



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

GUILHERME MARQUES FARIAS

**OTIMIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MODELO
HIDROSEDIMENTOLÓGICO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS**

FORTALEZA

2020

GUILHERME MARQUES FARIAS

OTIMIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MODELO
HIDROSEDIMENTOLÓGICO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Mariano da Franca Alencar Neto.

FORTALEZA

2020

GUILHERME MARQUES FARIAS

OTIMIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MODELO
HIDROSEDIMENTOLÓGICO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus Fortaleza*, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovado (a) em: 06 / 02 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mariano da Franca Alencar Neto (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus Fortaleza*

Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus Fortaleza*

Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro

Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser minha fonte de força e esperança nos momentos de dificuldade.

A meus pais, Marta e José Maria, pelo incentivo, compreensão e amor incondicional durante todo este período de estudos. Além do grande esforço que vêm fazendo desde o meu nascimento para que eu consiga um futuro melhor.

Aos meus irmãos, Gustavo e Carlinhos, pelos conselhos e motivação, que me ajudaram a superar as dificuldades.

A minha noiva, Brena Elaine, por ser minha fortaleza nos momentos de dificuldade, pelo estímulo, carinho, compreensão e amor, que foram fundamentais para a obtenção deste título tão sonhado.

Ao meu Tio Luciano, por ter feito o possível e o impossível para me ajudar nos momentos de dificuldades, além dos preciosos conselhos que sempre levo como lição de vida.

Ao meu grande amigo Ismael Furtado, pelo acolhimento, atenção e ajuda durante todo este período, os quais foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao professor Mariano da Franca Alencar Neto, pela orientação segura, confiança, apoio e por todas as oportunidades de aprendizado que certamente foram fundamentais para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao professor e amigo Luís Henrique Magalhães Costa, por ter me ajudado a despertar o interesse pela vida acadêmica, pela confiança, pelas oportunidades, pelos conhecimentos repassados e lições de vida, que foram fundamentais para a criação de uma base de conhecimento sólida.

Aos amigos e colegas de estudo, em especial aos que me acompanharam durante o mestrado, que vivenciaram comigo os desafios e me ajudaram a vencê-los.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa que estudo que me foi concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Enfim, a todos os que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

RESUMO

A erosão hídrica do solo tem sido objeto de discussão em diversos setores relacionados a gestão do uso do solo e da água, em virtude dos efeitos negativos que a produção de sedimentos acelerada pode provocar aos recursos naturais, sobretudo no semiárido, onde a água se mostra um recurso escasso. A simulação de eventos hidrossedimentológicos por meio de modelos matemáticos tem se tornado uma alternativa viável no sentido de prever como ocorrem os processos físicos. Todavia, a utilização eficiente destes modelos como ferramenta de predição está condicionada ao grau de precisão dos parâmetros envolvidos na simulação, que muitas vezes são calibrados manualmente, provocando a necessidade de um grande esforço computacional por parte do usuário. Nesse sentido, o trabalho tem como objetivo a criação de um modelo computacional que possibilite a aplicação da técnica de algoritmos genéticos (AG) no processo de calibração dos parâmetros (C_f , C_o , K_{sat} , S_i , G) do modelo Kinneros2, de modo a torná-lo automático. O estudo foi aplicado em três microbacias experimentais do semiárido cearense, apresentando estas as características de vegetação nativa (Nativa), caatinga resultante de um processo de raleamento (Raleada) e área destinada a pastagem (Queima e pastagem). A calibração foi feita com o conjunto de dados do ano de 2011, sendo validada para os dados de 2009, 2010, 2012, 2013 e 2016. Para a função objetivo otimizada pelo AG foi adotado o índice de Willmott, tendo o resultado da calibração uma verificação adicional por mais duas funções de avaliação, o índice de concordância (c) e Fator de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), sendo a última também utilizada no processo de validação dos dados. Diante dos resultados apresentados no estudo, percebeu-se uma robustez da técnica de algoritmos genéticos, expressa por meio dos valores de 0,903, 0,926 e 0,952 obtidos para a função objetivo na calibração das microbacias nativa, raleada e queima e pastagem, respectivamente. Os parâmetros obtidos pelo AG na calibração das três microbacias conseguiram refletir as especificidades identificadas *in loco*, além de apresentarem valores que se mantiveram dentro dos intervalos preestabelecidos pela literatura. Em relação à validação para as três microbacias percebeu-se um comportamento diferente em anos que apresentaram pluviosidade abaixo da média histórica e os que se mantiveram acima da mesma, apresentando-se melhores valores de NSE para o segundo caso. Uma das possíveis causas para o fenômeno em questão pode ser o processo de fendilhamento ao qual as microbacias estão sujeitas durante a estação seca, que podem causar superestimativas de massa de sedimentos por parte do Kinneros2.

Palavras-chave: Kinneros2. Algoritmo genético. Calibração. Otimização. Sedimento.

ABSTRACT

Soil water erosion has been the subject of discussion in several sectors related to the management of land and water use, due to the negative effects that accelerated sediment production can cause to natural resources, especially in the semiarid, where water is a scarce resource. The simulation of hydrosedimentological events by means of mathematical models has become a viable alternative in order to predict how physical processes occur. However, the efficient use of these models as a prediction tool is conditioned to the degree of precision of the parameters involved in the simulation, which are often manually calibrated, causing the need for a great computational effort by the user. In this sense, the work aims to create a computational model that allows the application of the technique of genetic algorithms (AG) in the process of calibrating the parameters (C_f , C_o , K_{sat} , S_i , G) of the Kinneros2 model, in order to make it automatic. The study was applied in three experimental watersheds in the semi-arid region of Ceará, which presented the characteristics of native vegetation (Nativa), caatinga resulting from a thinning process (Raleada) and area destined to pasture (Queima e Pastagem). The calibration was performed with the 2011 data set, being validated for the 2009, 2010, 2012, 2013 and 2016 data. For the objective function optimized by the AG, the Willmott index was adopted, with the calibration result being one additional verification by two more evaluation functions, the agreement index (c) and Nash and Sutcliffe Efficiency Factor (NSE), the latter being also used in the data validation process. In view of the results presented in the study, it was noticed a robustness of the genetic algorithm technique, expressed through the values of 0.903, 0.926 and 0.952 obtained for the objective function in the calibration of the native, thinning and burning and grazing watersheds, respectively. The parameters obtained by the AG in the calibration of the three micro-basins managed to reflect the specificities identified in loco, in addition to presenting values that remained within the intervals pre-established by the literature. Regarding the validation for the three micro-basins, a different behavior was observed in years that presented rainfall below the historical average and those that remained above it, presenting better values of NSE for the second case. One of the possible causes for the phenomenon in question may be the cracking process to which the microbasins are subjected during the dry season, which can cause overestimation of sediment mass by Kinneros2.

Keywords: Kinneros2. Genetic Algorithm. Calibration. Optimization. Sediment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Descrição dos processos envolvidos durante a simulação do K2.	23
Figura 2 — Descrição do formato de um bloco para o arquivo PAR.	29
Figura 3 — Modelo do arquivo com extensão PRE.	32
Figura 4 — Descrição das informações requeridas para executar o Kineros2.	34
Figura 5 — Descrição do funcionamento de um AG.	36
Figura 6 — Representação do processo de cruzamento em um AG com codificação binária.	38
Figura 7 — Representação do processo de mutação em um AG com codificação binária.	39
Figura 8 — Localização das microbacias estudadas.	41
Figura 9 - Vegetação da microbacia nativa durante a estação chuvosa (a) e a estação seca (b).	43
Figura 10 - Vegetação da microbacia raleada durante a estação chuvosa (a) e a estação seca (b).	43
Figura 11 - Vegetação da microbacia de queima e pastagem durante a estação seca (a) e a estação chuvosa (b).	44
Figura 12 — (a) Estrutura do solo no período seco; (b) Encharcamento do solo no período chuvoso.	45
Figura 13 — Discretização proposta para a microbacia nativa.	46
Figura 14 — Discretização proposta para a microbacia raleada.	46
Figura 15 — Discretização proposta para a microbacia de queima e pastagem.	47
Figura 16 — Representação de um cromossomo para a rotina desenvolvida neste estudo.	50
Figura 17 — Representação do processo de execução da rotina computacional desenvolvida.	53
Figura 18 - Descrição do processo de validação dos dados	55
Figura 19 - Evolução da função objetivo a cada geração na calibração para as microbacias: (a) nativa; (b) raleada; (c) queima e pastagem.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Descrição dos parâmetros globais do arquivo de entrada.....	30
Tabela 2 — Descrição dos parâmetros dos canais que compõem o arquivo de entrada.	30
Tabela 3 — Descrição dos parâmetros dos planos que compõem o arquivo de entrada.....	31
Tabela 4 — Descrição dos parâmetros do arquivo de chuva.	32
Tabela 5 — Descrição das características morfométricas das microbacias experimentais.	42
Tabela 6 — Características físicas de planos e canais da microbacia nativa.	47
Tabela 7 — Características físicas de planos e canais da microbacia raleada.	47
Tabela 8 — Características físicas de planos e canais da microbacia de queima e pastagem..	48
Tabela 9 — Descrição dos valores dos intervalos adotados para os parâmetros.	51
Tabela 10 - Resumo dos dados encontrados para as cinco calibrações realizadas para cada microbacia.	58
Tabela 11 - Dados utilizados na calibração da microbacia nativa.....	59
Tabela 12 - Valores encontrados pelo AG para a melhor calibração dos parâmetros da microbacia nativa.....	60
Tabela 13 - Resumo dos dados de massa de sedimentos calculada e observada para a microbacia nativa.	60
Tabela 14 - Valores adotados para os parâmetros C_f e C_o em diversos estudos da literatura. .	62
Tabela 15 – Resumo dos dados encontrados na validação para a microbacia nativa.....	64
Tabela 16 - Dados utilizados na calibração da microbacia raleada.	65
Tabela 17 - Valores encontrados pelo AG para os parâmetros da microbacia raleada.	65
Tabela 18 - Resumo dos dados encontrados na calibração para a microbacia raleada.	66
Tabela 19 - Resumo dos dados encontrados na validação para a microbacia raleada.....	69
Tabela 20 - Dados utilizados na calibração da microbacia de queima e pastagem.	69
Tabela 21 - Valores encontrados pelo AG para os parâmetros da microbacia de queima e pastagem.	70
Tabela 22 - Resumo dos dados encontrados na calibração para a microbacia de queima e pastagem.	71
Tabela 23 - Resumo dos dados encontrados na validação para a microbacia de queima e pastagem.	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (K2) para a microbacia nativa.....	61
Gráfico 2 - Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (K2) na microbacia nativa.....	63
Gráfico 3 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (K2) para a microbacia raleada.....	66
Gráfico 4 - Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (K2) na microbacia raleada.....	68
Gráfico 5 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (K2) para a microbacia de queima e pastagem.	71
Gráfico 6 - Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (K2) na microbacia de queima e pastagem.	73

LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmos Genéticos
GAF	<i>Genetic Algorithm Framework</i>
GB	<i>Giga Byte</i>
GI	<i>Green Infrastructure</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HD	<i>Hard Disk</i>
HRUs	Unidades de respostas hidrológicas
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
K2	<i>Kineros2 (Kinematic Runoff and Erosion Model)</i>
MUSLE	Equação Universal de Perdas de Solo Modificada
NSE	Fator de eficiência de Nash e Sutcliffe
PIs	Planos de informações cartográficas
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROCK	Porcentagem de rochas
RS	Rio Grande do Sul
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SWAT	<i>Soil And Water Assessment Tool</i>
USLE	Equação Universal de Perdas de Solo

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área da seção transversal do canal
a	Coeficiente de ajuste para a calibração da MUSLE
a_u	Parâmetro de declividade/rugosidade do plano contribuinte
b	Coeficiente de ajuste para a calibração da MUSLE
C	Fator relacionado com o uso do solo
$C\#$	Linguagem de programação C Sharp
C_d	Coeficiente de arrasto da partícula
C_s	Concentração de sedimento no fluxo
C_f	Coeficiente de impacto das gotas de chuva
c_g	Coeficiente da taxa de transferência de sedimento
c_h	Efetividade do amortecimento da superfície da água
C_m	Capacidade de transporte do fluxo
C_o	Coeficiente relacionado a coesão do solo
d	Diâmetro do sedimento
D	Deflúvio
e	Taxa de erosão do solo do leito por unidade de largura
e_s	Erosão pelo impacto de gotas de chuva no solo
e_h	Erosão hidráulica
F	Fahrenheit
f_c	Taxa de infiltração do solo
g	Aceleração da gravidade
G	Potencial de capilaridade do solo
h	Hora
h	Profundidade do fluxo
h	Volume de água armazenado por unidade de área

ha	Hectare
h_u	Profundidade na fronteira inferior do plano contribuinte
i	Intensidade de precipitação
I	Lâmina acumulada de infiltração
K	Fator de erodibilidade do solo
kg	Quilograma
K_{sat}	Condutividade hidráulica saturada
L	Comprimento
n	Coeficiente de rugosidade de Manning
O	Sedimentos observados
$\bar{O}$	Média dos sedimentos observados
P	Práticas conservacionistas
pol.	Polegadas
q_s	Taxa de entrada lateral de sedimentos
$q(x,t)$	Fluxo lateral por unidade de comprimento
Q	Vazão
Qp	Vazão de pico
R	Fator de erosividade das chuvas
R	Raio hidráulico
R_n	Número de Reynolds
S	Declividade
S	Sedimentos simulados
s	Segundo
S_i	Saturação do solo antes do evento de chuva
S_s	Densidade relativa do sedimento
$\bar{S}$	Média dos sedimentos simulados

t	Toneladas
u	Velocidade do fluxo
ν	Viscosidade cinemática da água
v_s	Velocidade de queda da partícula
x	Distância ao longo do sentido da declividade
W_u	Largura do plano contribuinte
ϕ	Porosidade do solo
λ	Índice de distribuição dos tamanhos dos poros
θ_i	Índice de umidade inicial do solo
α	Tipo de solo
θ_s	Umidade de saturação do solo
Ω	Potência unitária do fluxo
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\%$	Porcentagem
$\in$	Pertence
$\subseteq$	Está contido
$\Re$	Conjunto dos números reais
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Modelagem de produção de sedimentos	19
3.1.1 Exemplos de modelos hidrossedimentológicos	20
3.2 O modelo hidrossedimentológico Kineros2	22
3.2.1 Componente de infiltração	23
3.2.2 Fluxo nos planos de escoamento	24
3.2.3 Fluxo nos canais de escoamento.....	26
3.2.4 Erosão nos planos e canais	26
3.2.5 Discretização da bacia e dados de entrada do Kineros2	28
3.2.6 Parâmetros do Kineros2	32
3.2.7 Execução da simulação no Kineros2	33
3.2.8 Trabalhos envolvendo o uso do Kineros2	35
3.3 A técnica de algoritmos genéticos.....	36
3.3.1 O processo de seleção dos cromossomos	37
3.3.2 Operadores Genéticos.....	38
3.3.2.1 Operador de cruzamento	38
3.3.2.2 Operador de mutação	39
4 A ÁREA DE ESTUDO	41
4.1 Caracterização geral.....	41
4.2 Discretização das microbacias	45
5 METODOLOGIA.....	49
5.1 Implementação do AG por meio da biblioteca GAF	49
5.2 Calibração e validação dos parâmetros do Kineros2	50
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1 Análise do desempenho do AG na calibração dos parâmetros do Kineros2.....	57
6.2 Calibração automática e validação para a microbacia nativa	59
6.3 Calibração automática e validação para a microbacia raleada	64
6.4 Calibração automática e validação para a microbacia de queima e pastagem	69
7 CONCLUSÃO.....	75

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas é vital para que se alcance uma gestão eficiente dos recursos naturais. Este pressuposto é embasado pelo fato de a erosão do solo ser considerada um dos principais fatores que promovem a degradação ambiental, principalmente nos recursos hídricos, pois o solo desagregado no local de origem é transportado e comumente depositado em reservatórios de água. Além disso, pode-se listar diversos impactos resultantes deste processo, como redução do potencial agrícola e maior propensão à enchestes (FIROUZABADI; DAVOODI, 2004). No semiárido brasileiro a análise hidrossedimentológica a nível de bacia hidrográfica pode ser tomada como uma estratégia viável, de modo a contribuir para a garantia da segurança hídrica à população tendo em vista a escassez de recursos desta natureza.

A modelagem hidrossedimentológica de base física vem se tonando uma importante aliada na resolução de problemas relacionados a produção de sedimentos, uma vez que, torna possível a simulação dos fenômenos, facilitando a compreensão das causas relacionadas e, conseqüentemente, proporcionando meios para a minimização dos efeitos causados pelos mesmos. Kalin e Hantush (2006) destacam que modelos hidrossedimentológicos são amplamente utilizados por cientistas, gestores e tomadores de decisão para compreender os fatores que afetam a qualidade da água nos corpos hídricos, proporcionando a avaliação da eficácia de estratégias de controle, assim como, a criação de cenários.

O modelo de estimativa de produção de sedimentos Kineros2 (*Kinematic Runoff and Erosion Model*), uma versão atualizada do Kineros (WOOLHISER, SMITH e GOODRICH, 1990), tem sido largamente utilizado com sucesso na simulação da produção de sedimentos em bacias urbanas e rurais. Chia e Mbajiorgu (2015) e Memarian *et al.* (2012) utilizaram o Kineros2 (K2) para simular o processo de erosão do solo nas bacias hidrográficas dos rios Ebonyi (Nigéria) e Langat (Malásia), respectivamente. No Brasil, Daronco (2008) avaliou os parâmetros do K2 para as sub-bacias Alto da Colina II e Sitio do Tio Pedro, ambas localizadas na cidade de Santa Maria – RS. O modelo K2 também foi aplicado ao semiárido nordestino, no trabalho desenvolvido por Silva e Santos (2008), que utilizaram a ferramenta na bacia do rio Pirapama (Pernambuco) aliada a um software SIG com o objetivo de identificar, temporal e espacialmente, os principais locais em que o processo de erosão mais se intensificou.

Apesar da aplicabilidade do K2 a bacias do semiárido percebe-se uma certa dificuldade em se determinar precisamente os valores dos parâmetros físicos do solo, uma vez que se apresentam em grande quantidade e diversidade e possuem uma magnitude muito variável em

seus intervalos de valores. Outro ponto a se destacar é o fato de ambientes de natureza árida e semiárida possuírem uma grande heterogeneidade nas características de relevo, solo, fauna, flora e ocupação antrópica, sendo estes, aliados a precipitação pluviométrica, fatores determinantes no processo de erosão do solo. A calibração manual dos parâmetros do modelo K2 é recorrente em trabalhos envolvendo este tema, todavia, esta consiste em uma tarefa árdua, pois há a necessidade de executar o modelo diversas vezes, variando os parâmetros calibráveis através do método de tentativa e erro. O processo é repetido até que os valores calculados pelo modelo se aproximem de valores medidos ou monitorados em campo.

A facilidade de implementação e a consistência dos resultados obtidos em pesquisas de diversas áreas da ciência, são alguns dos fatores que fazem com que a modelagem computacional através da técnica evolucionária de algoritmos genéticos (AGs), seja uma alternativa viável na automatização da resolução de problemas que envolvem calibração de parâmetros de modelos matemáticos. Além disso, a robustez do método pode ser uma característica apropriada ao problema, tendo em vista a grande quantidade de variáveis envolvidas e a diversidade do espaço de busca a ser explorado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a técnica de Algoritmo Genético no processo de automatização da calibração dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico Kinneros2.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a aplicabilidade da técnica de algoritmos genéticos em problemas de hidrossedimentologia;
- Entender o impacto dos parâmetros (C_f , C_o , K_{sat} , S_i , G) no modelo Kinneros2;
- Encontrar valores para os parâmetros (C_f , C_o , K_{sat} , S_i , G) que possam caracterizar as três microbacias estudadas;
- Entender a influência do comportamento pluviométrico da região na geração de escoamento superficial e na produção de sedimentos por meio da modelagem com o Kinneros2.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo se destina a exposição de temas relevantes para a fundamentação teórica deste trabalho, os quais são importantes para o entendimento dos conceitos mencionados a posteriori.

3.1 Modelagem de produção de sedimentos

A evolução computacional que se presencia nos últimos tempos tem contribuído significativamente para a análise de fenômenos da natureza, proporcionando meios para que se possa entender suas características por meio de um processo de simulação. O uso de modelos matemáticos tem sido recorrente em estudos envolvendo perda de solo, haja vista que a determinação desta variável por meio de métodos diretos em campo se mostra, muitas vezes, um trabalho moroso e caro (REICHARDT; TIMM, 2004).

A modelagem hidrossedimentológica se apresenta como uma alternativa viável no auxílio à tomada de decisão, tendo em vista os impactos causados pela erosão do solo em bacias hidrográficas. De acordo com Rosa (2016) a modelagem de fenômenos erosivos se consolida como uma ferramenta eficiente para o monitoramento e gestão das águas, com o intuito de preservar este recurso finito e promover a manutenção da qualidade de vida dos que dependem deste bem. Para Veras *et al.* (2015) a modelagem consegue otimizar o gerenciamento de recursos hídricos de forma funcional, promovendo a prevenção de impactos futuros. Schultz, Souza e Santos (2011) afirmam que a modelagem permite estimar, de forma quantitativa, a variação de carga de sedimento provocada por alterações no uso do solo, possibilitando a previsão do impacto de modificação na bacia.

Segundo Paiva (2003) os modelos de predição de erosão podem ser classificados, quanto a sua estrutura, em empíricos e conceituais. Os modelos empíricos têm como característica o fato de serem simples e pouco robustos, sendo baseados em equações matemáticas fundamentadas em observações, fato que os confere a limitação de não realizar simulações em condições não previstas anteriormente. Modelos conceituais levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos, procurando descrever as etapas que envolvem o fenômeno estudado. Por serem mais complexos, geralmente são aplicados a nível de bacia hidrográfica, requerendo uma maior quantidade de parâmetros, assim como um nível elevado de tratamento dos dados de entrada (ARROIO JUNIOR, 2013; DALBIANCO, 2013).

Dalbiano (2013) destaca que a grande vantagem dos modelos de base física (conceituais) em relação aos empíricos está, justamente, no fato de o primeiro ser baseado na física do processo a ser analisado, onde a bacia é considerada um sistema espacialmente variável, com entradas variáveis e parâmetros mensuráveis. Além disso, destaca-se a aplicabilidade em situações onde há variações na topografia, uso do solo, cobertura vegetal e clima.

Quanto as variáveis, Santos (2009) classifica os modelos hidrossedimentológicos em concentrados e distribuídos. O primeiro não leva em conta a variabilidade espacial, sendo utilizado somente o tempo como variável independente. No segundo caso, as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo, possibilitando a análise da variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema (DA SILVA, 2015).

Dada a escassez de dados contínuos no universo temporal, o que inviabiliza muitos estudos hidrológicos, a modelagem hidrossedimentológica apresenta uma contribuição considerável para o conhecimento do comportamento de vazões e produção de sedimentos. Todavia, seu sucesso depende fortemente da qualidade do monitoramento feito em campo, sendo os dados obtidos através deste processo, necessários para a calibração e validação dos dados simulados através do modelo (ROSA, 2016). Pode-se dizer que a maior dificuldade na modelagem hidrossedimentológica ocorre na determinação dos parâmetros que caracterizam o solo, uma vez que os mesmos apresentam grande heterogeneidade em sua composição e comportamento diante de fenômenos hidrológicos.

3.1.1 Exemplos de modelos hidrossedimentológicos

Existem diversos modelos que podem ser utilizados para a avaliação da produção de sedimentos, cada um com suas características peculiares. A seguir, serão descritas em resumo as particularidades de alguns deles.

Desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) está entre os modelos empíricos mais utilizados pela comunidade acadêmica. Foi estabelecida com base em dados estudados em mais de 10.000 lotes com distintas características de clima, solo, relevo e cultivo, submetidos, exclusivamente a processos de erosão hídrica superficial do tipo laminar. Vale ressaltar que esta equação estima apenas a erosão bruta do solo, para a estimativa de produção de sedimentos, esta deve estar associada a uma equação de estimativa da razão de aporte de sedimentos (FARIAS, 2008). A formulação da USLE, expressa na Equação (1), é dada pela multiplicação de seis fatores, onde A representa a estimativa média

anual de perda do solo (t/ha/ano), R é o fator de erosividade das chuvas (MJ.mm/ha.h), K corresponde ao fator de erodibilidade do solo (t.h/MJ.mm), L é o comprimento da rampa (m) e S é a declividade da mesma (%). O fator C está relacionado com o uso do solo e o fator P representa as práticas conservacionistas, sendo os mesmos, adimensionais.

$$A = R . K . L . S . C . P \quad (1)$$

Em virtude das várias limitações encontradas na USLE, foram feitos vários ajustes ao longo dos anos no intuito de melhorar seu desempenho, dando origem a outros modelos empíricos como a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), desenvolvida por Williams (1975). A mudança mais expressiva propunha a substituição do fator R por um fator que considera o volume de escoamento superficial, a vazão de pico do hidrograma de cheia e parâmetros empíricos de acordo com a bacia, conforme mostra a equação (2), sendo a e b coeficientes de ajustes para calibração, D o deflúvio (mm) e Qp a vazão de pico (m³/s).

$$A = a . (D . Qp)^b . (K . L . S . C . P) \quad (2)$$

Como exemplo de aplicação da USLE pode-se citar o trabalho de Lin *et al.* (2019) que buscou determinar o parâmetro K na bacia hidrográfica do Shihmen, localizada em Taiwan. Dung e Quang (2017) utilizaram a USLE para simular o processo de erosão do solo na cidade de Lam Son, no Vietnã. Desavathu e Rao (2018) utilizaram a USLE em conjunto com dados fornecidos por um software GIS com o propósito de verificar o processo de erosão ocorrido na cidade de Paderu Mandal, na Índia. O mesmo método também foi aplicado no Brasil por Barbosa *et al.* (2015) para analisar, de forma qualitativa, a susceptibilidade erosiva do Município de Paraíso das Águas, no estado do Mato Grosso do Sul.

O modelo SWAT (*Soil And Water Assessment Tool*) é caracterizado como um modelo distribuído de base física desenvolvido por Arnold *et al.* (1994) com o intuito de simular o impacto da gestão de águas, sedimentos, e produtos químicos da agricultura a nível de bacia hidrográfica, sendo seus principais parâmetros relacionados ao clima, hidrologia, temperatura, propriedades do solo, desenvolvimento de plantas, nutrientes, pesticidas, bactérias e patógenos, assim como o manejo do solo (DALBIANCO, 2013).

No SWAT a bacia é dividida em múltiplas sub-bacias, sendo estas, subdivididas em unidades de respostas hidrológicas (HRUs), estas, por sua vez, tem como característica o fato

de possuírem um único tipo e uso de solo, assim como, uma única classe de declividade, traduzindo, em termos espaciais a possível heterogeneidade do sistema (ROSA, 2016).

Uma particularidade interessante é que as informações de entrada requeridas pelo modelo podem ser inseridas através da interação com um software GIS, sendo organizados em planos de informações cartográficas (PIs) e dados tabulares, sendo o primeiro relacionado a mapas de uso de solo, mapas pedológicos, hidrografia e modelo numérico do terreno. O segundo corresponde a informações sobre os demais componentes do sistema a ser simulado (DALBIANCO, 2013).

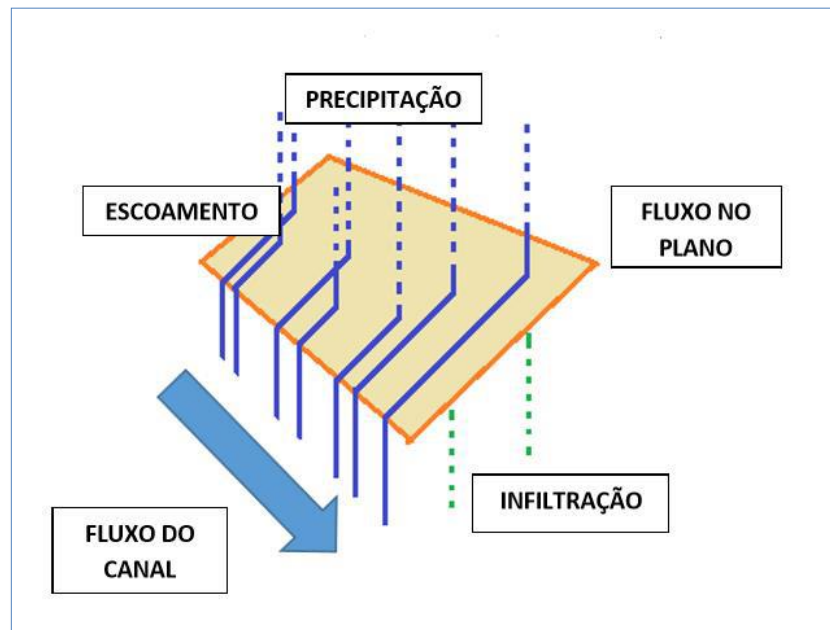
Assim como a USLE, o modelo SWAT também sofreu alterações ao longo dos anos, com o intuito de melhorar seu desempenho e corrigir eventuais falhas. Uma das atualizações resultou no modelo SWAT/GRASS, onde foi incorporada a possibilidade de integração com o sistema de informações geográficas (SIG), fato que proporcionou uma certa facilidade na incorporação de informações de mapeamento da área analisada. De outras atualizações importantes surgiram modelos voltados diretamente para softwares SIG específicos, como no caso do AVSSWAT e do ArcSWAT, direcionados ao ArcVIEW e ArcGIS, respectivamente (DALBIANCO, 2013).

O modelo SWAT tem constante aplicação em trabalhos de sedimentologia, como no de Choukri *et al.* (2019) que o utilizou para simular, em termos diários, o fluxo de água e sedimento que chegam ao reservatório Ibn Batouta, no Marrocos, entre os anos de 1980 e 2010. O referido modelo também foi aplicado por Bhatta *et al.* (2019) com o propósito de avaliar o impacto das mudanças climática no Rio Tamor, localizado no Nepal.

3.2 O modelo hidrossedimentológico Kinneros2

O modelo de produção de sedimentos Kinneros2 (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) pode ser caracterizado como um modelo de base física, orientado a eventos, que tem como funcionalidade descrever os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em pequenas bacias urbanas e rurais (menores que 100 km²). O Kinneros2 (K2) entende a bacia como um conjunto de planos e canais, os quais representam os cursos d'água que compõem a bacia. Para resolver as equações diferenciais que descrevem os fenômenos incidentes sobre a bacia, apresentados na Figura 1, o modelo utiliza técnicas de diferenças finitas (WOOLHISER, SMITH e GOODRICH, 1990).

Figura 1 — Descrição dos processos envolvidos durante a simulação do K2.



Fonte: Adaptado de Woolhiser, Smith e Goodrich (1990).

O K2 tem como produto final um hidrograma e um sedigrama localizados no exutório da bacia, podendo os mesmos serem convertidos em volume de escoamento gerado e em massa de sedimentos produzido (PAIVA *et al.*, 2011). Lopes (2003) destaca que ao modelo K2 foram incorporadas funcionalidades que a versão anterior não dispunha, dentre as quais a criação de um algoritmo de infiltração que abrange o perfil do solo com duas camadas e incorpora um novo método baseado nas características físicas do solo, com a finalidade de redistribuir a água no solo durante os períodos sem chuva.

3.2.1 Componente de infiltração

O componente responsável por simular o processo de infiltração no K2 calcula as taxas de infiltração do solo (f_c) através da equação expressa em (3), sendo a mesma definida em função da lâmina acumulada de infiltração (I) e de alguns outros parâmetros, tais como: condutividade hidráulica saturada efetiva K_{sat} (mm/h), valor efetivo do potencial de capilaridade G (m), porosidade do solo ϕ , e índice de distribuição dos tamanhos dos poros λ . Caso seja necessário, há a possibilidade de incremento de um parâmetro opcional (C_V) que descreve a variação aleatória espacial da condutividade hidráulica saturada do solo, assim como um parâmetro que representa a porcentagem de rochas, $ROCK$. O modelo utiliza também uma

variável denominada saturação relativa inicial do solo S_i (m³/m³), cujo valor é dado por θ_i/ϕ , onde θ_i é o índice de umidade inicial do solo. O parâmetro α representa o tipo de solo; α se aproxima de 0 para areia, e neste caso, a Eq. (3) aproxima-se à equação de Green-Ampt; α se aproxima de 1 para um solo franco bem uniforme, neste caso a Eq. (3) representa a equação de infiltração de *Smith-Parlange* (SMITH e PARLANGE, 1978; PAIVA, 2008). Smith, Corradini e Melone (1993) sugerem que a maioria dos tipos de solo é melhor representada por um valor de α igual a 0,85, sendo este o valor adotado no modelo K2.

$$f_c = K_{sat} \left[1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha l/B} - 1} \right] \quad (3)$$

O valor de B , expresso em (3) é dado pela equação descrita em (4), onde h (m) equivale a profundidade do fluxo e θ_s é a umidade de saturação (m³/m³).

$$B = \frac{G + h}{\theta_s - \theta_i} \quad (4)$$

Informações mais detalhadas acerca do módulo de infiltração do K2 podem ser encontradas em Smith, Corradini e Melone (1993).

3.2.2 Fluxo nos planos de escoamento

Ao se analisar o fluxo nos planos sob a ótica de uma pequena escala pode-se perceber uma estrutura tridimensional extremamente complexa do ponto de vista da resolução do problema. No entanto, ao aumentar-se a escala, o referido processo pode ser tratado na forma unidimensional, governado pelas equações de *Saint Vernant* para o caso de uma onda cinemática, expressa em (5), onde Q é a descarga por unidade de largura (m²/s) e h é o volume de água armazenado por unidade da área (m). Os parâmetros a e m são dados por: $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$, onde S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de Manning (DARONCO, 2008).

$$Q = ah^m \quad (5)$$

Todavia, as simplificações da equação de *Saint Vernant* utilizadas pelo K2 não

preservam todas as suas propriedades, tais como as utilizadas em modelos difusos, os quais consideram os efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente de montante, e como nos modelos hidrodinâmicos, onde se consideram as equações de *Saint Venant* em sua forma geral, ou seja, incluindo os termos que representam a gravidade, o atrito, a pressão e a inércia do fluxo (WOOLHISER, SMITH e GOODRICH, 1990).

Para determinar o fluxo no plano, a equação (5) é utilizada em conjunto com a equação da continuidade unidimensional, dada pela equação (6), onde t é o tempo (s), x é a distância ao longo do sentido da declividade, e $q(x,t)$ representa o excesso de precipitação (m/s).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (6)$$

Substituindo a equação (5) para Q em (6), tem-se:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (7)$$

Para resolver a equação (7) se faz necessário determinar a profundidade no fluxo da fronteira a montante dos elementos. Para isso, o modelo K2 segue as seguintes condicionantes:

- Se a fronteira fizer parte do divisor de águas da bacia, tem-se que:

$$h(0, t) = 0 \quad (8)$$

- Se um plano estiver contribuindo a montante para outro plano, a condição de fronteira será:

$$h(0, t) = \left[\frac{a_u h_u(L, t)^{m_u} W_u}{aW} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

onde $h_u(L,t)$ é a profundidade na fronteira inferior do plano contribuinte no tempo t , L é o comprimento e W_u é a largura do plano contribuinte, a_u é o parâmetro declividade/rugosidade do plano contribuinte, m_u é um expoente referente ao plano contribuinte, e a , m e W são referentes ao plano a jusante. As equações de onda cinemática são resolvidas no modelo Kineros2 usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos, em

relação à distância e ao tempo (PAIVA, 2008).

3.2.3 Fluxo nos canais de escoamento

A exemplo do fluxo nos planos, a equação da continuidade unidimensional também é utilizada para determinar o fluxo lateral incidente sobre um canal, sendo esta, dada pela equação (10), onde A é a área da seção transversal (m^2), Q é a vazão no canal (m^3/s), e o $q(x,t)$ é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m^2/s).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (10)$$

A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção após a simplificação da onda cinemática é dada por:

$$Q = aR^{m-1}A \quad (11)$$

onde R é o raio hidráulico (m), $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$, onde S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de Manning. Assim como no fluxo dos planos, as equações ora citadas são resolvidas pelo método implícito de diferenças finitas definida em quatro pontos, com a diferença que a incógnita agora é a área A e não a profundidade do fluxo h , e que as mudanças geométricas devido a variação da profundidade devem ser consideradas (PAIVA, 2008).

3.2.4 Erosão nos planos e canais

O processo de erosão resultante da dinâmica dos sedimentos é simulado pelo K2 através da equação do balanço de massa, expressa por:

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q_s(x, t) \quad (12)$$

sendo C_s a concentração de sedimento no fluxo (m^3/m^3), Q é a vazão (m^3/s), A é a área da seção transversal do fluxo sobre o plano ou no canal (m^2), e é a taxa de erosão do solo do leito por unidade de largura (m^2/s), e q_s é a taxa de entrada lateral de sedimentos no fluxo nos canais por unidade de comprimento ($m^3/s/m$) (PAIVA, 2011).

Conforme especifica Souza (2016) a erosão total (e) nos planos de escoamento é dada pelo somatório de duas parcelas principais: (a) a erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva no solo (e_s), e (b) erosão (ou deposição) hidráulica (e_h), resultado da interação entre a força de cisalhamento do fluxo e a tendência das partículas de solo no fluxo se depositarem sob efeito da força da gravidade.

O valor de (e_s) é estimado por meio da equação (13), proposta por Meyer e Wischmeier (1969), onde i é a intensidade da precipitação (mm/h), c_f é um parâmetro a ser determinado por calibração que está relacionado com a capacidade de impacto das gotas de chuva, $e^{-c_h h}$ é um fator que representa a diminuição dos efeitos do impacto das gotas de chuva pelo aumento da lâmina da água no solo, e c_h representa a efetividade do amortecimento da superfície de água (PAIVA, 2011).

$$e_s = c_f e^{-c_h h} i^2 \quad (13)$$

O cálculo de (e_h) se dá em função da diferença entre a concentração de equilíbrio na capacidade de transporte do fluxo (C_m) e a concentração real de sedimento ($C_s(x,t)$), sendo expressa pela equação (14).

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (14)$$

Para encontrar o valor de c_g (coeficiente da taxa de transferência de sedimentos, dado em s^{-1}) admitem-se duas hipóteses:

- Se o valor de C_s for menor ou igual ao valor de C_m , no caso, um processo de erosão, o valor de c_g é dado por:

$$c_g = C_o \frac{v_s}{h} \quad (15)$$

- Se o valor de C_s for maior do que o valor de C_m , no caso, um processo de deposição, o valor de c_g é dado por:

$$c_g = \frac{v_s}{h} \quad (16)$$

Nas equações descritas acima, C_o corresponde a um parâmetro que reflete a coesão do solo, sendo obtido por meio de um processo de calibração. A velocidade de queda da partícula

v_s é dada pela equação (17), onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2), S_s é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65, e d é o diâmetro da partícula de sedimento (m).

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(S_s - 1)d}{c_d} \quad (17)$$

Para calcular o C_d (coeficiente de arrasto da partícula) se faz uso da seguinte expressão:

$$C_d = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0,34 \quad (18)$$

onde R_n é o número de Reynolds, calculado como $R_n = v_s d / \nu$, sendo ν a viscosidade cinemática da água.

O modelo KINEROS2 utiliza a fórmula de capacidade de transporte (Equação 19) proposta por Engelund e Hansen (1967), com a inclusão de um limite crítico do valor da potência unitária do fluxo $\Omega = uS$ (*Unit Stream Power*) igual a 0,004 m/s, onde u é a velocidade do fluxo (m/s), S é a declividade, para estender a sua aplicabilidade a fluxos rasos e h a profundidade do fluxo (m), além de outras variáveis definidas anteriormente (PAIVA, 2008).

$$C_m = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - 0,004) \quad (19)$$

3.2.5 Discretização da bacia e dados de entrada do Kineros2

O processo de Discretização da bacia consiste em transformá-la em uma cascata de planos e canais de modo que essa configuração seja entendida pelo K2. Esta etapa é precedida de uma análise *in loco* que tem como objetivo levantar dados topográficos, de caracterização da cobertura vegetal do local e de parâmetros físicos do solo, entre outros. Este processo se faz necessário para que se possa representar as características da bacia discretizada com o maior grau de precisão possível. Montenegro *et al.* (2008) destacam os procedimentos necessários para a realização da discretização, os quais são citados a seguir:

- Delimitar a área a ser discretizada, demarcando os afluentes. Essa etapa pode ser feita manualmente usando cartas topográficas ou com um auxílio de um programa gráfico, como por exemplo, o AutoCad;
- Subdividir em subáreas a bacia de modo a transformando-a em uma cascata de planos e canais, levando em consideração, principalmente, a topografia do terreno. Desse modo, deve-se simular todo o trajeto da água sobre uma bacia, interligando e conectando todos os elementos planos e canais;
- Enumerar os planos e os canais. Calcular as áreas e comprimentos de cada subárea. Este trabalho pode ser feito manualmente com o auxílio de planímetros e curvímetros ou se for feito de forma digital através programa gráfico utilizando suas ferramentas;
- De posse dos dados de cada elemento calculado, monta-se uma tabela com essas informações.

Para executar o modelo K2 são necessários dois arquivos de entrada. O primeiro, com extensão PAR, contém todas as informações sobre características físicas da bacia, de planos e canais, assim como os parâmetros do solo. O segundo, que tem a extensão PRE, abriga informações de intensidade ou precipitação acumulada dos eventos de chuva a serem avaliados na simulação. Os arquivos de entrada do K2 devem ser construídos obedecendo uma formatação específica, onde os parâmetros são identificados por *tags* que podem aparecer em qualquer ordem, podendo ser escritas em letras maiúsculas ou minúsculas, pois não existe distinção entre estes dois formatos no K2. No arquivo PAR as *tags* são agrupadas em bloco, sendo um para cada elemento (plano e canal), como pode ser observado na figura 2. Além disso, há um bloco específico para descrever os parâmetros globais da bacia (parâmetros comuns a todos os elementos). Vale destacar que a sequência de inserção dos blocos deve obedecer a ordem em que os elementos serão processados pelo K2.

Figura 2 — Descrição do formato de um bloco para o arquivo PAR.

```

Begin tipo de elemento (plano ou canal)
.
.
.   Tags = valor1, valor2
.
End

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro bloco a ser inserido no arquivo PAR é o que contempla os parâmetros globais, que são apresentados na Tabela 1. As *tags* podem ser escritas por completo ou abreviadas, sendo a menor abreviação permitida a que está destacada em negrito.

Tabela 1 — Descrição dos parâmetros globais do arquivo de entrada.

Parâmetros globais	
Tags	Descrição
Units	Sistema de unidade utilizado para os parâmetros (Métrico ou Inglês).
Clen	Comprimento característico cujo valor é dado pelo comprimento do maior canal da bacia ou da cascata de planos.
Temperature	Temperatura °C ou F.
Diameters	Diâmetro representativo das partículas do solo em milímetros ou polegadas.
Densities	Valores das massas específicas dos diâmetros.

Fonte: Adaptado de Woolhiser, Smith e Goodrich (1990).

Na sequência de inserção de blocos tem-se as informações referentes a cada elemento produto da discretização, que podem ser observadas nas Tabelas 2 e 3. Nestes blocos existem alguns parâmetros comuns tanto a planos quanto à canais, que são identificados na Tabela 3 por meio do caractere (*).

Tabela 2 — Descrição dos parâmetros dos canais que compõem o arquivo de entrada.

Parâmetros dos canais	
Tags	Descrição
Upstream	Número de identificação do elemento (plano ou canal) à montante
Lateral	Número de identificação dos planos que contribuem lateralmente para o canal
Length	Comprimento do canal (metro ou pés)
Type	Tipo do canal (simples ou composto). Os canais padrões são denominados simples
Width	Largura do canal (metro ou pés)
Slope	Declividade do canal
SS1, SS2	Declividades dos planos laterais

Fonte: Adaptado de Woolhiser, Smith e Goodrich (1990).

Tabela 3 — Descrição dos parâmetros dos planos que compõem o arquivo de entrada.

Parâmetros dos planos	
Tags	Descrição
Identifier*	Número de identificação do elemento (Número entre 1 e 9999999).
Print*	Impressão dos resultados ao final da simulação (número entre 0 e 3), sendo: 0 – Nenhuma impressão para o atual elemento (resposta padrão) 1 – Resumo impresso para o elemento atual 2 – Resumo impresso após uma listagem de descarga no total de sedimentos 3 – Resumo impresso e criação de um arquivo com a listagem das descargas de quitação do total de sedimentos gerados
Length	Comprimento do plano (metros ou pés)
Width	Largura do plano (metro ou pés)
Slope	Declividade do plano
Manning*	Coefficiente de rugosidade de Manning (Como forma alternativa pode-se usar o coeficiente de Chezy)
Chezy*	Coefficiente de Chezy
Relief	Altura média do relevo da microbacia (mm ou polegadas)
Spacing	Distância média do relevo da microbacia (metro ou pés)
Interception	Intercepção vegetal. Profundidade em milímetros
Canopy	Valores atribuídos às coberturas de solo, isto é, fração da cobertura vegetal. Este valor varia de 0 a 1
Saturation*	Saturação do solo antes do evento de chuva
K_{sat}*	Condutividade hidráulica saturada (mm/h ou pol./h)
G*	Potencial de capilaridade do solo (mm ou pol.)
Distribution*	Índice de distribuição do tamanho dos poros
Porosity*	Porosidade
Rock*	Fração volumétrica das rochas
Splash	Coefficiente de impacto das gotas de chuva (adimensional)
Cohesion*	Coefficiente relacionado a coesão do solo
Fractions*	Fração das partículas de solo

Fonte: Adaptado de Woolhiser, Smith e Goodrich (1990).

A exemplo do arquivo PAR, o arquivo de chuva, com extensão PRE, é composto por um bloco que contém informações diárias de precipitação acumulada ou intensidade pluviométrica de um ou vários postos pluviométricos. As *tags* que podem ser inseridas no bloco são mostradas na Tabela 4, devendo ser organizadas em uma configuração do tipo coluna, como pode ser observado na Figura 3, onde estão representados dados de intensidade pluviométrica com um passo de tempo de 5 minutos. Como separador decimal, deve-se usar o caractere (.). Os valores de tempo devem ser cumulativos, com um passo de tempo fixo.

Tabela 4 — Descrição dos parâmetros do arquivo de chuva.

Parâmetros do arquivo de chuva	
Tags	Descrição
Number	Número de eventos de chuva registrados.
Time	Tempo, em minutos, em que foi registrado o evento de precipitação.
Depth	Precipitação acumulada (milímetros ou polegadas).
Intensity	Intensidade da chuva (mm/h ou pol/h).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 — Modelo do arquivo com extensão PRE.

Begin <i>identificação do pluviômetro</i>		
N = 6		
	Time	Intensity
!	(min)	(mm/h)
	0	0.0
	5	15.0
	10	21.0
	15	32.0
	20	12.0
	25	35.0
End		

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.6 Parâmetros do Kineros2

Conforme mencionado no subitem anterior o arquivo PAR dispõe de um conjunto de parâmetros globais (comum a todos os elementos da bacia discretizada), assim como, um conjunto de parâmetros que caracteriza cada elemento de discretização de forma individual, que podem ser denominados parâmetros locais.

De acordo com Pereira Júnior (2011) os parâmetros locais podem ser divididos em três grandes grupos, sendo estes, descritos abaixo:

- parâmetros que podem ser determinados com base em informações disponíveis na literatura ou baseados em trabalhos que abordam uma área de estudo semelhante à trabalhada. Exemplo: *Relief* (altura média do relevo) e *Spacing* (distância média do relevo);

- parâmetros cujos valores podem ser medidos experimentalmente em campo ou no laboratório, ou ainda de acordo com as características geométricas dos elementos. Exemplo: *Slope* (declividade do plano), *Width* (largura do plano) e *Porosity* (porosidade);
- parâmetros que são obtidos por meio do processo de calibração do modelo *kineros2*.

No grupo de parâmetros calibráveis estão enquadrados os que são utilizados neste trabalho, sendo estes: C_f ou *Splash* (coeficiente de impacto pelas gotas de chuva), C_o ou *Cohesion* (coeficiente relacionado à coesão do solo), K_{sat} (condutividade hidráulica saturada), S_i ou *Saturation* (saturação do solo antes do evento de chuva) e G (potencial de capilaridade do solo).

Dentre os citados, os que apresentam maior influência no fenômeno de produção de sedimentos são os parâmetros C_f e C_o . O primeiro tem influência direta sobre o cálculo da erosão por arrasto devido ao fluxo superficial e o segundo influência o processo de erosão pelo impacto das gotas de chuva durante um evento de precipitação.

Devido as características do semiárido nordestino, onde as chuvas são de curta duração, porém, medianamente intensas, há uma tendência de que impacto pelas gotas de chuva seja o agente que mais desagrega solo, já que o escoamento superficial nas vertentes é muito raso e não possui energia suficiente para desagregar grandes cargas de material, servindo apenas como agente do transporte de sedimentos (PEREIRA JÚNIOR, 2011).

3.2.7 Execução da simulação no *Kineros2*

Para executar uma simulação no K2 é necessário que os arquivos de entrada estejam reunidos em um único diretório juntamente com o executável do software. A introdução dos dados no modelo se dá por meio da tela de console, onde o usuário deve inserir as informações requisitadas, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 — Descrição das informações requeridas para executar o Kineros2.

```

KINEROS2
Kinematic Runoff and Erosion Model
Version Compiled 15-Sep-2017 with Intel Fortran XE 2013
U. S. Department of Agriculture
Agricultural Research Service

      Parameter file: bacia.PAR
      Rainfall file: chuva.PRE
      Output file: saida.OUT
      Description: Exemplo de Simulação
      Duration (min): 35
      Time step (min): 5
Courant Adjustment? (y/n): n
      Sediment? (y/n): y
Multipliers? (y/n/file): n
Tabular Summary? (y/n): n

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

As primeira e segunda informações a serem inseridas pelo usuário são o nome dos arquivos PAR e PRE, respectivamente, procedidos de suas extensões. Posteriormente, é solicitado ao usuário que informe o nome de um arquivo de saída, com a extensão OUT, onde serão armazenadas as informações resultantes da simulação. Após isso, o usuário deve fornecer uma descrição da simulação. Posteriormente, é solicitado que o usuário defina o tempo de duração, em minutos, da simulação. O valor na opção *time step* deve ser introduzido de acordo com o arquivo PRE, onde insere-se o passo de tempo definido para os valores de intensidade ou precipitação acumulada do evento de chuva.

Após a introdução destes dados o Kineros2 solicita a inserção ou não, de opções que podem ser incrementadas ao processamento de dados, devendo ser adicionado Y para a inserção e N para a não inserção. A primeira refere-se à possibilidade de um ajuste nas equações de modo a transformá-las de equações diferenciais para lineares. A segunda opção refere-se à alternativa de apresentação dos valores de massa de sedimento no arquivo de saída. A terceira, diz respeito a inserção de multiplicadores para os parâmetros, de modo a variá-los, sobretudo, durante o processo de calibração em alguns casos. Por fim, a quarta opção traz a possibilidade de ser apresentado um resumo dos dados tabulados durante a simulação.

Caso a operação de simulação seja repetida várias vezes há a possibilidade de reunir os dados de entrada em um arquivo de nome kin, que tem a extensão FIL. A vantagem de utilização deste arquivo está no fato de ele ser entendido automaticamente pelo software, dispensando a

necessidade de inserção das informações na tela de console a cada simulação e, consequentemente, tornando-a mais rápida.

3.2.8 Trabalhos envolvendo o uso do Kineros2

Desde sua criação a partir da primeira versão desenvolvida por Woolhiser, Smith e Goodrich (1990) o modelo de produção de sedimentos Kineros2 tem sido amplamente utilizado na comunidade acadêmica para diversos fins, como no trabalho desenvolvido por Miaoying *et al.* (2019) que utilizou K2 em conjunto com um modelo matemático específico para estudar o efeito do transporte de nutrientes durante eventos de chuva individuais em regiões áridas e semiáridas da China, concluindo como satisfatório o desempenho do K2 para este fim.

A pesquisa desenvolvida por Korgaonkar *et al.* (2018) aplicou o modelo K2 integrado a uma ferramenta denominada AGWA para modelar a hidrologia urbana e um sistema de infraestrutura verde (GI), que é um método que visa incorporar o ambiente natural à infraestrutura urbana de modo a proteger os recursos naturais. O Estudo foi aplicado no Estado do Arizona, nos Estados Unidos da América e, além de avaliar a aplicabilidade do K2 na modelagem hidrológica, objetivou analisar a disponibilidade da água oriunda do telhado para o consumo em regiões semiáridas e verificar a eficácia de implantação do sistema de infraestrutura verde na prevenção de inundações.

A aplicação do K2 em conjunto com outro software também foi empregada no trabalho de Nguyen *et al.* (2015), neste caso, utilizando o software HEC-RAS. O estudo objetivou prever, com certa precisão a ocorrência de enchentes repentinas em regiões tropicais localizadas no norte do Vietnã. Concluíram que ao acoplar dos dois modelos ora citados os resultados simulados se aproximaram significativamente dos dados medidos em campo, sendo considerado satisfatório o seu desempenho.

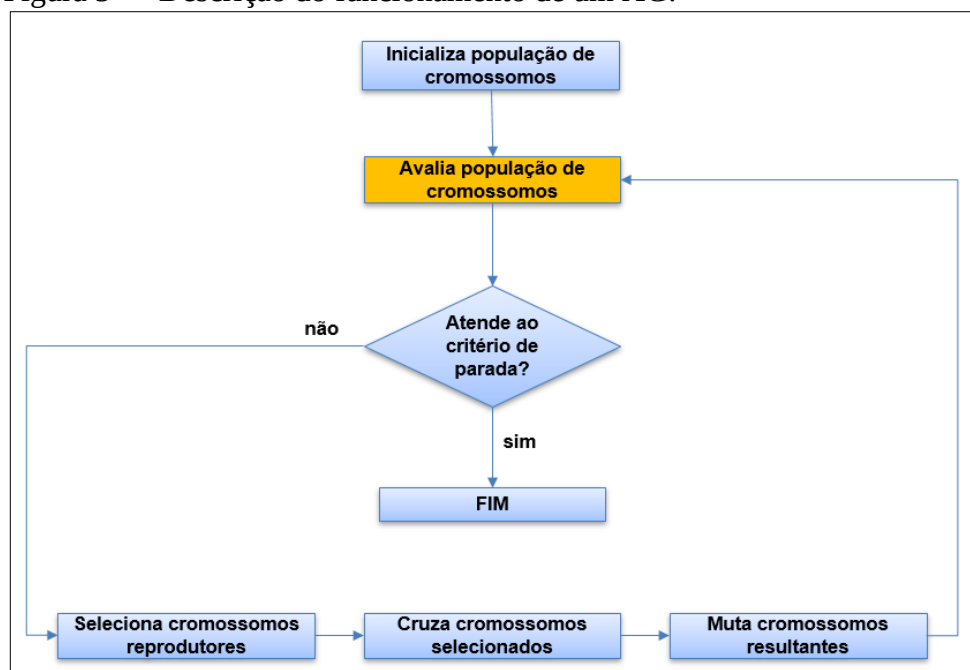
No Brasil, a utilização do Kineros2 também é perceptível, sobretudo, em trabalhos que envolvem pequenas bacias rurais no semiárido nordestino. Paiva *et al.* (2011) buscou estimar parâmetros regionais do solo para o K2 em bacias experimentais localizadas no semiárido paraibano. Para tal, utilizou-se dados de lâmina escoada e produção de sedimentos observados em campo. Os dados obtidos foram calibrados e validados por meio de equações que permitiram quantificar o ajuste entre dados observados e simulados. Concluiu que o modelo K2 apresentou resultados satisfatórios quando utilizado para representar fenômenos hidrossedimentológicos na região estudada.

3.3 A técnica de algoritmos genéticos

A técnica evolucionária de algoritmos genéticos (AG), proposta por Holland (1975), é um método iterativo de otimização de problemas baseado no princípio da seleção natural e da adaptação e cruzamento das espécies. Goldberg (1989) afirma que esta técnica surge da analogia entre otimização e os mecanismos de genética e evolução natural das espécies, combinando os conceitos de adaptação seletiva, troca de material genético e sobrevivência dos indivíduos mais aptos.

Para Formiga (2005) a ideia básica de um AG é a escolha de uma boa solução em detrimento das “piores”. As soluções candidatas são denominadas “cromossomos”, sendo um agrupamento de soluções denominado “população”, que tem tamanho fixo definido pelo usuário. Inicialmente, um conjunto de cromossomos, gerados aleatoriamente, é introduzido em um processo iterativo e evolui por meio de operadores genéticos baseados em conceitos biológicos de cruzamento e mutação, de modo a se ter uma tendência de que o conjunto de possíveis soluções evolua apresentando resultados cada vez melhores a cada geração, ou seja, a cada iteração completa. O processo iterativo se encerra quando uma determinada condição de parada é satisfeita, geralmente estabelecida por meio da obtenção no número máximo de gerações, que é fixada previamente antes da execução do AG. O processo de funcionamento de um AG pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 — Descrição do funcionamento de um AG.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em uma analogia com os seres vivos, os cromossomos de um AG podem ser entendidos como uma estrutura de dados composta por genes. Estes, por sua vez, são parâmetros codificados ao qual estão associados valores que lhe conferem características próprias, diferenciando-os dos demais cromossomos. As codificações mais comuns em algoritmos genéticos são binárias e reais, sendo atribuídos aos genes, na primeira situação, valores de bits (0 ou 1) e na segunda, valores reais. A codificação binária geralmente é utilizada quando o problema envolve variáveis discretas, todavia, isso não impede que a mesma seja empregada em problema com variáveis contínuas, sendo necessário apenas que haja a construção real a partir dos cromossomos por meio de um processo de decodificação (FORMIGA, 2005).

No decorrer do processo iterativo de um AG os cromossomos são submetidos a um processo de avaliação feito através de uma função que melhor representa o problema, denominada função objetivo. O processo ora citado consiste em atribuir um valor de aptidão ao cromossomo de modo que sua qualidade possa ser mensurada em relação aos demais integrantes da população. Pozo *et al.* (2015) destaca que é essencial ter uma função objetivo que seja representativa e diferencie na proporção correta as más das boas soluções, pois, se houver pouca precisão na avaliação dos cromossomos, uma boa solução pode ser posta de lado durante a execução do algoritmo, além de gastar mais tempo explorando soluções pouco promissoras.

3.3.1 O processo de seleção dos cromossomos

Em um AG o processo de seleção pode ser considerado um dos mais importantes, haja vista que, através dele são definidos os cromossomos que serão submetidos aos operadores genéticos. A seleção é baseada no princípio de sobrevivência dos melhores indivíduos, sendo estes, os que apresentarem melhores valores de aptidão. Os cromossomos selecionados, denominados “cromossomos pais”, terão uma maior probabilidade de transmitir suas características no decorrer das gerações (MENDES, 2013).

Dentre os vários tipos de seleção existentes, o método de seleção por torneio certamente é um dos mais aplicados. Neste processo, um grupo de n cromossomos da população é selecionado aleatoriamente com iguais probabilidades. Os cromossomos escolhidos serão submetidos a uma espécie de torneio, sendo considerado vencedor o cromossomo que apresentar o melhor valor de aptidão. A solução vencedora é inserida em uma nova população e o processo é repetido até que o número de torneios seja igual ao número de cromossomos que compõem a população. Em geral, os torneios são realizados entre dois cromossomos ($n = 2$),

no entanto, nada impede que este número seja aumentado, contanto que se respeite um limite tolerável que garanta a diversidade da população.

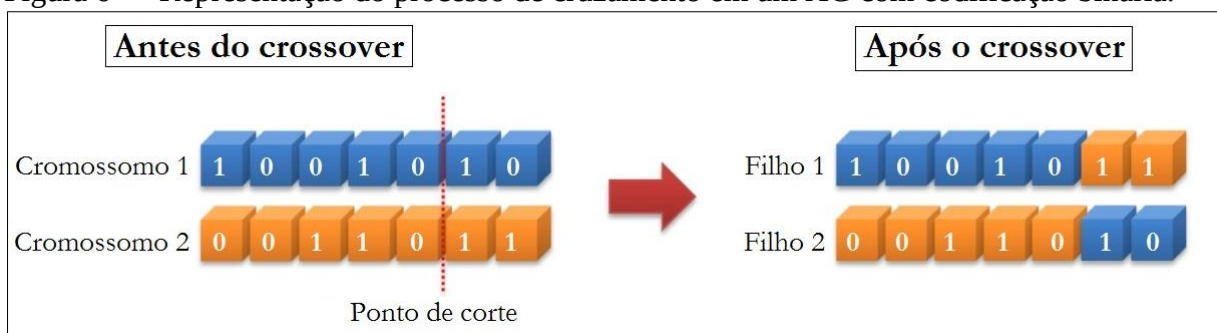
3.3.2 Operadores Genéticos

Ao traçar-se um paralelo com o comportamento dos seres humanos, os operadores genéticos (cruzamento e mutação) atuam em um AG no sentido de simular o processo de reprodução e mutação das espécies, de modo a gerar novas populações que recebem as principais características dos indivíduos que as precedem. De acordo com Pozo *et al.* (2015) o princípio básico dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até se alcançar uma solução satisfatória. Goldberg (1989) afirma que os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha as características adaptativas adquiridas durante as gerações anteriores.

3.3.2.1 Operador de cruzamento

O operador de cruzamento, também chamado de *crossover*, é o grande responsável pela diversificação populacional, pois, por meio dele ocorrerá a troca de informações genéticas entre dois cromossomos da população, denominados “cromossomos pais”, de modo a proporcionar o surgimento de novos indivíduos, denominados “cromossomos filhos”, como pode ser observado na figura 6.

Figura 6 — Representação do processo de cruzamento em um AG com codificação binária.



Fonte: Adaptado de Mendes (2013).

Após a etapa de seleção, os cromossomos, em pares, são submetidos a um teste que tem como objetivo definir se haverá ou não a existência de cruzamento. Para este teste, é gerado um número aleatório entre 0 e 1, sendo este, comparado a um parâmetro do AG denominado taxa

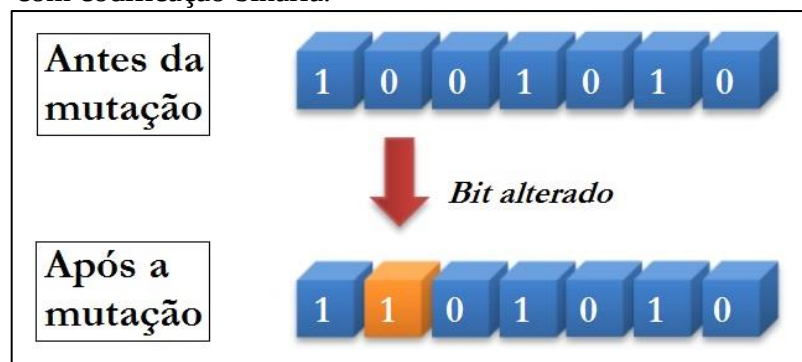
de cruzamento, que representa a probabilidade de cruzamento entre os pares de cromossomo. Caso o número aleatório gerado seja menor ou igual a taxa de cruzamento os cromossomos irão cruzar seu material genético, caso contrário, o cruzamento não ocorre, fazendo com que os cromossomos preservem integralmente suas características para a próxima geração. Segundo Henriques (2018) é recomendável que o valor da taxa de cruzamento varie na faixa entre 60% e 90%.

O ponto que delimita a região do cruzamento, denominado ponto de corte, é definido aleatoriamente. A partir deste, os cromossomos pais tem seus genes trocados, gerando dois cromossomos filhos. Vale destacar que há a possibilidade de se ter mais de um ponto de corte no cromossomo, deste modo, caracterizando o cruzamento como multipontos.

3.3.2.2 Operador de mutação

O processo de mutação consiste na alteração do valor do gene dos cromossomos filhos resultantes do cruzamento. Inicialmente, assim como na etapa de cruzamento, há a ocorrência de um teste que objetiva verificar a probabilidade de existência da mutação. Para isso, percorre-se gene a gene do cromossomo e gera-se um número aleatório entre 0 e 1, que, posteriormente, é comparado com um parâmetro do AG denominado taxa de mutação. Caso esse valor aleatório seja menor ou igual a taxa de mutação, o valor do gene é alterado, caso contrário, o gene permanece inalterado. A ilustração deste processo pode ser observada na figura 7.

Figura 7 — Representação do processo de mutação em um AG com codificação binária.



Fonte: Adaptado de Mendes (2013).

O operador de mutação possui a capacidade diversificar as soluções trazidas pelos cromossomos, todavia, se houver uma grande quantidade de processos com este operador corre-se o risco de perder informações valiosas trazidas pelos cromossomos. Para evitar tais

problemas, utiliza-se uma taxa de mutação entre 0,1% e 5%, que já é suficiente para garantir a diversidade populacional (HENRIQUES, 2018).

O caráter cíclico de execução dos operadores genéticos durante o processo evolucionário expõe a necessidade de dar a devida importância a escolha dos valores de taxas dos operadores genéticos, haja vista que estes, podem influenciar negativamente no desempenho do AG, proporcionando uma convergência prematura de soluções ou até mesmo uma estagnação de busca, fazendo com que as soluções trazidas fiquem presas a um determinado ponto do espaço de busca.

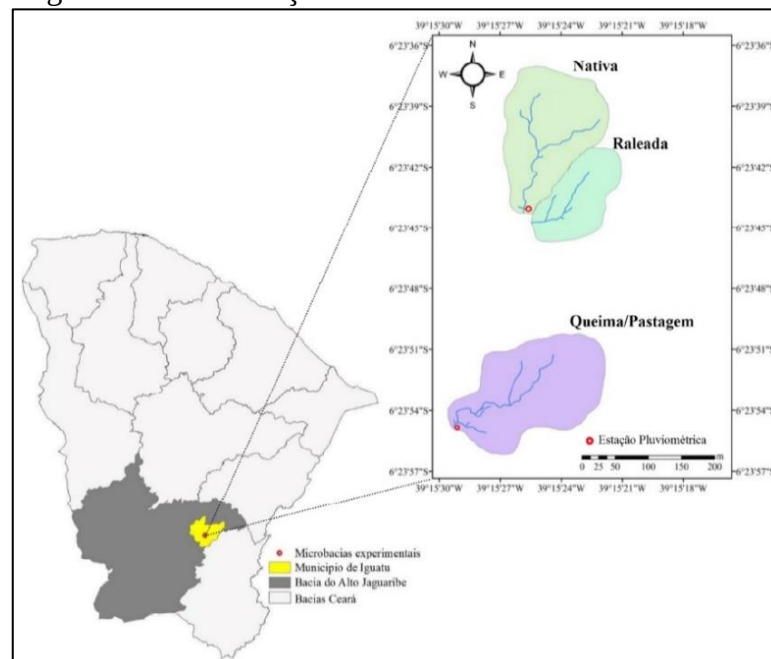
4 A ÁREA DE ESTUDO

Esta seção destina-se a apresentação das características da área de estudo na qual foram extraídos os dados apresentados neste trabalho, bem como, a apresentação de informações relevantes para o entendimento dos métodos aplicados no presente estudo.

4.1 Caracterização geral

A área de estudo abordada neste trabalho compreende três microbacias experimentais, a primeira com cobertura vegetal nativa (Nativa), a segunda com cobertura vegetal resultante de um processo de raleamento (Raleada), e a terceira, caracterizada pelo emprego do manejo de pastagem precedido de queima da vegetação nativa (Queima e Pastagem). As microbacias em questão estão localizadas no semiárido cearense, mais especificamente, na cidade de Iguatu, sendo situadas entre as coordenadas geográficas $6^{\circ}23'42''$ S e $6^{\circ}23'47''$ S e, $39^{\circ}15'24''$ W e $39^{\circ}15'29''$ W, fazendo parte da bacia hidrográfica do alto Jaguaribe, como pode ser observado na figura 8.

Figura 8 — Localização das microbacias estudadas.



Fonte: ARAÚJO NETO (2012).

De acordo com Araújo Neto (2012) nas microbacias ora citadas há a presença de cursos d'água que são classificados como nascentes, sendo seu regime de escoamento efêmero, onde

o fluxo de água sobre o canal principal se faz presente durante e depois do evento de precipitação, em um período médio de tempo não superior a 24 horas após o encerramento da chuva.

O processo de delimitação e caracterização das microbacias experimentais iniciou-se no ano de 2007 através de um estudo desenvolvido por Alves (2008) que resultou em um conjunto de características morfométricas as quais são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 — Descrição das características morfométricas das microbacias experimentais.

Características	Microbacias			Unidades
	Nativa	Raleada	Queima e Pastagem	
Área de bacia	20.637,60	11.491,90	28.013,70	m ²
Perímetro	594,50	478,40	696,80	m
Comprimento do talvegue	183,90	120,50	187,90	m
Comprimento do curso principal	252,10	147,20	238,20	m
Comprimento da bacia	204,40	188,20	253,90	m
Declividade da bacia	10,60	8,70	5,60	%
Fator de forma	0,50	0,30	0,40	-
Coeficiente de compacidade	1,20	1,30	1,20	-
Tempo de concentração	0,10	0,10	0,10	h
Extensão média de escoamento superficial	20,50	19,50	29,40	m
Sinuosidade do curso principal	1,40	1,20	1,30	-

Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2012).

A microbacia nativa possui aspecto de caatinga arbustivo-arbórea fechada, sendo constatada a cobertura integral do solo durante a quadra chuvosa, permitindo pouco desenvolvimento do extrato herbáceo, como pode ser observado na Figura 9(a). Apesar da boa cobertura vegetal na maior parte da área de estudo, em algumas partes são observadas áreas com ausência de vegetação ou com vegetação de menor porte. Salienta-se que durante o longo período de estiagem da estação seca, a vegetação perde a folhagem, fazendo com que haja uma modificação das respostas hidrológicas durante o início da quadra chuvosa, conforme apresenta-se na Figura 9(b) (DOS SANTOS, 2015).

Figura 9 - Vegetação da microbacia nativa durante a estação chuvosa (a) e a estação seca (b).



Fonte: DOS SANTOS (2015).

Na microbacia raleada (Figura 10) foi adotado um tipo de manejo ainda pouco explorado no semiárido, o raleamento da vegetação. Este processo consiste no corte de espécies vegetais que possuem circunferência de caule inferior a 10 cm, de modo a promover o crescimento de herbáceas de caráter forrageiro (SOUZA, 2016). Este tratamento foi aplicado com o objetivo de verificar a influência do raleamento da Caatinga sobre o escoamento superficial, erosão hídrica e produção de sedimentos (SANTOS *et al.*, 2014). Palácio (2011) destaca que o tratamento de raleamento da caatinga proporcionou um aumento da ordem de três vezes na produção de biomassa herbácea, além de um aumento na produção de biomassa arbórea em relação à caatinga que foi mantida inalterada.

Figura 10 - Vegetação da microbacia raleada durante a estação chuvosa (a) e a estação seca (b).



Fonte: DOS SANTOS (2015).

A origem da microbacia de queima e pastagem (Figura 11) decorreu de um processo de desmatamento total da área no final da estação seca do ano de 2009, procedida da queima *in loco* do material cortado, que ocorreu no ano de 2010, com o objetivo de substituir a vegetação nativa por capim (*Andropogon gayanus* Kunt) para pastagem, prática que é utilizada com frequência no nordeste brasileiro. Vale salientar que a partir do ano de 2011 foi mantida a cobertura de capim.

Figura 11 - Vegetação da microbacia de queima e pastagem durante a estação seca (a) e a estação chuvosa (b).



Fonte: DOS SANTOS (2015).

Por se tratar de uma região semiárida há uma grande variabilidade espacial de chuvas, sendo estas, registradas entre os meses de janeiro e maio, com o mês de março apresentando os maiores eventos em termos de intensidade pluviométrica. A precipitação média histórica no município de Iguatu entre os anos de 1978 e 2016 foi de 991 mm anuais, como desvio padrão de 316 mm.ano⁻¹, tendo valor mínimo de 439,5 mm no ano de 1993 e valor máximo 2089 mm registrados 1985 (DOURADO, 2018). De acordo com dados da Funceme (2017), no intervalo de anos que compreende este estudo (2009 – 2016), o comportamento pluviométrico da região de Iguatu apresentou variações. Nos anos de 2009 e 2011 pode-se observar precipitações acima da média histórica, apresentando os valores de 1281,8 mm e 1357,3 mm, respectivamente. Em contrapartida, nos anos de 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 e 2016 houve escassez de chuvas, constatando-se valores de precipitação de 774,3 mm, 785,6 mm, 577,2 mm, 781,1 mm, 504,6 mm e 746,2 mm, respectivamente, representando valores abaixo da média histórica anual.

Outro ponto a se destacar são as altas taxas evaporativas, que podem chegar a 2.943 mm/ano, sendo registrados os maiores valores durante os meses em que se apresentam menores índices de precipitação. Araújo Neto (2012) destaca que as temperaturas médias mais altas

ocorrem entre setembro e janeiro, relacionando-se com a forte insolação e baixa nebulosidade durante esse período.

De acordo com levantamento feito por Sudec (1980), a geologia da região é caracterizada como sedimentar, formada por sedimentos meso microclástico, que sofreram um processo de afundamento, proporcionando a formação de solos com relevo plano a suave ondulado. Em relação ao relevo, pode-se perceber uma predominância de planos na superfície aluvial. Nos tabuleiros mais elevados, ocorre a presença de relevos suaves.

O solo nas três microbacias estudadas é classificado como Vertissolo Ebânico Carbonático Típico. Devido ao tipo de argila presente nestes tipos de solo, é comum o surgimento de fendilhamento na superfície dos mesmos em épocas de pouca precipitação, assim como o seu encharcamento durante o período chuvoso, como pode ser observado na Figura 12. Esta característica acaba por prejudicar o acesso às microbacias (ARAÚJO NETO, 2012).

Figura 12 — (a) Estrutura do solo no período seco; (b) Encharcamento do solo no período chuvoso.

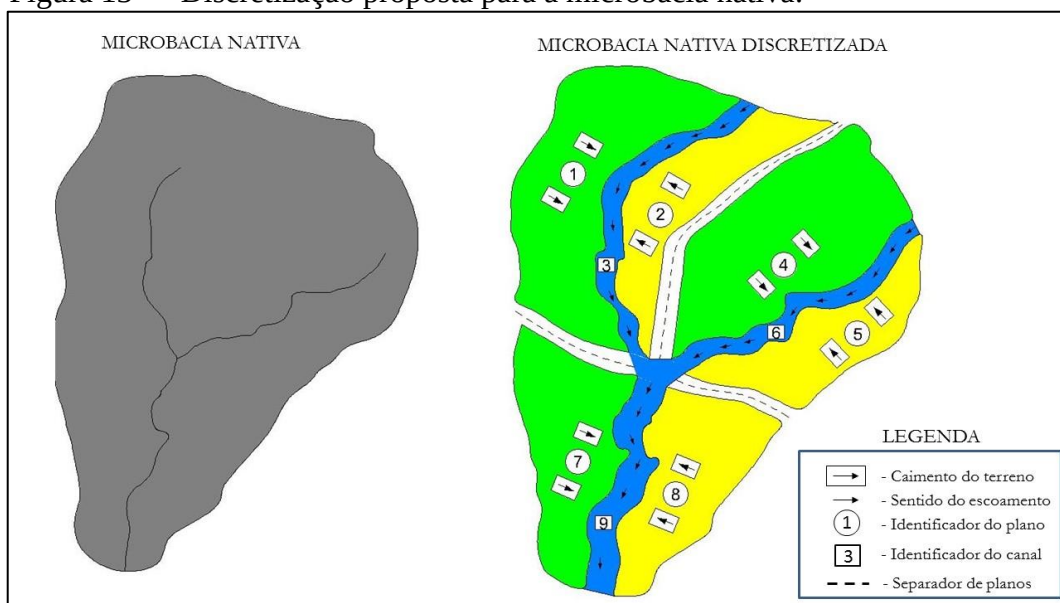


Fonte: ARAÚJO NETO (2012).

4.2 Discretização das microbacias

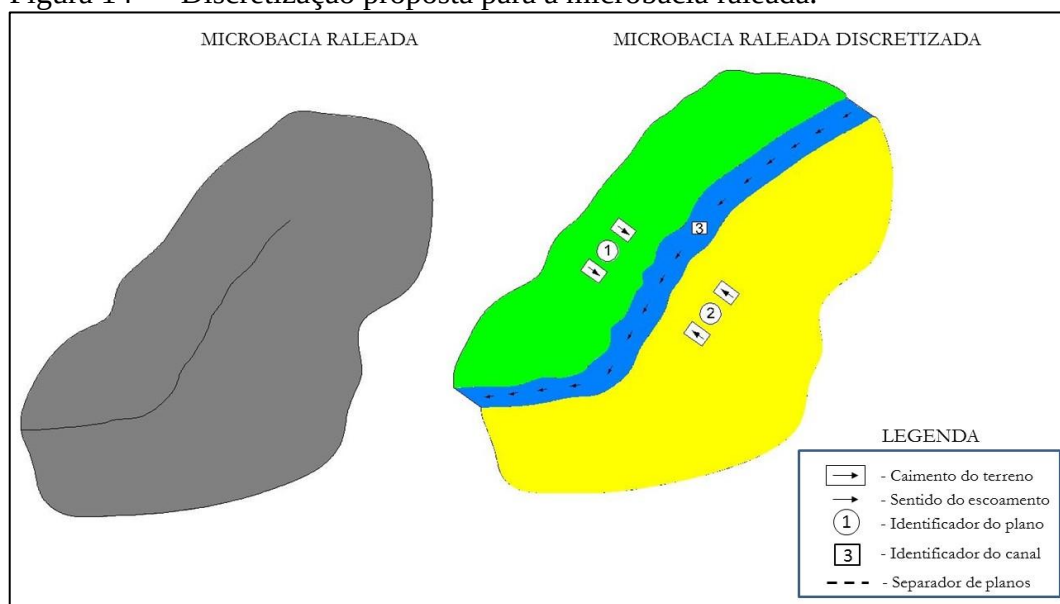
Como já mencionado no item 3.2.5, o processo de discretização de uma bacia hidrográfica deve levar em conta uma série de características da mesma, de modo a tornar a simulação o mais próximo possível da realidade. Para o estudo corrente utilizou-se a discretização proposta por Souza (2016), que levou em conta, principalmente, as características topográficas da área, sendo a declividade a mais incisiva. A configuração de discretização proposta para as microbacias pode ser observado nas Figuras 13, 14 e 15.

Figura 13 — Discretização proposta para a microbacia nativa.



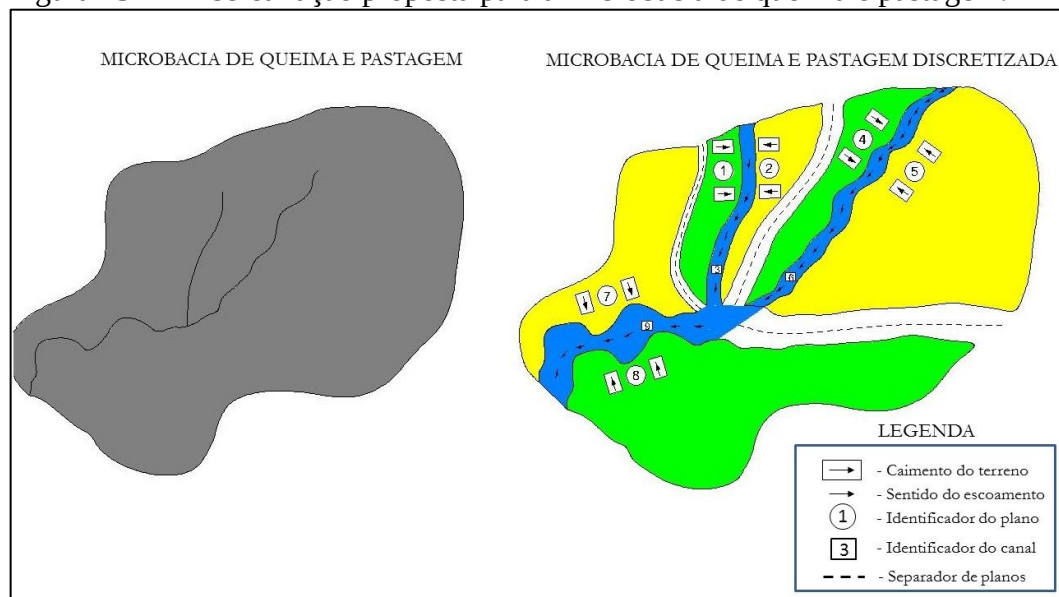
Fonte: Adaptado de Souza (2016).

Figura 14 — Discretização proposta para a microbacia raleada.



Fonte: Adaptado de Souza (2016).

Figura 15 — Discretização proposta para a microbacia de queima e pastagem.



Fonte: Adaptado de Souza (2016).

A microbacia nativa foi discretizada em 9 elementos, sendo 6 planos e 3 canais. Para a microbacia raleada, devido a sua dimensão reduzida em relação as demais, foram necessários apenas 2 planos e 1 canal. A microbacia queima e pastagem, assim como a nativa, foi discretizada e 6 planos e 3 canais. Os dados referentes às características físicas dos planos e canais podem ser observados nas Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 — Características físicas de planos e canais da microbacia nativa.

Microbacia nativa				
ID	Tipo	Área (m ²)	Largura (m)	Comprimento (m)
1	Plano	4829,12	53,64	90,03
2	Plano	2482,39	27,57	90,03
3	Canal	-	-	90,03
4	Plano	4913,63	47,42	103,61
5	Plano	2331,88	22,51	103,61
6	Canal	-	-	103,61
7	Plano	3111,40	31,03	100,27
8	Plano	2974,52	29,67	100,27
9	Canal	-	-	100,27

Fonte: Adaptado de Souza (2016).

Tabela 7 — Características físicas de planos e canais da microbacia raleada.

Microbacia raleada				
ID	Tipo	Área (m ²)	Largura (m)	Comprimento (m)
1	Plano	4273,49	34,70	123,15
2	Plano	7226,71	58,68	123,15
3	Canal	-	-	123,15

Fonte: Adaptado de Souza (2016).

Tabela 8 — Características físicas de planos e canais da microbacia de queima e pastagem.

Microbacia queima e pastagem				
ID	Tipo	Área (m²)	Largura (m)	Comprimento (m)
1	Plano	1418,69	19,96	71,09
2	Plano	1692,06	23,80	71,09
3	Canal	-	-	71,09
4	Plano	2227,50	21,05	105,82
5	Plano	9650,21	91,19	105,82
6	Canal	-	-	105,82
7	Plano	4107,48	34,60	118,70
8	Plano	8917,74	75,13	118,70
9	Canal	-	-	118,70

Fonte: Adaptado de Souza (2016).

5 METODOLOGIA

Esta etapa se dedica à apresentação e descrição dos procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento da rotina computacional descrita no presente trabalho.

5.1 Implementação do AG por meio da biblioteca GAF

Na rotina computacional desenvolvida neste estudo a técnica de algoritmos genéticos foi implementada através da GAF (*Genetic Algorithm Framework*), uma biblioteca de códigos disponível de forma gratuita, voltada para a linguagem de programação C#. Desta forma, todos os códigos da rotina desenvolvida foram escritos por meio da IDE (*Integrated Development Environment*) Visual Studio. A referida linguagem de programação se enquadra no paradigma de orientação a objetos, fato que confere ao processo de desenvolvimentos dos algoritmos uma maior organização, assim como uma melhor eficiência no tratamento de possíveis erros que possam vir a ocorrer.

Desenvolvida por Newcombe (2016), a biblioteca GAF possui como uma das principais características a simplicidade na implementação dos códigos, além de possuir um vasto aparato documental de suporte. Outro ponto importante a se destacar é a eficiência dos resultados trazidos pela GAF, o que faz com que sua aceitação na comunidade científica seja considerável, podendo ser constatados usos em diversos trabalhos acadêmicos, como na pesquisa de Ivanov *et al.* (2016), que utilizou-a para verificar a eficiência de algoritmos genéticos no processo de busca de documentos de pesquisa científica nas plataformas digitais, com o intuito de comparar a eficiência do AG com métodos de buscas tradicionais, manuais. A GAF também foi utilizada para calibrar parâmetros de um modelo computacional baseado em redes neurais artificiais, desenvolvido por Rueda (2014).

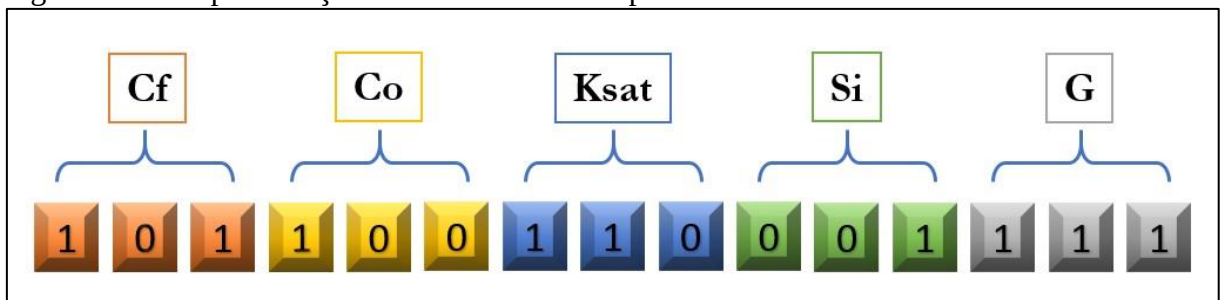
A GAF traz a possibilidade de implementação de três tipos de AG, sendo estes, binário, utilizado neste estudo, inteiro e real. Quanto ao processo de seleção dos cromossomos a biblioteca fornece três opções, seleção por torneio, por amostragem estocástica e por roleta. Após a execução de testes com o intuito de verificar qual a técnica de seleção mais adequada para a calibração, percebeu-se que a seleção por torneio se sobressaiu em relação as demais, haja vista que proporcionou melhores resultados para a função objetivo do problema, sendo, portanto, a escolhida.

Um dos problemas correntes na estrutura de um AG tradicional ocorre quando há a perda de boas soluções para o problema no decorrer das gerações, o que pode fazer com que o método

não convirja para soluções adequadas. Para resolver este problema, a GAF traz a possibilidade de incrementar ao AG o operador de elitismo, que faz com que um determinado percentual de cromossomos que representem as melhores soluções a cada geração seja preservado para as próximas. Esta funcionalidade foi aplicada ao AG deste trabalho.

Como já mencionado, o AG utilizado neste estudo é do tipo binário, portanto, a estrutura de genes que compõe o cromossomo recebe valores de bits. O tamanho do cromossomo é definido por meio de um parâmetro da GAF denominado número de bits. Neste caso, a cada variável de decisão (parâmetro calibrável) é atribuída uma cadeia de números binários equivalente a quantidade de bits que foi definida. Por exemplo, ao adotar-se um número de bits igual a 3 tem-se 3 binários para cada parâmetro calibrável, de modo que o cromossomo que representa uma solução será constituído por 15 bits, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 — Representação de um cromossomo para a rotina desenvolvida neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Calibração e validação dos parâmetros do Kineros2

A implementação da GAF para a calibração dos parâmetros do solo do modelo Kineros2 se deu, basicamente, de acordo com os seguintes passos: (a) definição dos limites máximo e mínimo de cada variável de decisão (parâmetros calibráveis), (b) definição da função objetivo.

Para o problema em questão, os parâmetros calibráveis do modelo K2 estão sujeitos a um tipo de restrição, onde os seus valores só poderão variar dentro de um intervalo conhecido, definido previamente pelo usuário. Os intervalos foram definidos com base no trabalho desenvolvido por Dourado (2018), que teve como objetivo discretizar o espaço de busca de cada parâmetro calibrável do Kineros2 para as microbacias estudadas. Todavia, com o propósito de aumentar o universo de possibilidades e verificar a eficiência do AG na busca por soluções em espaços demasiadamente extensos, resolveu-se ampliar os intervalos para cada microbacia, como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 — Descrição dos valores dos intervalos adotados para os parâmetros.

	Parâmetros	Dourado (2018)		Intervalo adotado	
		mín.	máx.	mín.	máx.
Nativa	C_f	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-5}$	1,0
	C_o	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-4}$
	K_{sat} (mm.h ⁻¹)	0,10	0,20	0,10	25,0
	S_i	0,75	0,85	0	1
	G (mm)	300	400	100	600
Raleada	C_f	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-5}$	1,0
	C_o	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-4}$
	K_{sat} (mm.h ⁻¹)	0,20	0,30	0,10	25,0
	S_i	0,80	0,90	0	1
	G (mm)	300	400	100	600
Queima e pastagem	C_f	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-5}$	1,0
	C_o	$3,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-4}$
	K_{sat} (mm.h ⁻¹)	10,0	11,0	0,10	25,0
	S_i	0,94	1,00	0	1
	G (mm)	250	350	100	600

Fonte: Elaborado pelo autor.

O intervalo dos parâmetros em questão foi aumentado obedecendo o seguinte critério: (a) para os parâmetros C_f e C_o houve um acréscimo na ordem de 1000 vezes, fixando o limite mínimo e ampliando o limite máximo. (b) para o parâmetro K_{sat} , fixou-se o limite mínimo e, devido a sua grande variabilidade, buscou-se adotar o limite máximo sugerido por Woolhiser, Smith e Goodrich (1990), no manual do Kineros2, para solos que possuem argila em sua constituição, tendo em vista que as três microbacias possuem característica franco argilosa, conforme relatado por Lima (2015). Para o S_i , devido ao seu valor variar entre 0 e 1, resolve-se adotar este intervalo para a calibração. Para o parâmetro G, ao serem analisados trabalhos como os de Salari e Namavar (2015) e Paiva *et al.* (2011), que abordaram estudos de caso envolvendo regiões semiáridas, percebeu-se que o referido parâmetro variou entre 100 e 600, para tanto, resolveu-se adotar tal intervalo.

Na biblioteca GAF os cromossomos são avaliados por meio de uma função *fitness*, que é baseada no valor de aptidão do cromossomo, dado através da função objetivo. Por definição, a função *fitness* retorna um valor não negativo normalizado em um intervalo conhecido, geralmente entre 0 e 1, onde quanto mais próximo de 1 melhor o valor da aptidão do cromossomo. A função objetivo utilizada neste estudo mensura a proximidade entre n valores de sedimentos simulados pelo K2 e n valores de sedimento observados em campo. Para isso, se fez uso do índice de concordância (d), proposto por Willmott (1985), expresso na Equação (20),

onde O , S e $\bar{O}$ referem-se as massas de sedimento observadas e simuladas e a média das massas de sedimento observadas, respectivamente. O índice de Willmott varia entre 0 e 1, sendo o valor 1 indicativo de ajuste perfeito dos dados do modelo aos dados observados. Esta característica faz com que a função objetivo varie no mesmo intervalo numérico da função *fitness*, dispensando a necessidade de se efetuarem ajustes através de normalização dos dados da função objetivo.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (20)$$

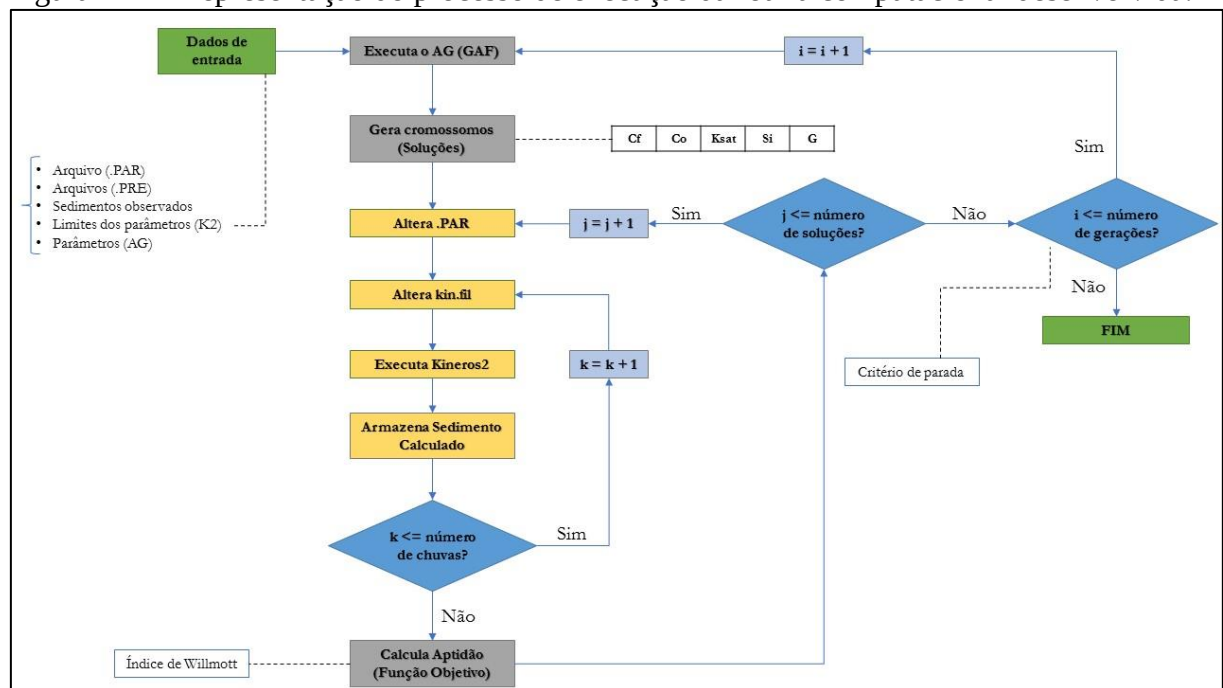
Devido a característica do problema de otimização, há a necessidade de converter a cadeia de binários de cada variável decisão que compõe o cromossomo em um número real. Este procedimento é necessário para que se envie os parâmetros no formato real para que sejam calculados os valores de sedimento através do Kineros2 e, posteriormente, seja efetuado o cálculo da função objetivo. A biblioteca GAF faz este processo automaticamente por meio da decodificação de dados binários que se dá através da equação (21), onde $z \in [x, y] \subseteq \mathbb{R}$ e $\{a_1, \dots, a_L\} \in \{0, 1\}^L$. Os valores de x e y equivalem aos limites de variação mínimo e máximo de cada parâmetro calibrável, respectivamente. A variável L corresponde ao número de bits escolhido, sendo este, responsável por definir a precisão máxima possível da solução. O vetor $\vec{a}$ expressa o conjunto binário a ser convertido.

$$r_{(a_1, \dots, a_L)} = x + \frac{y - x}{2^L - 1} \cdot \left(\sum_{j=0}^{L-1} a_{L-j} \cdot 2^j \right) \in [x, y] \quad (21)$$

Em resumo, a rotina computacional desenvolvida para calibrar os parâmetros do K2 recebe um conjunto de dados de entrada (arquivos PAR e PRE, valores de sedimentos observados em campo para cada evento de chuva, limites dos parâmetros calibráveis e parâmetros do AG), que serão manipulados pela biblioteca GAF, gerando, em um processo iterativo, um conjunto de cromossomos que representam valores reais para os parâmetros a serem calibrados. Na sequência, a rotina faz a alteração do arquivo PAR com os parâmetros fornecidos pelo AG e inicia um subprocesso iterativo, onde o arquivo kin.fil será alterado para cada evento de chuva (arquivo PRE) analisado, resultando em um valor de massa de sedimento após a simulação do K2. Posteriormente, após o cálculo da massa de sedimento para todos os

eventos de chuva é atribuído um valor de aptidão ao cromossomo, calculado por meio da função objetivo. Este procedimento é repetido para cada cromossomo da geração em análise. A rotina encerra a execução quando o critério de parada do AG for atingido, sendo este, o número de gerações. Ao final do processo iterativo obtêm-se os valores dos parâmetros oriundos do cromossomo que apresentou o melhor valor de aptidão no decorrer das gerações. Na Figura 17 ilustra-se o processamento de dados descrito. O procedimento de calibração é repetido para as três microbacias experimentais estudadas de modo a se encontrar o conjunto de parâmetros calibráveis que melhor as caracteriza.

Figura 17 — Representação do processo de execução da rotina computacional desenvolvida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os eventos de precipitação avaliados neste estudo estão compreendidos entre os anos de 2009 a 2016, com coletas de dados concentradas de janeiro a junho, que corresponde à estação chuvosa da região. Para as três microbacias a calibração dos parâmetros do modelo K2 foi feita no conjunto de dados de 2011, isto foi definido em função do número de eventos de chuva que produziram sedimentos no referido ano, sendo o maior entre os demais. Com o intuito de tornar a coleção de dados mais representativa, foi aplicado ao conjunto original dos anos avaliados um critério de corte, sendo utilizados apenas os eventos de precipitação superiores a 10mm, que produziram uma massa de sedimentos superior a 1 kg.ha⁻¹. Ressalta-se que os anos de 2014 e 2015 não apresentaram valores que se enquadram neste critério para as três microbacias. Os

dados de produção de sedimentos utilizados neste estudo provêm de campanhas feitas pelo grupo de pesquisa Massa (2014), que desde o ano de 2009 vem realizando pesquisas no sentido quantificar os efeitos erosivos no semiárido cearense.

Objetivando atestar o resultado obtido por meio da calibração, os dados resultantes deste processo foram avaliados por mais duas funções que quantificam e qualificam o ajuste dos dados, sendo elas, o fator de eficiência (Equação 22), proposto por Nash e Sutcliffe (1970) e o índice de desempenho (Equação 23), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que consiste na multiplicação entre o valor do índice de concordância de Willmott (d), expresso na equação 20, e o coeficiente de correlação de Pearson, sendo este, dado pela equação (24). Nas referidas equações, os valores de O , S e $\bar{O}$ referem-se as massas de sedimento observadas e simuladas e a média das massas de sedimento observadas, respectivamente.

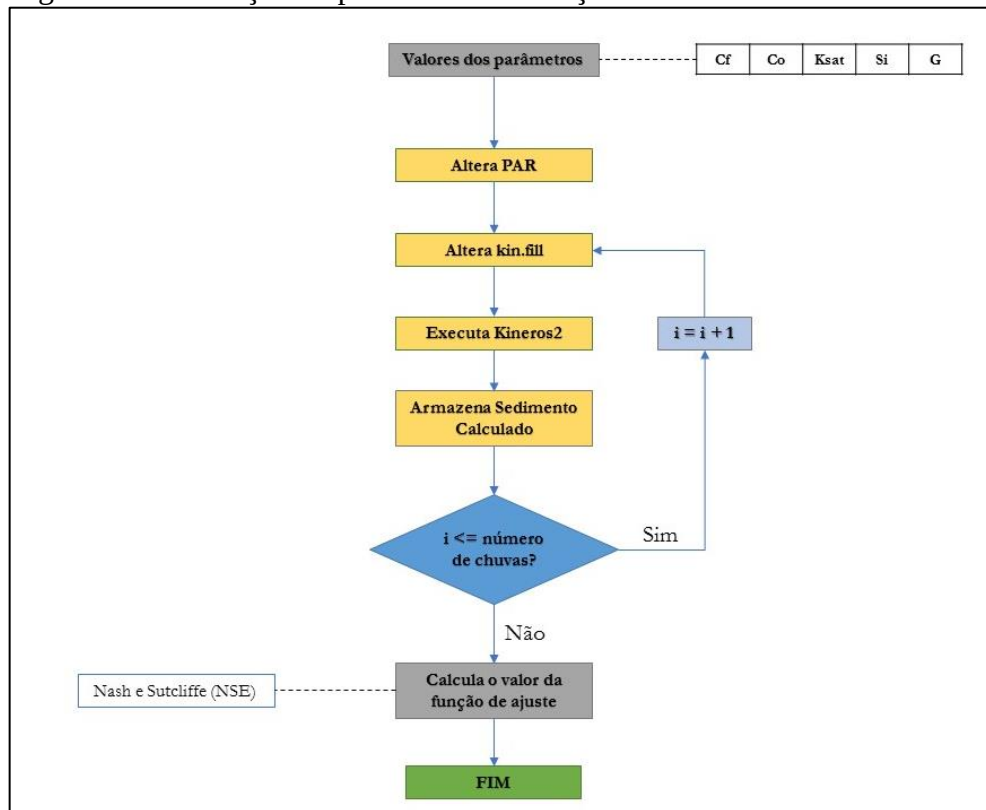
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (22)$$

$$c = d \cdot r \quad (23)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (24)$$

A etapa de validação dos dados consistiu em avaliar a eficiência dos valores encontrados para os parâmetros por meio da calibração em uma coleção de dados de chuva e massa de sedimentos diferente da utilizada na calibração, ou seja, nos dados de 2009, 2010, 2012, 2013 e 2016, de modo a verificar a representatividade dos mesmos no processo de caracterização das microbacias estudadas. Para isso, foi desenvolvida uma rotina computacional alternativa que recebe o conjunto de valores para os parâmetros (C_f , C_o , K_{sat} , S_i , G), altera o arquivo PAR com os mesmos e entra em um processo iterativo, onde o arquivo kin.fil é alterado para cada evento de chuva analisado, e, posteriormente, é calculado o valor de sedimento por meio da execução do K2. Após o término do processo iterativo, tem-se o valor de sedimento associado a cada um dos eventos de chuva analisados, o que possibilita a comparação deste conjunto de dados com os valores observados em campo, sendo a qualidade deste ajuste medida por meio do fator de eficiência de Nash e Sutcliffe (Equação 22). Este processo pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Descrição do processo de validação dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em função do número reduzido de eventos que produziram sedimentos nos anos de 2010, 2012, 2013 e 2016, que constituem anos em que a precipitação média anual apresentou-se abaixo da média histórica da região, a validação não foi feita de forma individual para cada ano, haja vista que nas três microbacias alguns anos apresentaram apenas 1 evento de precipitação que se enquadrou no critério de corte definido para este estudo, impossibilitando a aplicação do fator de eficiência de Nash e Sutcliffe (Equação 22). Diante deste fato, para a validação, os valores de massa de sedimento dos referidos anos foram reunidos em um único conjunto.

Com o intuito de estabelecer um conjunto de parâmetros que proporcionasse uma estabilidade ao AG, garantindo a evolução populacional adequada no decorrer das gerações, foram feitas 10 análises preliminares em um conjunto de dados composto por três eventos de chuva do ano de 2011, sendo variados, em cada análise, os parâmetros de entrada do AG. Considerando que o AG atua na evolução de uma população e não em um indivíduo isolado, o critério de avaliação é baseado na análise da aptidão média a cada geração, assim como o valor da função objetivo no final do processo evolutivo.

Objetivando verificar a dispersão dos valores apresentados para os parâmetros do K2 e, de certa maneira, conferir uma maior confiabilidade aos dados apresentados, foram realizadas 5 calibrações com os dados de eventos do ano de 2011, sendo adotado para a análise geral o conjunto de parâmetros encontrados na melhor delas, ou seja, na calibração que proporcionou um melhor valor para a função objetivo do problema.

Cabe destacar que para as três microbacias estudadas a simulação computacional foi feita por meio de um computador Desktop que tem a seguinte configuração: (a) processador: Intel Core I5; (b) capacidade do HD: 1 TB; (c) Memória RAM: 8 GB; (d) placa de vídeo dedicada com 1 GB de memória RAM.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção destina-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos por meio da calibração automática dos parâmetros do K2 via AG para as três microbacias estudadas.

6.1 Análise do desempenho do AG na calibração dos parâmetros do Kineros2

Após os testes preliminares, a configuração de parâmetros que proporcionou um melhor comportamento evolutivo ao AG é composta pelos seguintes dados: (a) tamanho da população: 100 cromossomos; (b) quantidade de gerações: 100; (c) taxa de cruzamento: 0,90; (d) taxa de mutação: 0,01; (e) número de elementos preservados pelo elitismo: 2 e (f) número de bits para a decodificação: 10. Ressalta-se que tais valores foram utilizados na calibração das três microbacias estudadas.

Avaliando o comportamento do AG nas cinco calibrações realizadas para cada microbacia, percebeu-se que não houve grande discrepância entre os valores dos parâmetros do K2, como pode ser observado na Tabela 10. Na análise da diferença relativa entre o valor da função objetivo para a melhor e a pior calibração percebe-se, para as microbacias nativa, raleada e queima e pastagem, valores na ordem de 5,31%, 13,28% e 10,81%. Os erros encontrados na comparação das calibrações evidenciam a robustez da técnica de algoritmos genéticos, uma vez que conseguiu-se alcançar bons resultados mesmo diante do amplo espaço de variação definido para cada parâmetro calibrável do K2.

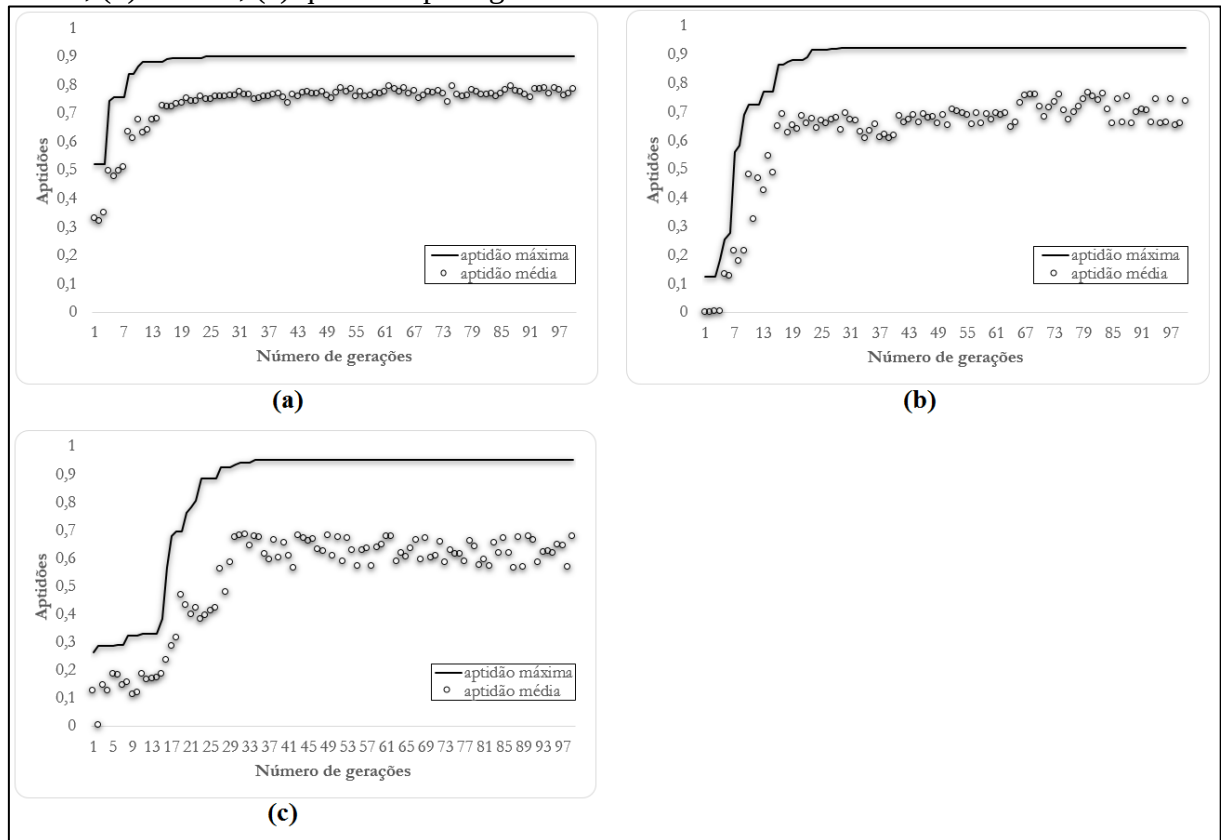
Tabela 10 - Resumo dos dados encontrados para as cinco calibrações realizadas para cada microbacia.

Calibrações para a microbacia nativa						
	C_f	C_o	$K_{sat} (mm.h^{-1})$	S_i	$G (mm)$	Willmott (d)
Calibração 1	$6,01 \times 10^{-4}$	$2,64 \times 10^{-5}$	0,421	0,284	372,87	0,882
Calibração 2	$2,12 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-5}$	0,445	0,329	252,93	0,869
Calibração 3	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-5}$	0,262	0,644	270,47	0,903
Calibração 4	$6,47 \times 10^{-4}$	$1,86 \times 10^{-5}$	0,493	0,265	303,42	0,899
Calibração 5	$2,71 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-5}$	0,567	0,312	254,83	0,855
Calibrações para a microbacia raleada						
	C_f	C_o	$K_{sat} (mm.h^{-1})$	S_i	$G (mm)$	Willmott (d)
Calibração 1	$2,54 \times 10^{-4}$	$3,21 \times 10^{-5}$	1,587	0,143	315,24	0,803
Calibração 2	$8,02 \times 10^{-3}$	$2,86 \times 10^{-5}$	2,472	0,243	390,02	0,913
Calibração 3	$6,58 \times 10^{-3}$	$3,38 \times 10^{-5}$	3,127	0,130	371,55	0,921
Calibração 4	$7,07 \times 10^{-3}$	$3,54 \times 10^{-5}$	1,923	0,145	399,41	0,885
Calibração 5	$3,43 \times 10^{-3}$	$3,42 \times 10^{-5}$	2,960	0,149	412,41	0,926
Calibrações para a microbacia de queima e pastagem						
	C_f	C_o	$K_{sat} (mm.h^{-1})$	S_i	$G (mm)$	Willmott (d)
Calibração 1	$5,96 \times 10^{-3}$	$1,86 \times 10^{-5}$	0,604	0,664	142,229	0,939
Calibração 2	$5,88 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-5}$	0,453	0,721	186,022	0,853
Calibração 3	$2,83 \times 10^{-3}$	$2,64 \times 10^{-5}$	0,556	0,639	141,838	0,849
Calibração 4	$1,80 \times 10^{-3}$	$1,66 \times 10^{-5}$	0,641	0,755	416,716	0,884
Calibração 5	$6,26 \times 10^{-3}$	$1,88 \times 10^{-5}$	0,570	0,626	126,588	0,952

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar-se a evolução da função objetivo por meio dos gráficos apresentados na Figura 19, percebe-se que a aptidão média populacional (média da aptidão da população de cromossomos a cada geração) é crescente na calibração das três microbacias, favorecendo o surgimento de indivíduos que se destacam entre os demais, e, por consequência, proporcionando melhores soluções para o problema. Tal constatação sugere que o conjunto de parâmetros adotados para o AG se mostra adequado, haja vista que esta técnica atua sobre a população e não sobre um indivíduo específico, tornando-a mais apta e, por consequência, aumentando a probabilidade do surgimento de indivíduos de destaque. Todavia, observou-se nas três análises que o AG apresentou uma certa convergência para determinado valor, o que sugere-se que poderia ser evitado, por exemplo, aumentando-se o número de gerações e alterando taxa de mutação, de forma a provocar o possível surgimento de melhores soluções para o problema em função do acréscimo no número de iterações no processo evolutivo.

Figura 19 - Evolução da função objetivo a cada geração na calibração para as microbacias: (a) nativa; (b) raleada; (c) queima e pastagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 Calibração automática e validação para a microbacia nativa

O conjunto de dados utilizados para a calibração na microbacia nativa é oriundo de coletas feitas no ano de 2011, totalizando 9 eventos de precipitação e seus respectivos valores de produção de sedimentos, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados utilizados na calibração da microbacia nativa.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha ⁻¹)
Microbacia nativa	01/02/2011	433,39
	28/02/2011	377,20
	19/04/2011	427,67
	21/04/2011	21,97
	25/04/2011	342,15
	30/04/2011	197,29
	03/05/2011	476,91
	06/05/2011	86,03
	18/05/2011	124,27

Fonte: Elaborado pelo autor.

A calibração adotada para a análise geral da microbacia nativa decorreu em um tempo computacional de 1 hora e 47 minutos. Ao final da simulação o melhor cromossomo encontrado pelo AG proporcionou um valor de 0,903 para a função objetivo, fato que sugere um desempenho satisfatório da técnica, haja vista que seu valor se aproximou de forma considerável do ajuste perfeito entre os dados observados e simulados, que equivale a 1. As Tabelas 12 e 13 trazem, respectivamente, os valores dos parâmetros calibráveis trazidos pela solução encontrada pelo AG, assim como os valores de massa de sedimento calculados pelo Kineros2 por meio destes. Como forma de possibilitar uma análise do grau de ajuste dos dados, apresenta-se no Gráfico 1 a comparação entre a produção de sedimentos observada e a calculada por meio da simulação do K2 no processo de calibração dos dados para a microbacia nativa. Percebe-se que a maioria dos dados se concentra próximo à linha identidade, indicando uma concordância adequada entre os valores observados e calculados.

Tabela 12 - Valores encontrados pelo AG para a melhor calibração dos parâmetros da microbacia nativa.

Parâmetros calibráveis (melhor calibração)				
C_f	C_o	$K_{sat} (mm.h^{-1})$	S_i	$G (mm)$
$1,00 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-5}$	0,262	0,644	270,47

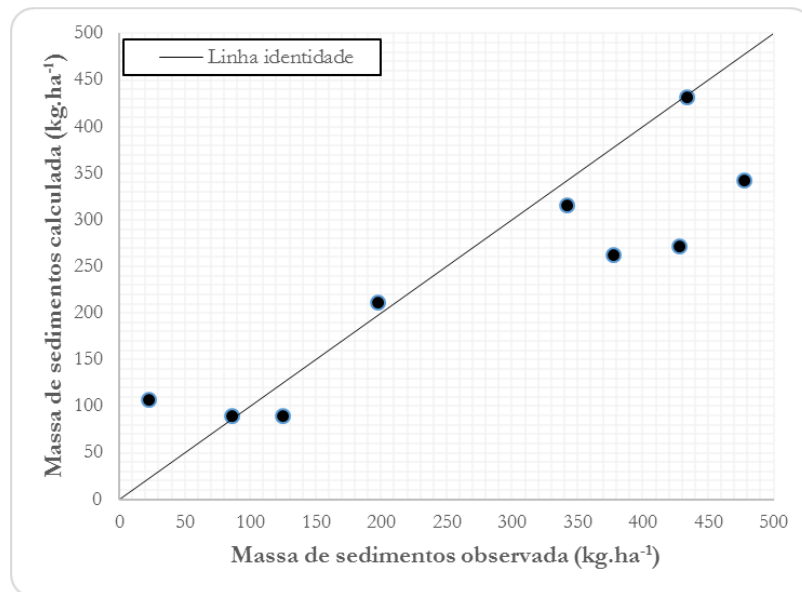
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Resumo dos dados de massa de sedimentos calculada e observada para a microbacia nativa.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha ⁻¹)	massa de sedimento calculada pelo K2 (kg.ha ⁻¹)	diferença relativa (%)
Microbacia nativa	01/02/2011	433,39	431,53	-0,43
	28/02/2011	377,20	262,75	-30,34
	19/04/2011	427,67	271,51	-36,51
	21/04/2011	21,97	107,05	387,13
	25/04/2011	342,15	315,69	-7,73
	30/04/2011	197,29	211,44	7,17
	03/05/2011	476,91	342,52	-28,18
	06/05/2011	86,03	89,85	4,44
	18/05/2011	124,27	90,16	-27,45
	Total	2486,92	2122,54	
Índice de Willmott (d)			0,903	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			0,721	
Índice de concordância (c)			0,819	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 1 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (K2) para a microbacia nativa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o relato de Mesquita e Moraes (2004), a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) é um parâmetro de difícil determinação em função da sua grande variabilidade nos solos, sendo seu valor intimamente dependente de vários parâmetros, como densidade do solo, porosidade, macroporosidade e microporosidade. Para este estudo, apesar do amplo espaço de busca o valor do parâmetro K_{sat} encontrado pelo AG se aproximou de forma considerável do valor de 0,20 (mm.h^{-1}), sendo este medido por Araújo Neto (2012) em uma análise em condições de campo na microbacia nativa nas profundidades de 0-30 e 30-60cm com o auxílio de um permeâmetro de carga constante, conhecido como Amoozometer.

O parâmetro S_i define o grau de saturação do solo antes do evento de chuva, sendo seu valor diretamente ligado às condições de umidade do solo antes da precipitação, que definem o grau de escoamento superficial na área. Tendo em vista esta característica, espera-se que o mesmo tenha um comportamento diferente para cada evento de precipitação, apresentando-se sensível a um evento imediatamente anterior, ocasionando uma necessidade de calibração evento a evento em função da lâmina de água escoada. Todavia, para este estudo, em razão da não utilização de dados de lâmina escoada optou-se por realizar a calibração em conjunto com os demais parâmetros por meio dos valores de massa de sedimentos produzida. No entanto, para a calibração na microbacia nativa este ajuste não ocasionou grandes problemas, uma vez que o valor encontrado para S_i está contido dentro do intervalo sugerido por Woolhiser, Smith e Goodrich (1990), sendo este de 0,16 a 0,84 para solos franco argilosos, como o da microbacia

nativa (LIMA, 2015). Estudos como o de Santos, Paiva e Nitão (2004) e Dos Santos (2009), que também estudaram uma região semiárida do Brasil, mostram valores médios de S_i acima de 0,60. Deste modo, diante do bom ajuste de dados apresentado na calibração, sugere-se que individualmente os eventos de chuva não demandaram valores extremos para S_i .

A exemplo da saturação inicial do solo, o parâmetro G (potencial de capilaridade do solo) se relaciona com características físicas do solo que também variam de acordo com a sua umidade. Na ausência de dados de campo que possam definir o potencial de capilaridade, os autores Rawls *et al.* (1982) indicam valores médios para este parâmetro em função do tipo de solo, sendo seu valor de, aproximadamente, 260 mm para solos com textura franco argilosa. Diante do exposto, percebe-se que o valor encontrado pelo AG para o potencial de capilaridade da microbacia nativa se aproximou do valor estimado pelos autores ora citados.

Os parâmetros C_f e C_o são coeficientes com valor positivo que costumam apresentar uma grande variação em função das características do solo, como pode ser observado na Tabela 14, onde são apresentados diversos estudos contendo valores adotados para os parâmetros em questão em função da escala da área de estudo e do tipo de solo. Os parâmetros C_f e C_o encontrados na calibração para a microbacia nativa podem ser comparados aos que se apresentam no estudo de Paiva *et al.* (2007), que estudaram uma região semiárida do nordeste brasileiro, obtendo parâmetros médios para C_f e C_o na ordem de $6,9 \times 10^{-5}$ e $1,0 \times 10^{-4}$, respectivamente. Tais dados se mostram distantes dos apresentados pelo AG, no entanto, cabe ressaltar que os autores ora citados calibraram manualmente os parâmetros evento a evento, obtendo valores médios, o que pode ter contribuído para o distanciamento dos dados, tendo em vista que o AG empregado neste estudo busca caracterizar uma área e um regime anual de chuvas e não um evento isolado.

Tabela 14 - Valores adotados para os parâmetros C_f e C_o em diversos estudos da literatura.

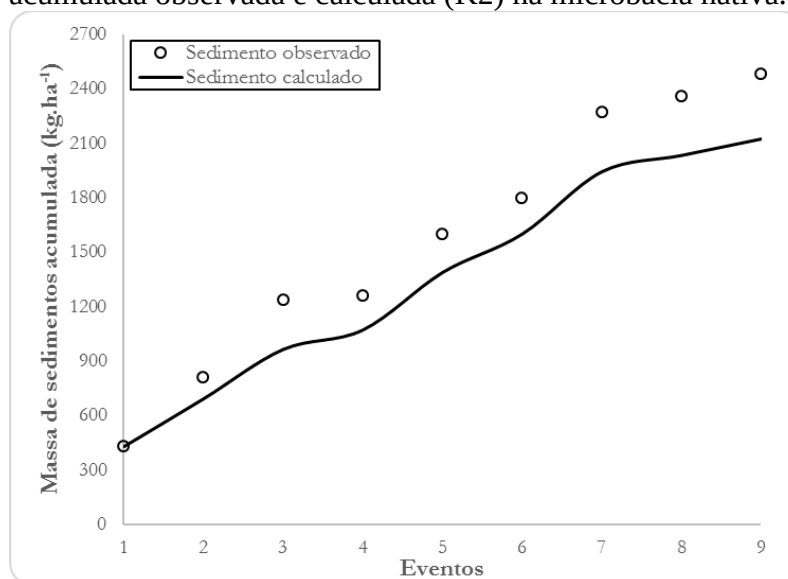
Autor	Escala de estudo	Característica do solo	C_f	C_o
Miaoying <i>et al.</i> (2019)	parcela	Arenoso	625	$5,0 \times 10^{-2}$
Paiva <i>et al.</i> (2007)	micro-bacia	franco argiloso	$6,9 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$
Paiva <i>et al.</i> (2011)	micro-bacia	franco argiloso	$8,70 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Hantush e Kalin (2005)	bacia	franco argilo-siltoso	10	$1,0 \times 10^{-2}$

Em relação ao conjunto de dados apresentado na Tabela 13, percebe-se um desempenho satisfatório da calibração com o AG refletido por meio do resultado que se apresenta para o fator de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) e o índice de desempenho (c), cujos valores são 0,721 e 0,819, respectivamente. Conforme destaca Dos Santos *et al.* (2014) o desempenho de

um modelo quando avaliado pelo fator de eficiência de Nash e Sutcliffe pode ser considerado aceitável quando o valor do NSE está entre 0,36 e 0,75. Em relação ao índice de desempenho, Camargo e Sentelhas (1997) afirmam que valores entre 0,76 e 0,85 demonstram um bom desempenho do modelo de predição.

No Gráfico 2 apresenta-se uma comparação entre os valores acumulados de massa de sedimento observadas e calculadas, sendo constatada uma certa tendência de subestimativa do modelo K2 para a microbacia nativa. Todavia, tal fato é minimizado quando se analisa a proximidade entre o acumulado simulado e o observado, sugerindo a indicação de um bom ajuste de dados. Ressalta-se que embora possam haver eventos individuais que não apresentaram resultados satisfatórios, no acumulado, a modelagem no K2 mostra que conseguiu absorver tal impacto, proporcionando um valor de massa de sedimentos anual próximo ao observado.

Gráfico 2 - Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (K2) na microbacia nativa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A validação dos valores encontrados para os parâmetros do K2 durante a simulação da microbacia nativa ocorreu em dois conjuntos de dados. O primeiro diz respeito aos valores do ano de 2009, totalizando 6 eventos associados as suas respectivas de produções de sedimento. O segundo conjunto, definido pela junção das chuvas dos anos 2010, 2012, 2013 e 2016, é composto por 7 eventos. Conforme se apresenta na Tabela 15, ao serem avaliados pelo fator de eficiência de Nash e Sutcliffe, apresentaram um comportamento diverso. Para os dados de 2009 percebeu-se um bom ajuste dado o valor de NSE igual 0,693, que pode ser considerado aceitável

de acordo com a interpretação relatada por Dos Santos *et al.* (2014). Todavia, a validação no segundo conjunto de dados não proporcionou um ajuste adequado, o valor de NSE ficando abaixo de zero, indicando que os dados calculados não se aproximaram dos observados, constatando-se uma superestimativa do modelo em todos os eventos avaliados. Ressalta-se que de acordo com dados da Funceme (2017), no município de Iguatu os anos de 2009 e 2011 apresentaram uma precipitação média em torno 29,34% e 36,96% acima da média histórica anual (991 mm), respectivamente. Por outro lado, os anos de 2010, 2012, 2013 e 2016 apresentaram valores médios de precipitação na ordem de 21,86%, 20,72%, 41,75% e 27,70% abaixo da média histórica, respectivamente. Diante deste fato, constatou-se que os parâmetros calibrados com dados de um ano que apresentou precipitações médias acima da média histórica não conseguiram apresentar boa representatividade para anos secos (abaixo da média histórica anual).

Tabela 15 – Resumo dos dados encontrados na validação para a microbacia nativa.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha ⁻¹)	massa de sedimento calculada pelo K2 (kg.ha ⁻¹)	diferença relativa (%)
Validação para o ano de 2009	18/02/2009	94,02	281,23	199,11
	04/03/2009	123,27	83,16	-32,53
	17/04/2009	89,33	190,95	113,75
	25/04/2009	76,78	124,45	62,08
	30/04/2009	635,50	524,74	-17,43
	08/05/2009	245,18	141,04	-42,47
	Total	1264,09	1345,59	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			0,693	
Validação para os anos de 2010, 2012, 2013 e 2016	19/04/2010	111,93	224,31	100,40
	30/04/2010	56,77	292,08	414,46
	27/03/2012	75,46	202,81	168,76
	02/04/2012	37,53	1676,11	4365,17
	09/05/2013	167,10	593,45	255,13
	28/03/2016	15,78	292,73	1755,13
	30/03/2016	17,79	238,53	1240,85
	Total	482,39	3520,05	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			-168,91	

Fonte: Elaborado pelo autor

6.3 Calibração automática e validação para a microbacia raleada

Para a calibração dos parâmetros do Kineros2 para a microbacia raleada foram utilizados 10 eventos de chuva do ano de 2011, com seus respectivos valores de produção de sedimentos, os quais apresentam-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados utilizados na calibração da microbacia raleada.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha ⁻¹)
Microbacia raleada	01/02/2011	396,67
	19/04/2011	273,03
	21/04/2011	51,28
	23/04/2011	245,85
	25/04/2011	140,43
	30/04/2011	178,98
	03/05/2011	455,39
	05/05/2011	331,28
	06/05/2011	24,19
	19/05/2011	32,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a microbacia raleada, a melhor calibração ocorreu em um tempo computacional de 1 hora e 05 minutos. A redução observada no tempo de execução do modelo computacional em relação a calibração para a microbacia nativa pode estar relacionada ao tamanho da mesma. Enquanto a microbacia nativa é composta por 6 planos e 3 canais a microbacia raleada possui apenas 2 planos e 1 canal, fato que, teoricamente diminui o número de operações de cálculo dentro do K2, proporcionando reduções em termos de tempo de processamento de dados.

Considerando a dificuldade de modelagem de fenômenos da natureza, o valor de 0,926 da função objetivo atrelada à melhor solução trazida pelo AG indica um bom ajuste entre os dados observados e simulados, o que pode ser percebido por meio das informações apresentadas no Gráfico 3, onde os dados se mostraram próximos à linha identidade. O fator de eficiência de Nash e Sutcliffe e o índice de concordância apresentaram os valores de 0,755 e 0,804, respectivamente, representando um bom ajuste de dados (DOS SANTOS *et al.*, 2014; CAMARGO E SENTELHAS, 1997). Os valores dos parâmetros do K2 trazidos pela solução do AG, assim como o resumo dos dados da calibração para a microbacia raleada podem ser observados nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17 - Valores encontrados pelo AG para os parâmetros da microbacia raleada.

Parâmetros calibráveis (melhor calibração)				
C_f	C_o	K_{sat} (mm.h⁻¹)	S_i	G (mm)
3,43 x 10 ⁻³	3,42 x 10 ⁻⁵	2,96	0,149	412,41

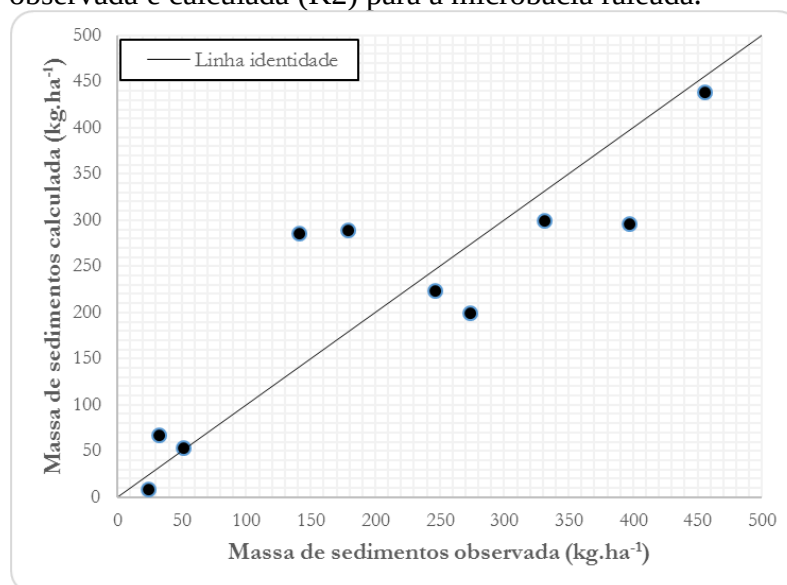
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Resumo dos dados encontrados na calibração para a microbacia raleada.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha ⁻¹)	massa de sedimento calculada pelo K2 (kg.ha ⁻¹)	diferença relativa (%)
Microbacia raleada	01/02/2011	396,67	296,32	-25,30
	19/04/2011	273,03	199,78	-26,83
	21/04/2011	51,28	53,35	4,05
	23/04/2011	245,85	223,75	-8,99
	25/04/2011	140,43	285,99	103,65
	30/04/2011	178,98	288,94	61,44
	03/05/2011	455,39	438,56	-3,69
	05/05/2011	331,28	299,34	-9,64
	06/05/2011	24,19	9,44	-60,99
	19/05/2011	32,13	68,01	111,66
	Total	2129,26	2163,52	
Índice de Willmott (d)			0,926	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			0,755	
Índice de concordância (c)			0,804	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (K2) para a microbacia raleada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A calibração para a microbacia raleada apresentou resultados para os parâmetros C_f e C_o dentro da mesma ordem de grandeza dos valores que foram encontrados para a microbacia nativa, sendo uma das possíveis explicações para este fenômeno o fato de serem adjacentes, o que pode proporcionar uma similaridade entre as características do solo das mesmas.

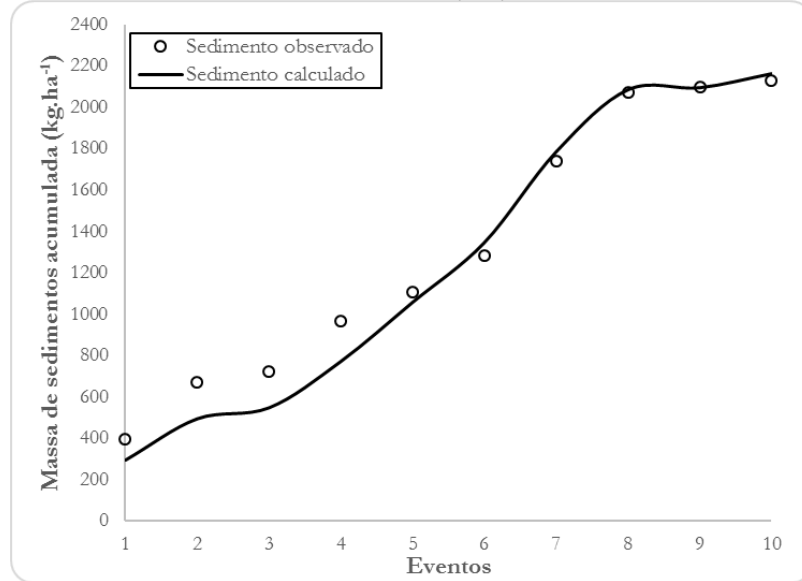
Conforme relata Dos Santos (2015), que estudou as três microbacias avaliadas neste estudo entre os anos de 2009 e 2013, a microbacia raleada apresentou menores valores de

lâmina de água escoada em relação às demais. O autor justifica esta característica em função do raleamento promover a redução do sombreamento do solo, favorecendo o crescimento do estrato herbáceo que, por sua vez, aumenta o grau de interceptação vegetal, proporcionando reduções no escoamento superficial e aumentos de infiltração de água no solo. Considerando a condutividade hidráulica saturada um parâmetro determinante para o cálculo das taxas de infiltração no solo pelo modelo Kineros2, conforme explicitado pela Equação (3), uma possível necessidade de adequação do modelo às características locais pode ter causado a necessidade de elevação no valor de K_{sat} para a microbacia raleada em relação ao que foi constatado para a microbacia nativa, apesar de as mesmas serem adjacentes.

Na calibração, os parâmetros S_i e G apresentaram variações se comparados aos resultados obtidos para a microbacia nativa, sugerindo que também houve a necessidade de ajuste nos mesmos por parte do K2 para atender a característica de baixo escoamento superficial apresentada pelo manejo de raleamento. Considerando que o parâmetro S_i define o grau de saturação do solo antes do evento estudado, uma das possíveis explicações para a redução do seu valor se dá pela necessidade de uma condição de baixa saturação inicial do solo, proporcionando um maior grau de infiltração e, por consequência, uma redução do escoamento superficial. O fenômeno em questão foi evidenciado no trabalho de Santos (2010) em uma análise que aplica o K2 na modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Japaratuba Mirim, no semiárido sergipano. O autor em questão também estabelece uma relação inversa entre os parâmetros G e S_i , atribuindo aumentos no potencial efetivo de capilaridade a um menor grau de saturação inicial, fato que pode ser observado nos parâmetros trazidos pelo AG para a microbacia raleada.

No que diz respeito ao comportamento do modelo K2 para a microbacia raleada, contou-se por meio da análise do Gráfico 4 uma subestimativa nos eventos iniciais, seguida de uma superestimativa, o que pode ser considerado um fator positivo, uma vez que esta configuração mostra que o modelo não apresentou tendências na calibração. Além disso, cita-se a proximidade entre as curvas de massa de sedimentos acumulada observada e calculada, expressando uma concordância em termos de ajuste nos dois casos, o que evidencia que os parâmetros encontrados pelo AG refletem o comportamento da área em estudo.

Gráfico 4 - Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (K2) na microbacia raleada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na microbacia nativa, a validação dos dados para a microbacia raleada apresentou um comportamento diferente para anos acima e abaixo da média de pluviosidade regional, como pode ser observado na Tabela 19. O fator de eficiência de Nash e Sutcliffe para o ano de 2009 (acima de média de pluviosidade) apresentou um valor de 0,543, podendo ser considerável aceitável segundo a classificação apresentada por Dos Santos *et al.* (2014), o que torna representativo para o referido ano o conjunto de parâmetros encontrados pelo AG na calibração. No entanto, ao analisar-se a validação nos dados que apresentaram pluviosidade abaixo da média, o NSE assumiu um valor negativo, o que sugere que o conjunto de parâmetros não se mostra adequado para os anos em questão. Neste sentido, há um reforço da tese de que os parâmetros calibráveis do K2 apresentam um grau elevado de sensibilidade em relação a anos secos e chuvosos.

Tabela 19 - Resumo dos dados encontrados na validação para a microbacia raleada

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha⁻¹)	massa de sedimento calculada pelo K2 (kg.ha⁻¹)	diferença relativa (%)
Validação para o ano de 2009	18/02/2009	295,75	272,8106	-7,76
	04/03/2009	104,75	20,51858	-80,41
	15/04/2009	54,78	131,8913	140,77
	17/04/2009	83,11	161,9259	94,83
	25/04/2009	60,27	18,7543	-68,88
	08/05/2009	209,78	205,6545	-1,97
	Total	808,44	811,55	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			0,543	
Validação para os anos de 2010, 2012, 2013 e 2016	27/03/2010	17,2885	205,1786	1086,80
	30/04/2010	15,3916	353,5566	2197,07
	21/02/2012	158,22	170,9669	8,06
	24/02/2012	129,7900	201,0486	54,90
	09/05/2013	163,2000	879,0509	438,63
	30/03/2016	6,6300	174,9991	2539,50
	Total	490,52	1984,80	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			-22,99	

Fonte: Elaborado pelo autor

6.4 Calibração automática e validação para a microbacia de queima e pastagem

O conjunto de dados utilizados para a calibração na microbacia de queima e pastagem foi o maior entre as microbacias estudadas, sendo composto por 13 eventos de chuva registrados no ano de 2011 acompanhados de sua respectiva produção de sedimentos, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados utilizados na calibração da microbacia de queima e pastagem.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha⁻¹)
Microbacia de queima e pastagem	30/01/2011	70,1767
	28/02/2011	156,5303
	13/04/2011	32,9321
	19/04/2011	159,9209
	21/04/2011	40,3274
	23/04/2011	146,2972
	25/04/2011	241,9391
	30/04/2011	131,2674
	03/05/2011	224,9431
	05/05/2011	198,9531
	06/05/2011	108,1141
	18/05/2011	44,0866
	19/05/2011	48,5398

Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo computacional decorrente na melhor calibração para a microbacia de queima e pastagem foi de 1 hora e 53 minutos, valor bem próximo ao apresentado para a microbacia nativa, o que pode ser justificado pela quantidade de elementos de discretização que as caracterizam, sendo 6 planos e 3 canais. O conjunto de parâmetros encontrados pelo AG para a microbacia de queima e pastagem (Tabela 21) proporcionou o melhor ajuste, dentre as demais microbacias, entre os dados observados e calculados pelo K2, resultando em uma função objetivo com o valor de 0,952, como pode ser observado na Tabela 22. A avaliação por meio do fator de eficiência de Nash e Sutcliffe e pelo índice de concordância indicam os valores de 0,831 e 0,870, respectivamente, como que pode ser considerado um bom ajuste segundo as classificações propostas por Dos Santos *et al.* (2014) e Camargo e Sentelhas (1997). O Gráfico 5 reforça as constatações realizadas até então, onde pode-se perceber uma pequena dispersão dos dados em relação à linha identidade.

A evolução da população ao longo das gerações na análise das três microbacias sugere que a combinação de parâmetros adotados conseguiu expor a característica evolutiva do AG. Vale ressaltar que para este estudo se fez uso do elitismo, preservando os dois melhores indivíduos de cada geração, o que pode ter contribuído para o desempenho satisfatório da AG.

Tabela 21 - Valores encontrados pelo AG para os parâmetros da microbacia de queima e pastagem.

Parâmetros calibráveis (melhor calibração)				
C_r	C_o	$K_{sat} (mm.h^{-1})$	S_i	$G (mm)$
$6,26 \times 10^{-3}$	$1,88 \times 10^{-5}$	0,570	0,626	126,58

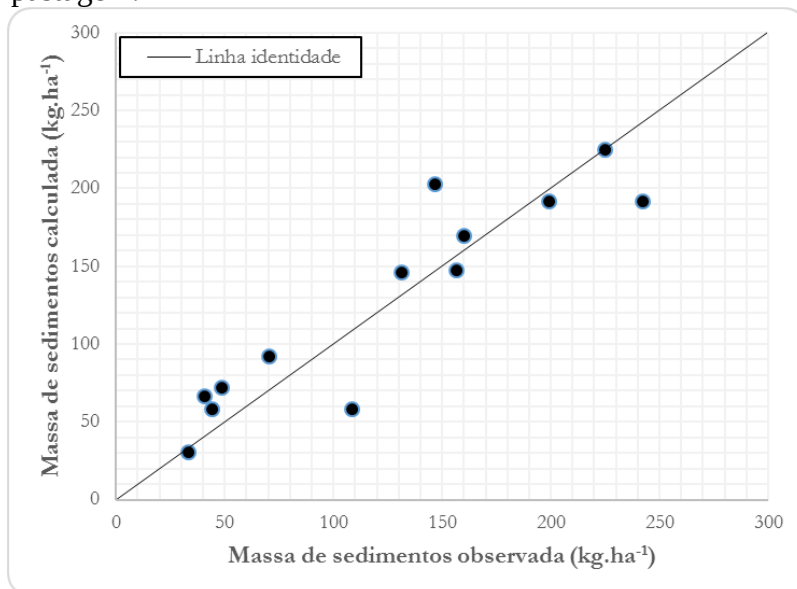
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 - Resumo dos dados encontrados na calibração para a microbacia de queima e pastagem.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha ⁻¹)	massa de sedimento calculada pelo K2 (kg.ha ⁻¹)	diferença relativa (%)
Microbacia de queima e pastagem	30/01/2011	70,1767	92,52389	31,84
	28/02/2011	156,5303	147,9876	-5,46
	13/04/2011	32,9321	30,7075	-6,76
	19/04/2011	159,9209	169,5294	6,01
	21/04/2011	40,3274	66,9549	66,03
	23/04/2011	146,2972	203,1481	38,86
	25/04/2011	241,9391	191,647	-20,79
	30/04/2011	131,2674	146,608	11,69
	03/05/2011	224,9431	224,9804	0,02
	05/05/2011	198,9531	192,0468	-3,47
	06/05/2011	108,1141	58,71072	-45,70
	18/05/2011	44,0866	58,51901	32,74
	19/05/2011	48,5398	72,56542	49,50
	Total	1604,02	1655,92	
Índice de Willmott (d)			0,952	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			0,831	
Índice de concordância (c)			0,870	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (K2) para a microbacia de queima e pastagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros C_f e C_o apresentaram pequena variação durante a análise das três microbacias. Como estão ligados diretamente às características do solo e de precipitação, os referidos parâmetros podem ter sido influenciados por uma similaridade entre as microbacias

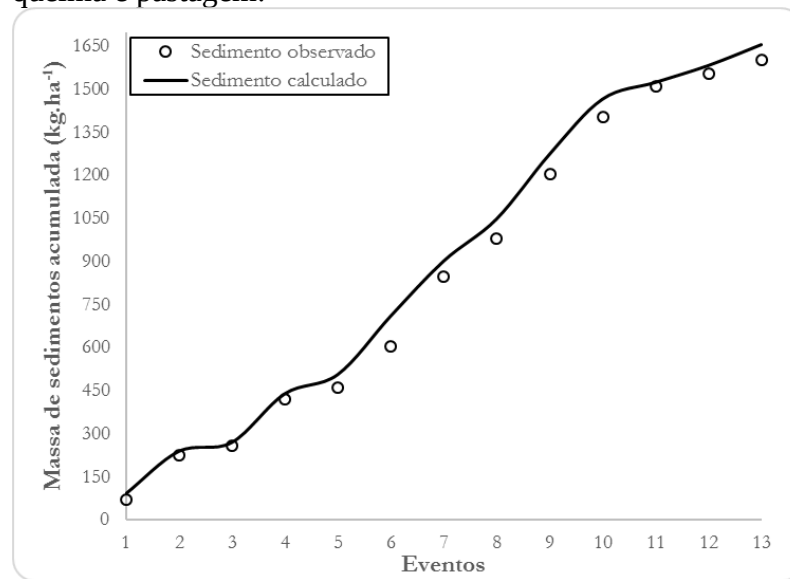
nesse quesito. Embora o manejo seja diferente para cada área, pela relativa proximidade, a morfologia do solo pode ter características semelhantes. Ao fazer uma análise para as três microbacias fixando os demais parâmetros calibráveis e variando o C_f , percebeu-se que o mesmo se mostra praticamente insensível a variações para o problema em questão, não causando mudanças significantes do valor da massa de sedimentos calculada pelo K2. No entanto, ao se realizar a mesma análise para o parâmetro C_o , percebeu-se que o mesmo possui grande sensibilidade a mudanças, uma vez que uma pequena variação do seu valor causou mudanças expressivas na massa de sedimentos simulada. Conforme destacada Pereira Júnior (2011) as dimensões da área estudada podem exercer influência sobre o fenômeno em questão. Na escala de parcelas o parâmetro C_f exerce maior influência sobre o processo erosivo uma vez que os planos são a representação da própria parcela, e esta, por sua vez, pode ser considerada totalmente plana, favorecendo a erosão pelo impacto de gotas de chuva. No entanto, em escalas maiores, como em microbacias, os planos são muito maiores que as parcelas, logo, nem toda a região do plano é totalmente plana, sendo em algumas partes destes presenciada a ocorrência de sulcos formados pela concentração de escoamento superficial, causando erosão concentrada em virtude da predominância da ação de forças de cisalhamento nas partículas do solo, sendo a coesão responsável por resistir de maneira mais incisiva no processo erosivo. Desta forma, o parâmetro C_o teria mais influência em relação ao C_f na escala estudada.

Na calibração para a microbacia de queima e pastagem os parâmetros influenciados pelo escoamento superficial apresentaram comportamento diferente se comparados aos valores encontrados para a microbacia raleada. Percebeu-se uma redução da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), acompanhada de um aumento no grau de saturação inicial do solo (S_i). De acordo com as informações apresentadas por Dos Santos (2015), a microbacia de queima e pastagem tem por característica apresentar as maiores lâminas de escoamento superficial em relação às demais microbacias estudadas, o que pode ter provocado a necessidade de decréscimo no valor do K_{sat} em função da redução da capacidade de infiltração do solo, assim como um acréscimo no seu grau de saturação inicial, condição necessária para haja um aumento nas taxas de escoamento superficial. Em relação ao potencial de capilaridade do solo (G), a diminuição do seu valor em relação ao encontrado para a microbacia raleada reforça a constatação levantada por Santos (2010) de que há uma relação inversa entre parâmetro S_i e G no modelo Kineros2.

O desempenho satisfatório da calibração para a microbacia de queima e pastagem fica evidente no Gráfico 6. Percebe-se que há uma tendência de superestimativa do modelo K2 no acumulado de massa de sedimento, fato que não comprometeu o resultado final da simulação

tendo em vista a proximidade entre as curvas de produção de sedimento acumulada calculada e observada. Além disso, destaca-se que apesar de alguns eventos individuais apresentaram uma diferença relativa expressiva entre o calculado e o observado, ao final, a modelagem pelo K2 conseguiu absorver tais impactos, gerando no acumulado total uma massa de sedimentos bem próxima ao acumulado observado.

Gráfico 6 - Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (K2) na microbacia de queima e pastagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O validação dos resultados para os parâmetros do K2 trazidos para a microbacia de queima e pastagem, conforme apresenta-se na Tabela 23, seguiu a tendência identificada para as demais microbacias estudadas, onde percebeu-se um bom ajuste para o ano de 2009 (pluviosidade acima da média histórica), representado por um valor de 0,811 para o fator de eficiência de Nash e Sutcliffe, assim como um ajuste inadequado (valor de NSE negativo) para os anos que apresentaram uma pluviosidade média anual abaixo da média histórica (2010, 2012, 2013 e 2016). Um dos fatores que podem ter contribuído para a divergência entre as validações pode estar relacionado as condições de umidade do solo antes do evento de precipitação em função de um processo de fendilhamento que surge durante as estações secas. De acordo com Dos Santos (2015), durante o período seco o solo das microbacias estudadas sofre um processo de fendilhamento, contatando-se a formação de fendas que possuem em superfície aberturas de até 5 cm e profundidade de mais de um metro. Tal característica proporciona a formação de caminhos preferenciais para o escoamento, gerando abstrações no volume precipitado.

Conforme ZHANG *et al.* (2014), grandes fendas presentes no solo geram elevados valores de capacidade de infiltração e de retenção de água. Considerando que modelos hidrossedimentológicos como o K2 dificilmente tem a capacidade de prever este comportamento do solo, os resultados das simulações nos anos secos sugerem que para um determinado conjunto de parâmetros tem-se uma superestimativa das lâminas de água escoadas nos eventos de precipitação, e, por consequência, haja uma superestimativa excessiva no valor da massa de sedimentos calculada.

Tabela 23 - Resumo dos dados encontrados na validação para a microbacia de queima e pastagem.

	data do evento	massa de sedimento observada (kg.ha ⁻¹)	massa de sedimento calculada pelo K2 (kg.ha ⁻¹)	diferença relativa (%)
Validação para o ano de 2009	18/02/2009	85,64	79,32539	-7,37
	04/03/2009	146,99	168,4813	14,62
	15/04/2009	72,29	54,37143	-24,79
	17/04/2009	74,80	53,53001	-28,44
	30/04/2009	171,43	187,3362	9,28
	08/05/2009	117,15	125,1965	6,87
	Total	668,30	668,24	
Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)			0,811	
Validação para os anos de 2010, 2012, 2013 e 2016	27/03/2010	128,2600	177,4342	38,34
	29/03/2010	48,8600	1,586106	-96,75
	11/04/2010	108,0600	51,707	-52,15
	19/04/2010	357,4600	234,4827	-34,40
	30/04/2010	132,0100	143,5829	8,77
	23/01/2012	221,200	182,2392	-17,61
	19/02/2012	109,000	53,38453	-51,02
	24/02/2012	115,600	226,2972	95,76
	27/02/2012	19,000	67,41124	254,80
	27/03/2012	9,900	121,7075	1129,37
	09/05/2013	167,1100	380,4732	127,68
	28/03/2016	63,8400	184,5718	189,12
	30/03/2016	25,6500	154,1716	501,06
	Total	1505,95	1979,04	
	Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)		-0,211	

Fonte: Elaborado pelo autor

7 CONCLUSÃO

Tendo em vista a dificuldade de determinação dos parâmetros físicos do solo e do processo físico de erosão, sobretudo em regiões semiáridas, pode-se concluir que o AG desenvolvido para a calibração das três microbacias se mostrou uma técnica robusta e eficiente, uma vez que conseguiu encontrar um conjunto de parâmetros para o K2 que proporcionou uma adequação entre os dados simulados e observados confirmada por meio dos bons resultados obtidos para as funções de avaliação adotadas para o problema. O presente estudo possibilitou a construção de uma alternativa viável ao processo de calibração manual do K2, proporcionando uma redução de esforço computacional por parte do usuário, além de minimizar a ocorrência de possíveis erros.

Durante a calibração para as três microbacias estudadas constatou-se que o parâmetro C_f (relacionado ao impacto pelas gotas de chuva) apresentou pouca sensibilidade em relação aos demais, em contrapartida, o parâmetro C_o mostrou-se muito sensível a variações, causando mudanças significativas no valor da massa de sedimentos calculada pelo Kineros2. Tal fato tem relação com os processos de erosão e transporte de sedimentos que ocorrem na escala de microbacia. Verificou-se que a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e o grau de saturação inicial do solo (S_i) estão intimamente ligados, ambos determinantes para a simulação do escoamento superficial durante a modelagem, que por sua vez, tem impacto direto na produção de sedimentos. Além disso, percebeu-se uma relação inversa entre o grau de saturação inicial do solo e o potencial de capilaridade (G).

Os valores para os parâmetros C_f e C_o mantiveram-se na mesma ordem de grandeza durante a calibração para as três microbacias, o que pode ter sido causada pela similaridade entre a morfologia do solo nas mesmas. Os parâmetros K_{sat} , S_i e G apresentaram valores que proporcionaram uma adequação do modelo Kineros2 a realidade constatada *in loco*, uma vez que conseguiram refletir as características de baixo e alto índice de escoamento superficial das microbacias raleada e queima e pastagem, respectivamente.

As análises apresentadas neste estudo sugerem que o regime pluviométrico tem impacto direto na modelagem por meio do K2, uma vez que a validação para o conjunto de dados de anos com pluviosidade acima da média histórica anual apresentou um melhor desempenho em relação a validação feita em anos secos (pluviosidade abaixo da média histórica). A superestimativa do modelo Kineros2 para anos secos pode ter ligação com o processo de fendilhamento do solo, que causa uma abstração no volume precipitado, provocando aumentos no volume de água escoado e na produção de sedimento simulados pelo modelo Kineros2,

apontando para a necessidade de uma calibração separada para anos com pluviosidade abaixo e acima de média histórica regional.

REFERÊNCIAS

- ALVES, N. N. L. **Caracterização de microbacia hidrográfica experimental no semiárido brasileiro como suporte a estudos da degradação**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- ARAÚJO NETO, J. R. **Efeito de diferentes manejos sobre o escoamento superficial em microbacias experimentais no semiárido tropical**. Dissertação de Mestrado – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, 2012.
- ARNOLD, J. G. ; WILLIAMS, J. R.; SRINIVASAN, R.; KING, K. W.; GRIGGS, R. H. SWAT - Soil Water Assessment Tool. **Grassland**: USDA, 1994.
- ARROIO JUNIOR, P. P. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas - SP**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.
- BARBOSA, A. F.; OLIVEIRA, E. F.; MIOTO, C. L.; FILHO, A. C. P. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em Softwares Livres e Gratuitos. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Vol.38, n.01, p. 170-179, 2015.
- BHATTA, B.; SHRESTHA, S.; SHRESTHA, P. K; TALCHABHADEL, R. Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. **Catena**, Vol.181, p. 01-13, 2019.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, Vol. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CHIA, V. D.; MBAJIORGU, C. C. **Application of KINEROS2 Model for the Estimation of Runoff and Sediment Yield from Agricultural Watersheds**. Sustainable Water Managemen. Vol.6, p. 310-316, 2015.
- CHOUKRI, F.; CHIKHAOUI, M.; NAIMI, M.; PÉPIN, Y.; RACLOT, D. Analysis of the hydro-sedimentary functioning of a watershed of the Western Rif of Morocco using the SWAT model: Case of the Tleta watershed. **Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**, Vol.7. n.02, p. 06-15, 2019.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- DALBIANCO, L. **Simulação hidrossedimentológica com o Modelo LISEM em uma pequena bacia Hidrográfica rural**. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 2013.
- DARONCO, G. C. **Avaliação dos parâmetros do modelo Kineros2 para a simulação hidrossedimentológica em duas pequenas bacias hidrográficas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

DA SILVA, B. F. **Análise dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico Swat na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia - GO.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, 2015.

DESAVATHU, R. N.; RAO, P. J. Soil Erosion Assessment of Hilly Terrain of Paderu Using USLE and GIS. **Proceedings of International Conference on Remote Sensing for Disaster Management.** p. 347-358, 2018.

DOS SANTOS, L. L. Quantificação do escoamento superficial e erosão do solo em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Geografia Física.** Vol. 5, p. 14-25, 2009.

DOS SANTOS, J. C. N. **Processos hidrológicos e sedimentológicos em clima semiárido tropical.** Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DOS SANTOS, J. C. N.; DE ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; RODRIGUES, R. N. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Vol. 18, p. 1157-1164, 2014.

DOURADO T. P. H. A. **Discretização do espaço de solução para parâmetros do modelo de produção de sedimentos kineros2 em microbacias experimentais do semiárido brasileiro.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal do Ceará, 2018.

DUNG, B. X.; QUANG, D. V. Applying universal soil loss equation (USLE) to estimating soil erosion at lam son headwater catchment. **Journal of forestry science and technology,** n. 5, p. 61-73, 2017.

ENGELUND, F.; HANSEN, E. **A monograph on sediment transport in alluvial streams.** Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 1967.

FARIAS, T. R. L. **Produção de sedimentos em bacias hidrográficas sob diferentes contextos geoambientais: medida e modelagem.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 2008.

FIROUZABADI, P. Z.; DAVOODI, A. **Study on soil erosion and sedimentation in Alashtar watershed using image processing software.** Congress Hydrological Sciences. Istanbul, 2004.

FORMIGA, K.T.M.F. **Otimização Multiobjetivo de Projetos de Redes de Distribuição de Água.** Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FUNCEME. **Fundação cearense de meteorologia e recursos hídricos.** Página inicial. Fortaleza, 2017. Disponível em: <<http://www.funceme.br/>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

GOLDEBERG, D. E. (1989). **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Massachusetts: Addison-Wesley, Publishing Company Inc., 1989, 412 p.

HENRIQUES, K. R. S. **Diagnóstico hidroenergético e otimização operacional pela aplicação de algoritmos genético, de uma estação elevatória de água**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, 2018.

HANTUSH, M.; KALIN, L. **Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS2**. Hydrological Sciences Journal. vol. 50, p. 1151 – 1171, 2005.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Tese (Doutorado) — University of Michigan, 1975.

IBGE. **Mapas regionais**. Rio de Janeiro, c2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?t=sobre>>. Acesso em: 3 jun. 2019.

IVANOV, V. K.; PALYUKH, B. V.; SOTNIKOV, A. N. Efficiency of genetic algorithm for subject search queries. **Lobachevskii Journal of Mathematics**. Vol. 37, p. 244-254, 2016.

KALIN, L.; HANTUSH, M. **Comparative Assessment of Two Distributed Watershed Models with Application to a Small Watershed**. Hydrological Processes. Vol. 20, p. 2285 – 2307, 2006.

KORGAONKAR, Y.; GUERTIN, D. P.; GOODRICH, D. C.; UNKRICH, C.; KEPNER, W. G.; BURNS, I. S. Modeling Urban Hydrology and Green Infrastructure Using the AGWA Urban Tool and the KINEROS2 Model. **Frontiers in Built Environment**, Vol.4, p. 1-15, 2018.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. **Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil**. Revista Brasileira de Ciências do Solo, n. 36, p. 623-634, 2012.

LIMA, J. H. C. **Avaliação das perdas de nutrientes e solo por erosão hídrica em microbacias do semiárido cearense**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal do Ceará, 2015.

LIN, B. S.; CHEN, C. K.; THOMAS, K.; HSU, C. K.; HO, H. C. Improvement of the K-Factor of USLE and Soil Erosion Estimation in Shihmen Reservoir Watershed. **Sustainability**, n. 11, p. 1-16, 2019.

LOPES, W. T.A. **Efeito de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida da Paraíba**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, 2003.

MASSA. **Manejo de água e solo do semiárido**, 2014. Página inicial. Disponível em: <<http://www.massa.ufc.br/>>. Acesso em: 08 de jan. de 2020.

MEMARIAN, H.; BALASUNDRAM, S. K.; TALIB, J. B.; SUNG, C. T. B.; SOOD, A. M.; ABBASPOUR, K. C. **Hydrologic analysis of a tropical watershed using KINEROS2**. *EnvironmentAsia*. Vol 5, p. 84-93, 2012.

MENDES, B. G. **Otimização da localização de poços de petróleo com completção seca utilizando algoritmos genéticos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**. Vol. 34, p. 963-969, 2004.

MEYER, L. D.; WISCHMEIER, W. H. **Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water**. Trans. of the ASAE. 1969.

MIAOYING, A.; YUGUO, H.; LEI, X.; XIURU, W.; CHANG, A.; DANBO, P. Kineros2-based simulation of total nitrogen loss on slopes under rainfall events. **Catena**. Vol 177, p. 13-21, 2019.

MONTENEGRO, A. A. A.; CORRÊA, M. M.; SILVA, V. P.; SILVA, E. F. F.; SANTOS, E. S.; SANTOS, T. E. M.; SILVA JUNIOR, V. P.; FONTES, R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SEIXAS, M. G.; AGUIAR, L. M. C.; GALVÃO, C. O.; NÓBREGA, R. L. B.; SILVA, D. K. D. **Introdução à modelagem hidrossedimentológica utilizando o modelo Kineros2**. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, 2008.

MIAOYING, A.; YUGUO, H.; LEI, X.; XIURU, W.; CHANG, A.; DANBO, P. **KINEROS2-based simulation of total nitrogen loss on slopes under rainfall events**. *Catena*, Vol.177, p. 13-21, 2019

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, **J. Hydrol.**, Vol. 10, p. 282–290, 1970.

NEWCOMBE, J. **Implementing Genetic Algorithms in C#**. Code Project, 2016. Disponível em: <https://www.codeproject.com/Articles/873559/Implementing-Genetic-Algorithms-in-Csharp>. Acesso em: 02 jul. 2019.

NGUYEN, Q. D.; KAPPAS, M.; DEGENER, J. F. Flash flood prediction by coupling KINEROS2 and HEC-RAS models for tropical regions of Northern Vietnam. **Hidrology**, Vol. 2, p. 242-265, 2015.

PAIVA, E. M. C. D. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

PAIVA, F. M. L.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Estimativa de Valores Regionais dos Parâmetros do Solo do Modelo KINEROS2 para o Semiárido Paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol.16, n.03, p. 141-150, 2011.

PAIVA, F. M. L.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; TAVEIRA, I. M. L. M. Modelagem hidrossedimentológica com Kineros2 para as micro-bacias experimentais de São João do Cariri. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007.

PAIVA, F. M. L. **Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida paraibana**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, 175 p., 2008.

PALÁCIO, H. A. Q. **Avaliação emergética de microbacias hidrográficas do semiárido submetidas a diferentes manejos**. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido – Universidade Federal do Ceará, 150 p., 2011.

PEREIRA JÚNIOR, C. C. **Modelagem do escoamento e transporte de sedimentos em parcelas sob chuva simulada**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 108 p., 2011.

POZO, A. et al. **Computação Evolutiva**. Universidade Federal do Paraná. p. 1 - 61, 2015.

RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L.; SAXTON, K.E. 1982. **Estimation of soil water properties**. Trans. ASAE 25: 1316–1320 & 1328.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2 ed. Barueri: Manole, 2004.

ROSA, D. R. Q. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio pomba utilizando o Swat**. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2016.

RUEDA, C. V. **Ferramenta de Previsão de Séries Temporais Baseada em Echo State Networks Otimizadas por Algoritmos Genéticos e Particle Swarm Optimization**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

SALARI, A.; NAMAVAR, B. Prediction of runoff using kineros2 model with agwa-gis interface. **DAV International Journal of Science**. Vol. 4, p. 2277-5641, 2015.

SANTOS, T. T. **Delimitação espacial e simulação hidrossedimentológica na bacia do rio Japarutuba mirim em Sergipe**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, 2010.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **RBGF – Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 3, n. 2, p. 01-19, 2009.

SANTOS, L. L. **Modelagem hidrossedimentológica e avaliação comparativa de três modelos em pequenas sub-bacias na região semiárida paraibana**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

SANTOS, C. A. G.; PAIVA, F. M. L.; NITÃO, I. A. Modelagem hidrossedimentológica para as parcelas da Bacia Experimental de São João do Cariri. **VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2004.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; RODRIGUES, R. N. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, Vol. 18, n. 11, p. 1157-1164, 2014.

SCHULTZ, G. B.; SOUZA, R. M.; SANTOS, I. Simulação da produção e transporte de sedimentos com o modelo SWAT: Aplicação na Bacia do Altíssimo Rio Negro. In: **Engenharia de Sedimentos na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento**. Brasília: ABRH, 2011.

SMITH, R. E.; PARLANGE, J. Y. A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model. **Water Resource. Research.**, Vol.14, p. 533-538, 1978.

SMITH, R. E.; CORRADINI, C.; MELONE, F. Modeling infiltration for multistorm runoff events. **Water Resources Research**, Vol. 29. p. 133-144, 1993.

SOUZA, T. C. **Produção de sedimentos em microbacias experimentais na região semiárida do Ceará, estimada pelo modelo Kineros2**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal do Ceará, 2016.

SUDEC (Superintendência de Desenvolvimento do Estado do Ceará). **Levantamento de reconhecimento semidetalhado dos solos da Região dos Inhamuns – Salgado**. Parte I - Iguatu, Fortaleza, 1980, 192 p.

VERAS, R. S. *et al.* Aplicação de um modelo matemático para estudar a qualidade de água do rio Piranhas-Açu/RN tomando como referência os parâmetros DBO e coliformes termotolerantes. **Revista Tecnologia**, v. 36, p. 64-78, 2015.

WILLMOTT, C. J. *et al.* Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, Vol. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WILLIAMS, J.R. (1975): Sediment-yield prediction with universal soil equation using runoff energy factor. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources**: Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, 1975.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning**, **Agricultural Handbook N° 537**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1978.

WOOLHISER, D.A.; SMITH, R.E.; GOODRICH, E.C. **A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**, U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service, ARS-77. 130 pp, 1990.

ZHANG, Z.B.; ZHOU, H.; ZHAO, Q.G.; LIN, H.; PENG, X. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow. **Geoderma**, Vol. 228, p.114–121, 2014.