR_i/SDR_{RR}) \quad (A16)$$

A erosão no sulco pode ser positiva em caso de desagregação ou negativa em caso de deposição. A desagregação é dada pela equação:

$$D_f = K_{radj}(\tau - \tau_{cadj})[1 - (G/T_c)] \quad (A17)$$

Em que: K_{radj} é a erodibilidade do solo no sulco ajustada ($s\ m^{-1}$); τ é a tensão crítica de cisalhamento (Pa); τ_{cadj} é tensão crítica de cisalhamento ajustada do solo (Pa); G é a carga de sedimentos contidos no fluxo de escoamento superficial ($kg\ s^{-1}\ m^{-1}$); e T_c é a capacidade de transporte de sedimento calculada a partir da tensão crítica de cisalhamento elevada a 1,5.

A deposição nos sulcos é estimada quando o fluxo de sedimentos excede a capacidade de transporte de sedimentos.

$$D_f = (\beta\ v_{eff}/q)[T_c - G] \quad (A18)$$

Em que: β é o fator de turbulência causada pelas gotas de chuva (0,5); v_{eff} é a velocidade efetiva de queda dos sedimentos ($m\ s^{-1}$); e q é a vazão unitária ($m^2\ s^{-1}$).