

Universidade de Évora

**Metodologias de calibração e validação
do modelo de simulação climática
CLIGEN de apoio à modelação de perda
de solo.**

Tese de Mestrado em Engenharia do Solo e da Água

Pedro Manuel Sousa Lopes

Orientador: Professor Coordenador Alfredo Gonçalves Ferreira

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri.

ÉVORA, 2005

Agradecimentos

Ao terminar este trabalho, não posso deixar de agradecer a todos quantos me ajudaram.

Quero agradecer particularmente:

À minha família porque sempre me apoiaram e estimularam no decorrer do curso.

Ao orientador Professor Doutor Alfredo Gonçalves Ferreira, por ter aceite a orientação deste trabalho, pelo apoio que me deu pelas sugestões e pela liberdade de investigação e definição do rumo a seguir neste trabalho.

Ao Doutor Nuno Cortês por ter instalado o Campo Experimental de Erosão do Solo de Castelo Branco, por sempre me ter incentivado a prosseguir os meus conhecimentos, por me ter confiado a manutenção do ensaio e pela revisão final do trabalho e sugestões apresentadas.

Aos colegas do Mestrado, principalmente à Isabel Laranjeira por me ter acompanhado em todas as fases do mestrado e pelo encorajamento mútuo que partilhámos.

Aos colegas da Unidade Departamental de Engenharia Rural da Escola Superior Agrária de Castelo Branco por me terem substituído nas minhas ausências para frequência do Mestrado e por terem dado aprovação à possibilidade de frequência do Mestrado.

À Escola Superior Agrária de Castelo Branco por me ter autorizado a frequência no mestrado, por me ter confiado a manutenção do Campo Experimental de Erosão do Solo e por ter posto à minha disposição os meios necessários para a realização do mesmo.

Aos alunos de Actividades Agrícolas e Actividades de Manutenção Rural, pelo empenho colocado na realização das tarefas que lhes foram incumbidas, sem as quais não seria possível a manutenção em funcionamento do Campo Experimental de Erosão do Solo.

Aos alunos que realizaram os seus trabalhos de estágio de final de ciclo no Campo Experimental de Erosão do Solo agradeço o empenho e encorajamento que mutuamente partilhámos.

À Ana, minha esposa, agradeço o apoio que sempre me deu na realização deste curso e as correcções que fez a nível de português.

A todos o meu Bem hajam

Resumo

Metodologias de calibração e validação do modelo de simulação climática

CLIGEN de apoio à modelação de perda de solo.

Os objectivos deste trabalho são a calibração e validação do modelo de simulação climática CLIGEN de apoio ao modelo de previsão de erosão do solo WEPP.

Para a realização deste trabalho foram utilizados os dados meteorológicos recolhidos no posto meteorológico e na estação experimental de erosão de solo da Escola Superior Agrária de Castelo Branco.

Para comparação dos dados simulados pelo CLIGEN com os dados observados, fez-se correr o modelo por um período de cem anos, sendo os resultados obtidos comparados estatística mente com os observados.

Verificou-se que o CLIGEN simula bem os valores médios de precipitação mensal, precipitação diária máxima mensal, precipitação média em dia chuvoso, número de dias de precipitação mensal, mas não os respectivos desvios padrão e distribuição em termos de percentis.

Quando se faz correr o modelo CLIGEN com os parâmetros separadamente de anos secos e de anos chuvosos, há melhorias no desempenho do modelo.

Foi feita uma proposta de alteração do código do CLIGEN, com desactivação do controlo de qualidade da geração dos números aleatórios pelo CLIGEN e com uma rotina que permite determinar estocasticamente se um ano é seco ou chuvoso.

Verificou-se que com esta alteração se conseguiram melhorias no desempenho do CLIGEN, nomeadamente em termos de uma melhor representação da variabilidade.

Posteriormente procedeu-se à validação do modelo com as alterações propostas com um novo conjunto de dados meteorológicos recolhido num clima semelhante, tendo-se verificado que o modelo com as alterações propostas tem um desempenho satisfatório.

Palavras-chave: CLIGEN, WEPP, erosão do solo, modelo de simulação climática.

Abstract

Methodologies for calibration and validation of CLIGEN climate generator for soil erosion prediction.

The objectives of this work are calibration and validation of the CLIGEN climate generator, used in soil erosion model WEPP.

To achieve this objectives we used climate data from the meteorological station and soil erosion station of the High School of Agriculture in Castelo Branco (Portugal).

To compare observed and generated data we made the model run for 100 years, and compared simulated with observed data.

We concluded that CLIGEN simulates well average values of monthly precipitation, maximum daily precipitation, average precipitation in wet day, number of rainy days, but not their standard deviation and percentile distribution.

We run CLIGEN with parameters for wet and dry years, with an improvement in model performance.

We propose a change in CLIGEN's code with deactivation of quality control of random number generator, and introduced a routine to determinate stochastically if the year is wet or dry.

With this change, we achieved an improved CLIGEN performance, mainly in reproducing variability.

Finally, we validate the model with the proposed changes, using another dataset different from the original, and concluded that its performance was satisfactory.

Key Words: CLIGEN, WEPP, soil erosion, climate generator.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Âmbito e objectivos do estudo.....	1
1.2. Organização da tese	1
2. Estado actual dos conhecimentos – Revisão bibliográfica.....	2
2.1. Relação entre a erosão do solo e a precipitação.....	2
2.2. Modelação matemática	11
2.3. Modelos de previsão da erosão hídrica.	12
2.3.1. Modelos empíricos	13
2.3.2. Modelos fisicamente baseados	13
2.4. Desenvolvimento de um modelo fisicamente baseado	19
2.5. Avaliação de modelos	20
2.5.1. Selecção.....	22
2.5.2. Fontes de erros e incertezas.....	22
2.5.3. Verificação e validação	25
2.5.4. Calibração	30
2.5.5. Sensibilidade.....	32
2.6. Modelos de simulação climática.....	32
2.7. Modelos estocásticos	33
2.7.1. Dados de precipitação diária.....	35
2.7.2. Ocorrência de precipitação	35
2.7.3. Quantidade de precipitação	41
3. Material e métodos	45
3.1. Estação experimental de erosão de solo de Castelo Branco	45
3.2. Descrição do modelo CLIGEN.....	48
3.2.1. O que é?.....	48
3.2.2. História do desenvolvimento do CLIGEN.....	50
3.2.3. O que faz e como faz?.....	52

3.2.4.	Para que serve?.....	56
3.2.5.	Porque não há ficheiros de parâmetros fora dos Estados Unidos?	56
3.2.6.	Necessidades de calibração e validação.....	58
3.3.	Dados e programas informáticos utilizados	61
3.4.	Aspectos a calibrar/validar.....	61
3.4.1.	Fase de calibração.....	61
3.4.2.	Fase de validação	63
3.4.3.	Perspectivas de trabalho futuras.....	63
4.	Resultados obtidos com o modelo CLIGEN	66
4.1.	Definições de variáveis estatísticas.....	67
4.2.	Resultados da simulação	68
4.2.1.	Precipitação mensal.....	69
4.2.2.	Número de dias de precipitação mensal	72
4.2.3.	Precipitação diária máxima mensal.....	74
4.2.4.	Precipitação média em dia chuvoso.....	76
4.2.5.	Alterações de parâmetros do CLIGEN	79
4.3.	Resultados da simulação em anos secos.....	80
4.4.	Resultados da simulação em anos chuvosos	86
4.5.	Resultados da simulação em anos secos e chuvosos.....	92
5.	Alterações feitas ao CLIGEN	99
5.1.	Justificação das alterações realizadas	99
5.1.1.	Alteração dos números aleatórios.....	99
5.1.2.	Introdução da variável anos secos e chuvosos.....	99
5.2.	Resultados obtidos com as alterações introduzidas	100
5.3.	Discussão dos resultados obtidos com as alterações	106
5.3.1.	Precipitação média mensal.....	106
5.3.2.	Número de dias de precipitação mensal	107
5.3.3.	Precipitação diária máxima mensal.....	107

5.3.4.	Precipitação média em dia chuvoso.....	107
5.4.	Resumo de resultados	107
6.	Validação do modelo por nós proposto com outro conjunto de dados climáticos ...	109
7.	Conclusões.....	115
8.	Bibliografia.....	116
9.	Anexo I	123
10.	Anexo II.....	126

Índice de figuras

Fig. 2-1 Fotografias de alta velocidade do impacto de uma gota à superfície do solo. Tensão de atrito à superfície do solo: (A) $\tau = 2.6$ kPa; (B) $\tau = 7.1$ kPa; (C) $\tau = 20.9$ kPa (Al-Durrah e Bradford, 1982).....	8
Fig. 2-2 - Metodologia para o desenvolvimento de um modelo fisicamente baseado (adaptado de Nearing <i>et al.</i> , (1994) por Tomás (1997)	19
Fig. 2-3 - Diagrama das fontes de erros em modelação hidrológica. Adaptado de Risse e Nearing (1995) por Tomás (1997).....	23
Fig. 2-4 - Representação esquemática de uma cadeia de Markov de dois estádios de primeira ordem, que ilustra a ocorrência ou não ocorrência de precipitação. Os estádios considerados são 0 para não ocorrência de precipitação e 1 para ocorrência de precipitação.	39
Fig. 3-2 - Exemplo de uma chuvada observada e o padrão adoptado pelo CLIGEN e WEPP (Yu, 2003).....	55
Fig. 3-3 – Esquema de funcionamento do CLIGEN (NSERL, 2004).....	56
Fig. 3-4 - Procedimento utilizado para calibração e validação de um modelo	60

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Série temporal de ocorrência ou não de precipitação em Castelo Branco no mês de Janeiro de 1997.....	38
Tabela 3.1 – Precipitação mensal (mm) observada na estação experimental de erosão de solo de Castelo Branco nos anos hidrológicos de 1991/1992 a 2002/2003. Totais anuais, médias e desvio padrão mensais.....	47
Tabela 4.1. Estatísticas observadas da precipitação mensal em Castelo Branco	67
Tabela 4.2. Estatísticas da precipitação mensal observadas e simuladas pelo CLIGEN	71
Tabela 4.3. Estatísticas do número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN	73
Tabela 4.4. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN.....	75
Tabela 4.5. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN.....	77
Tabela 4.6 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados.....	78
Tabela 4.7. Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos	81
Tabela 4.8. Estatísticas de número de dias de precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos.....	82
Tabela 4.9. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos	83
Tabela 4.10. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos	84
Tabela 4.11 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados em anos secos.....	85
Tabela 4.12. Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos	87

Tabela 4.13. Estatísticas número de dias de precipitação observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos	88
Tabela 4.14. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos	89
Tabela 4.15. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos	90
Tabela 4.16 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados em anos chuvosos.....	91
Tabela 4.17. Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos.....	93
Tabela 4.18. Estatísticas do número de dias de precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos.....	94
Tabela 4.19. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos.....	95
Tabela 4.20. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos.....	96
Tabela 4.21 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados com a utilização conjunta de parâmetros de anos secos e chuvosos.	97
Tabela 4.22 Número de vezes em que as combinações meses/variáveis gerados não diferem significativamente dos observados por tipo de simulação.....	98
Tabela 5.1. Estatísticas da precipitação média mensal observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos	102
Tabela 5.2. Estatísticas de número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos.....	103
Tabela 5.3. Estatísticas de precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos	104

Tabela 5.4. Estatísticas de precipitação média e dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos	105
Tabela 6.1 Valores estatísticos da precipitação Castelo Branco INMG.....	109
Os resultados obtidos com esta simulação encontram-se nas tabelas Tabela 6.2 a 6.6.	109
Tabela 6.3 Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG	111
Tabela 6.4 Estatísticas do número de dias de precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG	112
Tabela 6.5 Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG	113
Tabela 6.6 Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG	114

1. Introdução

1.1. *Âmbito e objectivos do estudo*

O trabalho que se apresenta, integrado no Curso de Mestrado em Engenharia do Solo e da Água da Universidade de Évora, enquadra-se na temática de Conservação do Solo e da Água, especificamente na temática de Erosão Hídrica do Solo.

Um dos factores que determinam a erosão hídrica do solo é a distribuição da precipitação em termos de quantidade e intensidade.

O objectivo deste trabalho é calibrar e validar o modelo de simulação climática CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995), de apoio ao modelo de previsão de erosão do solo WEPP (NSERL, 2004), para a região de Castelo Branco.

Para esta calibração foram utilizados os dados de precipitação e temperatura recolhidos na estação experimental de erosão de solo e no posto meteorológico da Escola Superior Agrária de Castelo Branco, situados a cerca de 3 km do centro da referida cidade. Para a validação deste modelo foram utilizados os dados da Estação Meteorológica do posto do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

1.2. *Organização da tese*

Esta tese é constituída por sete capítulos, e um conjunto de anexos que têm por objectivo fornecer alguns dados que não se julgou oportuno incluir no corpo principal do trabalho.

Depois desta Introdução, apresenta-se, no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica com o estado actual de conhecimentos da relação entre precipitação e perda de solo, dos modelos de previsão de erosão hídrica correntemente mais utilizados, o seu desenvolvimento e avaliação.

No capítulo 3 faz-se a apresentação da estação experimental de solo existente na Escola Superior Agrária de Castelo Branco, que serviu de base à elaboração deste trabalho. Descreve-se também o modelo de simulação climática utilizado na modelação de erosão hídrica.

No capítulo 4, 5 e 6 apresentam-se os resultados obtidos com o modelo CLIGEN original e com as alterações por nós propostas, e faz-se a respectiva discussão.

Finalmente, no capítulo 7 apresentam-se as conclusões deste trabalho.

2. Estado actual dos conhecimentos – Revisão bibliográfica

A erosão do solo consiste numa perda gradual do material que constitui o solo, através de um processo de destacamento e transporte de partículas. Este material é transportado para outros locais, abandonando o campo ou parcela.

A erosão é um processo que tem vindo a ocorrer desde o início da formação da crosta terrestre e que certamente continuará no futuro. A superfície da Terra está em perpétua mudança, com as montanhas a elevarem-se, os vales a tornar-se mais largos e profundos, a linha costeira a avançar aqui e a recuar ali. A face da Terra como a conhecemos hoje não é o resultado de um processo cataclítico, mas de pequenas alterações quase imperceptíveis que tiveram lugar ao longo dos tempos. A erosão do solo é apenas um dos aspectos desta alteração contínua (Hudson, 1995).

A erosão acelerada do solo e a degradação assim induzida são um grave problema global, aceite sem discussão. No entanto a avaliação, de modo fiável e preciso, da extensão, magnitude e taxas da erosão do solo e as suas consequências económicas e ambientais, apresenta grandes dificuldades. Estima-se, em termos de escala mundial, que, devido à erosão e degradação do solo, se percam completamente para a produção agrícola cerca de 20 milhões de ha/ano ou que, pelo menos, deixem de ser economicamente rentáveis (UNEP, 1991; UNEP, 1992 *cit in* Tomás, 1997).

A erosão do solo é um dos principais factores de degradação do solo e afecta várias funções do solo, tais como a sua capacidade de reter e filtrar poluentes, o seu papel no ciclo hidrológico e no ciclo do azoto, e a sua capacidade de fornecer habitat e suportar a biodiversidade. As actividades humanas contribuíram para a degradação de 2000 milhões de ha, o equivalente a 15% da superfície de terra emersas. Entre os principais tipos de degradação do solo encontra-se a erosão hídrica (56%) e erosão eólica (28%) (UNEP, 2002)

2.1. Relação entre a erosão do solo e a precipitação.

A erosão do solo é definida como um processo de desagregação, transporte e deposição de materiais do solo por agentes erosivos (Ellison, 1947 *cit in* FAO, 1993). Os agentes erosivos dinâmicos, no caso da erosão hídrica são a precipitação e o escoamento superficial.

A precipitação tem efeito através do impacto das gotas de precipitação sobre a superfície do solo, e pelo próprio colapso dos agregados do solo, que provocam desagregação das partículas primárias; provoca também transporte de partículas por aspersão e proporciona energia à água do escoamento superficial (Ellison, 1947).

Como consequência da desagregação produz-se uma crosta superficial que diminui substancialmente a capacidade de infiltração do solo (Duley, 1987; Ellison, 1947). No momento em que a intensidade da precipitação passa a ser maior que a taxa de infiltração de água no solo, verifica-se a retenção e detenção superficial da água e, posteriormente, o escoamento superficial da água que não infiltra (Meyer, 1976). Considerando o escoamento superficial como o principal agente de transporte, Ellison (1947) classificou o escoamento em duas fases: o fluxo entre os sulcos e o fluxo dentro dos sulcos. O fluxo entre os sulcos é responsável pelo transporte de sedimentos desde as áreas entre os sulcos para dentro dos sulcos. A sua capacidade de transporte depende directamente das características das gotas de precipitação que, produzindo turbulência na lâmina de água, determinam a quantidade de solo que ficará em suspensão (FAO, 1993). O fluxo nos sulcos, canalizado ou concentrado, tem a capacidade de transportar o material recebido do fluxo entre os sulcos, assim como de produzir a separação de material do solo dentro do sulco (FAO, 1993).

Segundo Meyer (1976) estes processos são selectivos no que respeita ao transporte de sedimentos. O material erodido dentro dos sulcos geralmente é maior e menos afectado pela acção selectiva, do que sucede com o sedimento entre os sulcos.

Os processos erosivos apresentam um impacto negativo que resulta numa degradação progressiva do solo. Trata-se normalmente de um processo relativamente lento, embora seja as mais das vezes acelerado pelo Homem, mas recorrente, e irreversível a curto ou médio prazo (Cortez, 1987).

Deste modo é usual definir, “erosão natural” ou “erosão geológica”, a que se manifesta como um processo natural normalmente lento, actuando sobre a superfície terrestre no seu estado natural, fazendo ressaltar o equilíbrio existente entre a remoção e formação de novos solos, que se entende como o processo de pedogénese, e a “erosão acelerada” ou “erosão antrópica” que é caracterizada pelo rompimento do equilíbrio natural, sendo este perturbado principalmente pelas actividades do Homem, que retira o coberto vegetal que protege o solo para o cultivo da terra (Hudson, 1995). Este tipo de perturbações poderá remover em poucos anos, camadas de solo fértil, que terão levado séculos para se formarem.

A erosão do solo é influenciada por um conjunto de quatro variáveis naturais: clima, vegetação, topografia e o próprio solo. O clima actua predominantemente através dos agentes erosivos: chuva, vento, amplitudes térmicas, neve e glaciares. De todos estes agentes, os mais importantes são a chuva, o escoamento e o vento, e é em função deles que se definem os dois principais processos de erosão acelerada: a erosão hídrica e a erosão eólica.

A erosão eólica surge com maior intensidade em solos mal estruturados, secos e sem coberto vegetal, ficando totalmente expostos à acção erosiva do vento. Estas características favoráveis à erosão eólica encontram-se em regiões com clima árido e semi-árido e nas zonas costeiras. Contudo, as condições em Portugal são as mais favoráveis à ocorrência de erosão hídrica.

A importância de estudar este fenómeno fundamenta-se no facto de o solo ser um recurso não renovável à escala de tempo da vida humana, pois quando sujeito à erosão acelerada, tenderá a caminhar rapidamente para a esterilidade do solo, devido à perda dos seus horizontes superficiais, férteis e produtivos, diminuindo a capacidade produtiva do solo. Assim, compreende-se a necessidade de prever as perdas de solo, com o conhecimento das características da região, tais como, o clima, relevo e vegetação em conjunto com operações culturais, de modo que se possam tomar decisões, a fim de manter o nível de erosão abaixo dos limites de tolerância aceites, contribuindo, portanto, para a conservação do solo.

No entanto, a erosão é essencial para a formação de solos de aluvião e a longo prazo de rochas sedimentares (Hudson, 1995).

Por outro lado, a sedimentação destes materiais transportados em grandes quantidades (o que não aconteceria durante um processo de erosão natural) poderá provocar igualmente graves problemas devido ao assoreamento de cursos de água e albufeiras, para já não falar na possibilidade de soterramento de solos férteis a jusante (Cortez, 1987).

Existe uma grande dificuldade em definir o limite entre erosão geológica, um fenómeno natural que devemos aceitar, e a erosão acelerada, originada pelas actividades humanas. Uma vez que é difícil, se não mesmo impossível, estabelecer este limite, será possível especificar os limites de erosão que poderá ser aceite ou tolerável? A resposta habitual é que o objectivo da conservação do solo é assegurar que o seu uso possa ser sustentado indefinidamente. Aceita-se que se atinge este objectivo quando a perda de solo que se verifica é inferior à capacidade de regeneração do solo, embora seja difícil avaliar este valor. (Hudson, 1995). A melhor estimativa que existe é que em condições em que não existe

perturbação da superfície do solo pela actividade humana, demora cerca de 300 a 1000 anos a formar 25 mm de solo, mas com a perturbação causada pelo arejamento e lixiviação em solos agrícolas, este valor pode ser reduzido para cerca de 100 anos (Pimentel *et al.*, 1976 *cit in* Hudson, 1995). Nos Estados Unidos aceita-se que o valor designado como “*perda de solo tolerável*” é de 11,2 t/h.ano (5 t/acre.ano) (Hudson, 1995).

A erosão é um processo degenerativo que altera as propriedades do solo. Consiste num processo mecânico que age tanto na superfície como em profundidade, tornando-se crítica quando é acelerada pela acção do homem.

Os prejuízos com a erosão são expressivos em todo o mundo. Nos Estados Unidos, estes prejuízos são estimados em 6 mil milhões de dólares anualmente, resultantes não só das perdas de solo e nutrientes como também devido ao assoreamento de rios, lagos e represas. Estima-se que as áreas afectadas por erosão acelerada por influência humana sejam de 12% na América do Norte, 18% na América do Sul, 19% na Austrália, 26% na Europa, 27% na África e 31% na Ásia (Lal, 1994). As perdas de solo são elevadas no sul de Europa, mas também no norte da Europa a erosão hídrica do solo está se gradualmente a tornar um problema. Na Europa, cerca de 114 milhões de ha, ou seja, 17% da área total são afectados por erosão, sendo que aproximadamente 24 milhões de ha ou 4% da área total apresentam erosão extrema ou elevada e 70 milhões ou 11% são afectados por erosão moderada (EEA, 2003). A região mediterrânea é particularmente susceptível à erosão. Isto deve-se ao facto de esta região estar sujeita a longos períodos secos seguidos por chuvas intensas, em declives acentuados e com pouca cobertura vegetal (EEA, 2003).

Embora a região mediterrânea seja historicamente a mais gravemente afectada pela erosão – os primeiros relatos da erosão do solo no Mediterrâneo remontam a 3 000 anos atrás – há cada vez mais indícios de que se está a verificar uma erosão significativa noutras partes da Europa (p. ex. Áustria, República Checa e zona de *loesse* do norte da França e da Bélgica). A erosão do solo pode ser assim considerada, com diferentes níveis de gravidade, como um problema à escala da União Europeia (CCE, 2002).

Segundo Boardman e Favis-Mortlock (2001), a erosão hídrica é o maior problema ambiental que o nosso planeta tem enfrentado na actualidade. Estes autores afirmam que, durante o século XXI, a erosão será influenciada pelas mudanças no uso do solo e por mudanças climáticas provocadas pela acção do homem. As mudanças climáticas causam efeitos directos e indirectos na erosão do solo. Os efeitos directos são relativos ao aumento da erosão hídrica em consequência do aumento da precipitação total e alterações na sua

distribuição. Os efeitos indirectos são relacionados com o aumento de CO₂ na atmosfera e sua influência na produção agrícola, uma vez que o dióxido de carbono actua como um fertilizante, podendo assim aumentar a produção. É provável que este aumento de efeito fertilizante diminua os períodos em que a erosão pode ocorrer em culturas cerealíferas, reduzindo deste modo a erosão.

A erosão hídrica do solo é um fenómeno constituído por três fases: o destacamento das partículas individuais ou transportáveis do solo e o seu transporte por agentes erosivos. Quando não existe energia suficiente para o transporte das partículas de solo ocorre uma terceira fase: a deposição (Morgan, 1995).

As gotas de chuva ao atingirem o solo provocam a desagregação e o destacamento do solo. De seguida, a água que se acumulou à superfície do solo preenche as depressões do relevo do terreno e, quando a retenção superficial ou a capacidade de infiltração do solo é excedida ou o nível freático atinge a superfície do solo, inicia-se o escoamento superficial (Tomás, 1997). Quando a superfície do solo fica coberta por uma fina camada de água dá origem ao que designamos fluxo laminar (Julien e Simons, 1985)

Na realidade o escoamento superficial raramente tem a forma de uma toalha de água de altura uniforme mas sim uma textura de certa irregularidade com zonas de encharcamento e pequenos canais onde se concentra o escoamento.

Com o aumento do volume do escoamento superficial a água concentra-se e provoca a criação de micro-canais ou sulcos, que se desenvolvem gradualmente até atingirem canais de grandes dimensões, que constituem a rede de drenagem da bacia hidrográfica. Os sulcos formam-se à medida que o escoamento superficial se vai tornando concentrado, a partir de micro-canais e zonas de escoamento preferencial (Julien e Simons, 1985). O destacamento só ocorre quando a tensão de arrastamento do escoamento excede a tensão crítica do solo e a carga de sedimentos no escoamento é inferior à capacidade de transporte de sedimento (Lei *et al.*, 2004).

Em geral, numa bacia hidrográfica estes processos vão-se desenvolvendo, até que a rede hidrográfica seja alcançada, passando então o escoamento a ser canalizado em leitos naturais.

Os agentes de destacamento das partículas do solo são a desagregação pelo impacto das gotas de chuva, que conduz a uma dispersão geralmente designada por salpico e a desagregação pelo escoamento superficial. Os agentes de transporte compreendem os que contribuem para remover uma camada superficial fina e relativamente uniforme de solo no

escoamento não canalizado, e os que desenvolvem processos idênticos, mas mais intensos, em canais. O salpico, o escoamento na forma de toalha líquida (escoamento superficial), e o vento são agentes de destacamento. O escoamento em sulcos, ravinas e canais é um agente de transporte (Tomás, 1992).

A erosão hídrica do solo é um processo descontínuo e que se verifica essencialmente em certos períodos críticos de ocorrência de precipitação. Por exemplo, (Figueiredo *et al.*, 1998) verificaram que, na região do Douro em Portugal, num período de 10 anos de observações, um só evento erosivo, produziu 23% da erosão verificada. Os dois maiores eventos erosivos em conjunto contribuíram para 45% da erosão total, assinalando ainda que estes dois eventos ocorreram com um intervalo de apenas uma semana.

A erosão do solo é um processo de trabalho, no sentido físico do termo. A energia é utilizada na destruição de agregados, na sua dispersão pelo ar, na produção de turbulência do escoamento e no transporte de partículas de solo (Hudson, 1995).

A energia cinética de que vêm animadas as gotas de chuva é dissipada ao atingirem o solo provocando o colapso de agregados de partículas num processo físico que se pode designar de desagregação por impacto. Ghadiri e Payne (1986) distinguem três fases nesse processo:

1. o impacto propriamente dito ou o momento de contacto da gota com o solo que origina um esforço de compressão sobre a superfície;
2. o salpico, que consiste na formação de uma coroa de rotura da gota e na projecção de água e de partículas de solo, devido a um esforço de corte radial dirigido do centro para a periferia;
3. a formação de uma pequena cratera ou cavidade com o fundo convexo, ao centro.

A remoção e projecção do material sólido são devidas principalmente à elevada velocidade inicial atingida pelo escoamento radial que actua no fundo e nos lados da cavidade e na saliência circular (Al-Durrah e Bradford, 1982).

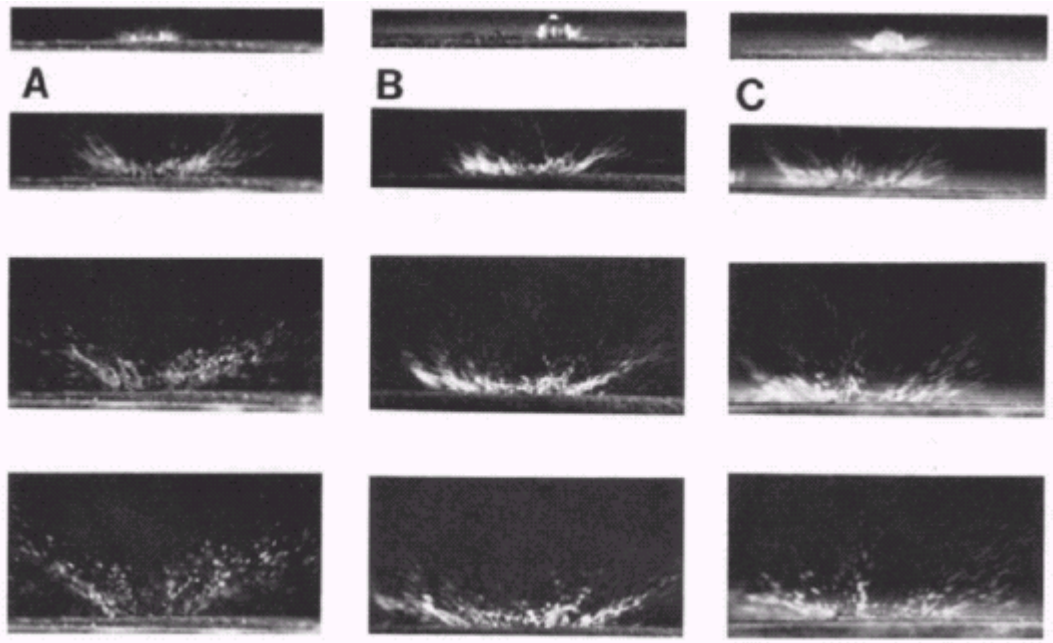


Fig. 2-1 Fotografias de alta velocidade do impacto de uma gota à superfície do solo. Tensão de atrito à superfície do solo: (A) $\tau = 2.6$ kPa; (B) $\tau = 7.1$ kPa; (C) $\tau = 20.9$ kPa (Al-Durrah e Bradford, 1982)

O estudo do efeito conjunto da precipitação e do escoamento superficial sobre a perda de solo foi efectuado por Ferreira e Singer (1985) e Ferreira *et al.*, (1985).

Ferreira *et al.*, (1985) concluem que os efeitos da camada de água sobre o solo são:

- i) servir de meio onde o solo pode ser colocado em suspensão e transportado; e,
- ii) permitir que o campo de velocidades se inverta, aquando da máxima abertura da cratera de impacto, provocando assim o arrastamento e suspensão de partículas de solo.

Assim, o impacto da precipitação sobre o solo seco provoca a desagregação dos agregados de solo e a compactação do solo. O transporte será mínimo porque é devido apenas às partículas projectadas por salpico. Se se formar uma camada de água sobre o solo e a precipitação continuar ocorre o destacamento das partículas de solo e o seu transporte ocorre a uma taxa superior do que para a precipitação ou escoamento superficial, actuando separadamente.

O solo é também destacado devido a outros processos, quer mecânicos quer químicos. O humedecimento rápido da superfície do solo, em particular com solo seco, provoca a progressiva compressão do ar aprisionado no interior de agregados conduzindo normalmente à abertura de pequenas fissuras, superfícies de fractura ou mesmo

fragmentação completa. Da interação solo-água resulta ainda um processo de desagregação química, que consiste na desfloculação de colóides, principalmente dos minerais de argila (Tomás, 1992).

As partículas de solo, destacadas mas não removidas pelo escoamento superficial, ficam sujeitas a um processo de reorganização estrutural, constituindo o que se designa habitualmente por crosta do solo. A ocorrência de uma crosta mesmo de pequena espessura na superfície do solo é um fenómeno frequente em muitos solos. O seu desenvolvimento tende a reduzir a permeabilidade do solo e o seu arejamento no estado húmido. Tende ainda a aumentar o escoamento superficial e a reduzir a erosão por salpico.

O desenvolvimento da crosta no decurso do fenómeno erosivo é um processo evolutivo que depende basicamente das características e humidade inicial do solo e do acontecimento pluviométrico. O desenvolvimento de crosta é devido ao impacto da gota de água e, em climas frios, a ciclos de congelamento-descongelamento. O impacto da gota de água desfaz os agregados, faz deslocar a argila ligeiramente para baixo deixando uma concentração de partículas de limo e areia na superfície. A análise da formação de crosta implica considerar um grande número de propriedades do solo, à superfície, que têm de ser encaradas de forma dinâmica, pois as características da crosta em cada momento determinam a infiltração, o escoamento superficial e a perda de solo subsequente.

O escoamento superficial apresenta diferentes propriedades hidráulicas consoante se observa o escoamento em toalha, em sulcos e em ravinas, devido às diferentes magnitudes das forças de inércia e de viscosidade e à turbulência do escoamento. Para satisfazer estes diferentes aspectos as características hidráulicas do escoamento podem ser caracterizadas pelos números de Reynolds e de Froude.

Muitos dos estudos de erosão de solos não distinguem os efeitos de erosão por escoamento laminar e por sulcos. O escoamento superficial e o escoamento em sulcos, são dois fenómenos com características próprias e que devem ser analisados separadamente.

O escoamento laminar e em sulcos (ou em ravinas) tem propriedades hidráulicas diferentes, que dependem da grandeza relativa das forças de inércia e da viscosidade. A relação entre estes dois tipos de forças define o número de Reynolds. Quando as forças de inércia são muito superiores à viscosidade, o que acontece geralmente nos sulcos e ravinas, o número de Reynolds é elevado e o escoamento é turbulento. No caso do escoamento laminar, as forças de viscosidade ultrapassam as forças de inércia e o fluxo é laminar (Julien e Simons, 1985).

Outra grande diferença entre o escoamento laminar e o escoamento em sulcos, é a altura do escoamento. Para um determinado tamanho de partícula, o transporte de sedimentos por saltitação e suspensão em escoamento laminar é muito limitado devido à pouca altura de escoamento, o que não se verifica no escoamento em sulcos (Julien e Simons, 1985).

O número de Froude é uma relação adimensional que combina a relação entre as forças de inércia e as forças de gravidade. Num sulco ou numa ravina o escoamento é rápido, crítico ou lento se o número de Froude for inferior, igual ou superior à unidade, respectivamente.

Os sulcos formam-se de modo descontínuo e a montante da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica. Eventualmente, um sulco pode desenvolver-se e originar uma linha de água de carácter permanente ou semi-permanente, passando deste modo a fazer parte da rede de drenagem.

Os sulcos formam-se à medida que o escoamento superficial se vai tornando canalizado, a partir de micro-canais ou zonas de escoamento preferencial, progredindo de montante para jusante, controlados basicamente pela tensão de atrito do escoamento, que provoca o destacamento do material e a incisão do sulco. Pode também acontecer que um sulco se forme a partir de uma incisão na base da encosta, desenvolvendo-se por regressão de jusante para montante, sendo neste caso controlado principalmente pela coesão do solo e pela dissipação da energia do escoamento.

Os dois processos de formação de sulcos referidos podem existir em simultâneo num mesmo sulco. O valor global da erosão localizada em sulcos é devido principalmente ao transporte do material que atinge os sulcos por salpico ou pelo escoamento superficial, mas também pelo arrastamento do material do fundo e taludes do próprio sulco (Morgan, 1995).

De modo geral é referido na bibliografia consultada que a erosão é um processo limitado pelo destacamento das partículas de solo e que o transporte sólido por escoamento superficial é limitado pela capacidade de transporte deste que por sua vez limita a erosão. Nos processos de erosão verifica-se um comportamento selectivo relativamente à granulometria transportada, resultando que se observam diferentes curvas granulométricas do material erodido para o mesmo solo, consoante os processos ocorrem em áreas de erosão ou de deposição (Morgan, 1995).

2.2. Modelação matemática

Os modelos podem ser definidos como “uma representação simplificada da natureza de uma parte do mundo físico” (Batchelor, 1994). Os modelos matemáticos descrevem a realidade através de relações matemáticas que tanto podem ser uma equação empírica (modelos empíricos) como um conjunto de equações de base física (modelos fisicamente baseados). Todos os tipos de modelos contêm simplificações e abstracções. Podem ser utilizados para comparar o impacto ambiental de processos alternativos.

Basicamente, a modelação consiste em traduzir por uma série de equações o que acontece na natureza a partir de um modelo conceptual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real. O objectivo desta modelação é compreender melhor o sistema e prever situações futuras, podendo também ser utilizado para reproduzir o passado e para orientar as decisões.

Os procedimentos para a construção do modelo matemático que represente um sistema real são (Machado, 2002):

- desenvolvimento do modelo conceptual, que envolve todo o levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real;
- selecção da linguagem informática a utilizar segundo as necessidades e os dados existentes;
- tradução do modelo conceptual para a linguagem informática;
- construção das diversas bases de dados para a introdução das informações no programa seleccionado;
- calibração do modelo construído de forma a diminuir as incertezas inerentes a uma representação simplificada de um sistema real, em geral, complexo.

Os modelos integram o conhecimento existente em princípios lógicos de procedimentos e de relações (Moore e Gallant, 1991), e podem ser usados para estabelecer mais conhecimentos sobre os sistemas ambientais, tanto como um meio de testar hipóteses, como permitir um método para prever a utilização desses ecossistemas (Grayson *et al.*, 1992).

Para a utilização de modelos é necessário o conhecimento das suas limitações e dos problemas relativos à sua utilização.

Uma importante vantagem da utilização de simulação é o seu baixo custo após calibração e validação. Na maioria das aplicações, o custo de executar um programa informático é muitas vezes menor do que o correspondente custo relativo à investigação experimental.

2.3. Modelos de previsão da erosão hídrica.

A monitorização e medição *in situ* da erosão são processos morosos e dispendiosos. Os eventos erosivos apresentam uma elevada variabilidade, o que implica a obtenção de séries temporais extensas para um dado local. Por estes motivos, os modelos de erosão são, na maior parte dos casos, a única ferramenta razoável para a inventariação e avaliação da erosão.

Durante as últimas décadas foram desenvolvidos vários modelos de previsão de erosão para prever o impacto de perda de solo sobre a produtividade agrícola.

Segundo Lane *et al.*, (1988) os modelos podem dividir-se em três tipos principais:

Modelos empíricos: baseiam-se em observações possuindo uma forte base estatística, a partir da qual foram definidas relações entre variáveis do meio e a perda de solo e/ou a produção de sedimentos.

Modelos fisicamente baseados: descrevem matematicamente os processos de destacamento transporte e deposição através da resolução das equações correspondentes a esses processos. No entanto, actualmente ainda não existem modelos fisicamente baseados “puros” uma vez que ainda englobam componentes empíricos.

Modelos conceptuais: situam-se entre os modelos empíricos e os fisicamente baseados e são baseados em formas globais de equação de continuidade para a água e sedimento e em outras relações empíricas. Apesar de muito simplificados, tentam modelar a produção de sedimentos, ou os seus componentes, de uma forma lógica.

Segundo Nearing e Beasley (1995) *cit in* Tomás (1997) o melhor indicador da diferença entre modelos empíricos e fisicamente baseados é a utilização da equação de continuidade para o fluxo de sedimentos.

Na modelação dos processos, torna-se necessário escolher quais os componentes a modelar, uma vez que não é possível modelar todos os efeitos ou processos. O grau de complexidade empregue na modelação também tem de ser adequado aos objectivos do modelo. De modo geral, estabelece-se um compromisso entre a melhor descrição dos

processos e uma parameterização dos modelos. Todas as equações utilizadas para descrever os processos incluem coeficientes empíricos. Acontece com frequência existirem descrições mais elaboradas para um dado processo, mas não existirem os dados necessários para parametrizar as equações mais detalhadas (Nearing e Beasley, 1995 *cit in* Tomás, 1997).

2.3.1. Modelos empíricos

Um dos modelos mais antigos é a Equação Universal de Perda de Solo – USLE¹ (Wischmeier e Smith, 1965; Wischmeier e Smith, 1978) e prosseguiu com outros modelos empíricos desenvolvidos a partir dos conceitos da USLE (Equação Universal de Perda de Solo Revista - RUSLE²), (Renard *et al.*, 1996) Equação Universal de Perda de Solo Modificada - MUSLE³). Estes modelos empíricos são, até agora, utilizados em todo o mundo devido à sua relativa simplicidade e pequena quantidade de dados a introduzir quando comparados com outros modelos de previsão de erosão mais complexos.

Os modelos USLE, RUSLE e MUSLE podem prever erosão hídrica do solo à escala do talhão experimental (o talhão experimental standard foi definido por Wischmeier e Smith (1978) como um terreno com 22,1 m de comprimento e 9% de declive).

Devido às características empíricas destes modelos, há alguns inconvenientes na sua utilização. Alguns destes inconvenientes são a necessidade de medir, para cada situação específica, uma única cultura ou parâmetro de solo que comporta outros parâmetros implícitos. Isto significa que não podemos isolar o efeito de cada parâmetro e o processo que desencadeia erosão não pode ser adequadamente explicado.

2.3.2. Modelos fisicamente baseados

São modelos baseados em modelos físicos complexos que têm por suporte princípios físicos estabelecidos.

2.3.2.1. WEPP

O modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) é um modelo de simulação diária que prevê a erosão e a produção de sedimentos a diferentes escalas (Flanagan e Nearing, 1995). O objectivo deste modelo é o desenvolvimento de uma nova tecnologia de previsão de erosão de solo, baseada no conhecimento actual do processo erosivo, e a tecnologia deve

¹ USLE: Universal Soil Loss Equation

² RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

ser aplicada ao mesmo nível da tecnologia habitual da USLE, podendo para além disso ser aplicada a mais larga escala e possibilidades de uso do solo (Hudson, 1995).

O WEPP é um modelo de previsão da erosão hídrica, distribuído nos parâmetros e de simulação contínua. Os parâmetros de entrada incluem alturas e intensidades de precipitação, textura do solo, parâmetros de desenvolvimento das plantas, parâmetros de decomposição de resíduos, efeito das práticas agrícolas nas propriedades do solo e nas quantidades de resíduos, forma, declive e orientação das encostas e parâmetros de erodibilidade dos solos. O modelo efectua a simulação diariamente e, consoante ocorra precipitação pode, ou não, verificar-se escoamento. Caso se preveja escoamento, o modelo determina a erosão específica, deposição, produção de sedimentos e o enriquecimento dos sedimentos. Estas variáveis são acumuladas, determinando-se a respectiva média no final do período de simulação. O modelo actualiza diariamente os parâmetros mais importantes incluindo nomeadamente a rugosidade do solo, quantidade de resíduos na superfície do solo, altura das plantas, coberto vegetal e humidade no solo. O processo de simulação contínua liberta o utilizador de fornecer ao modelo a variação temporal de parâmetros importantes, como sejam a cobertura vegetal (Flanagan e Livingston, 1995).

O modelo pode ser utilizado em três versões: versão encosta, versão bacia hidrográfica e versão grelha. A versão encosta é um substituto da Equação Universal de Perda de Solo, mas pode ser aplicado a encostas, solos, culturas e utilização do solo não uniformes. Pode prever tanto a perda de solo como a deposição ao longo da encosta. A versão de bacia hidrográfica pode ser aplicada a bacias hidrográficas de até cerca de 300 ha, e calcula também o destacamento, transporte e deposição de sedimentos nas encostas da bacia hidrográfica. Esta versão pode também calcular erosão laminar, em sulcos e ravinas em terrenos com terraços. As aplicações em grelha consistem em dividir a bacia hidrográfica numa quadrícula de células quadradas. São aplicadas as rotinas da versão encosta a cada célula e então a água e os sedimentos são encaminhados de célula para célula até à saída da bacia hidrográfica. Esta versão permite a simulação da rega por *center pivot* e ligações a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (NSERL, 2004)

As fases do processo erosivo consideradas são o destacamento, transporte e deposição considerando separadamente a erosão nos sulcos e entre os sulcos. O destacamento na erosão nos sulcos é estimado a partir de equações lineares de destacamento nos sulcos. Para o transporte de sedimentos em sulcos e cursos de água é utilizada a equação de Yalin.

³ MUSLE: Modified Universal Soil Loss Equation

Os processos hidráulicos incluem clima, infiltração e a onda cinemática do escoamento.

Os processos de crescimento das plantas e os resíduos estão relacionados com o crescimento e senescência tanto acima do solo como por baixo dele.

Os processos de uso da água utilizam a informação de componentes do clima, crescimento das plantas e infiltração para fazer a estimativa da evapotranspiração potencial real diária.

Os processos hidráulicos usam dados do escoamento superficial e rugosidade para calcular as forças de destacamento nos sulcos.

O componente solo toma em consideração os efeitos das mobilizações, humidade, consolidação e precipitação nas variáveis de solo.

O modelo WEPP exige ficheiros de entrada que incluem topografia do solo, culturas e utilização do solo. Exige também um ficheiro de dados climáticos diários. O módulo CLIGEN (programa simulador de clima) simula precipitação, temperatura, vento, radiação solar e pode desagregar estocasticamente a precipitação em distribuição de intensidade ao longo do dia.

De acordo com Flanagan e Nearing (1995), as principais vantagens do modelo WEPP incluem a capacidade de estimar as distribuições espaciais e temporais de perda de solo (perda de solo total para o encosta como um todo ou para cada ponto do encosta que podem ser estimadas como média diária, mensal ou anual).

Os processos considerados na versão encosta incluem erosão laminar e em sulcos, transporte e deposição de sedimentos, infiltração, consolidação do solo, efeitos do resíduo e do copado do coberto no destacamento e na infiltração, formação de crosta superficial, hidráulica de sulcos, escoamento superficial, crescimento das plantas, decomposição dos resíduos, percolação, evaporação, transpiração, degelo, efeitos do congelamento de solos na infiltração e erodibilidade, clima, efeitos da mobilização nas propriedades do solo, efeitos da rugosidade aleatória do solo e efeitos da mobilização incluindo a sobreposição potencial dos sulcos de lavoura (Flanagan e Nearing, 1995).

O modelo WEPP produz muitos tipos diferentes de resultados, em várias quantidades, dependendo das necessidades do utilizador. Os resultados mais básicos contêm informação sumária de escoamento e perda de solo, que podem ser indicados chuvada a chuvada, mensalmente, para cada ano individualmente, ou uma média anual. Estes resultados incluem escoamento, erosão, produção de sedimentos e enriquecimento de sedimentos em função do tempo, bem como a distribuição espacial de erosão na encosta. O programa

prevê o destacamento ou deposição em cada um de pelo menos 100 pontos ao longo da encosta, e o somatório da totalidade destes valores é dividido pelo número de anos na simulação para dar o destacamento ou deposição médio anual em cada ponto. Em alguns pontos ao longo da encosta pode verificar-se destacamento numa chuvada e deposição noutra. O ficheiro de resultados é claramente dividido em duas secções, uma para efeitos da erosão na encosta e outra para efeitos da erosão a jusante da encosta. Os efeitos no local incluem a perda de solo média anual nos locais onde se verifica perda de solo. Este valor é o mais análogo às previsões da USLE, e são as mais relacionadas com a perda de produção no local. Também se inclui uma tabela de destacamento/deposição em pelo menos 100 pontos ao longo da encosta (Flanagan e Livingston, 1995)

Pode ser gerado um sumário de informação para cada evento em que se origine escoamento (precipitação, escoamento verificado, perda de solo, etc.). Para além disso, os resultados podem ser apresentados de forma gráfica, podendo o utilizador escolher várias formas de representação gráfica.

Outros ficheiros de resultados produzidos incluem dados detalhados de solo, plantas, balanço hídrico, produção pelas culturas, processos de Inverno e pousio. Frequentemente estes ficheiros serão criados e analisados para tentar determinar as razões por detrás das respostas do modelo WEPP. Os dados de todos os ficheiros podem ser importados para folha de cálculo, para posterior tratamento estatístico ou apresentação gráfica (Flanagan e Livingston, 1995).

Com um modelo de previsão de erosão de simulação contínua, evento a evento, é possível simular longas séries de previsão de erosão utilizando dados representativos de precipitação e temperatura, características de solo, topografia e manejo do solo. Se o modelo prever com exactidão as distribuições diárias de perda de solo, podem ser calculadas as taxas de erosão a longo prazo e a frequência de vários graus de erosão (Baffaut *et al.*, 1998).

2.3.2.2. CREAMS

(Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)

O modelo CREAMS é um modelo à escala da parcela capaz de prever escoamento, erosão, e transporte químico em sistemas agrícolas. É aplicável ao nível da parcela agrícola. O modelo CREAMS pode ser utilizado em chuvadas individuais mas também pode prever médias a longo prazo (2-50 anos). Tem sido utilizado principalmente para calcular a perda de poluentes de áreas agrícolas, mas a componente de erosão do modelo pode ser

modelada separadamente. Quando utilizado para comparação de práticas alternativas não precisa de ser validado ou calibrado (Hudson, 1995). Para isso o modelo deve ser fisicamente baseado e não requerer calibração para cada aplicação específica, ser simples, fácil de entender com poucos parâmetros e mesmo assim representar o sistema físico com precisão relativa

Os objectivos do modelo são:

- 1) calcular o escoamento, percolação, erosão, e dissolução e adsorção de nutrientes e produtos fitossanitários pela planta e,
- 2) fazer a distinção entre práticas agrícolas.

Processos e Abordagem: este modelo apresenta um componente hidrológico que consiste em duas opções. Quando só estão disponíveis dados de precipitação diários, é utilizado o modelo de curva do SCS⁴ para calcular escoamento superficial. Se estiverem disponíveis dados de precipitação horários ou de períodos de precipitação constante, é utilizado um modelo baseado na infiltração para simular escoamento. O movimento da água pelo perfil do solo é modelado usando uma aproximação simples, considerando-se que ocorre infiltração quando uma camada excede a capacidade de campo. O componente de erosão mantém elementos da USLE, mas inclui capacidade de transporte de sedimento por inundação. O sub-componente de nutrientes do modelo CREAMS tem um componente de azoto que considera mineralização, nitrificação, e processos de desnitrificação. São calculadas a absorção de azoto pela planta e a lixiviação de nitratos por percolação para fora da zona radical. Além disso, o azoto e o fósforo são separados do componente enriquecimento em nutrientes para calcular a porção dos dois nutrientes transportada pelo sedimento. O componente produtos fitossanitários considera interceptação foliar, degradação, e lavagem, adsorção, desorção, e degradação no solo (Gabele, 1997)

Actualmente este modelo é utilizado principalmente como componente de outros modelos como o WEPP e o EPIC.

2.3.2.3. EPIC

(Erosion-Productivity Impact Calculator)

O EPIC é um modelo de simulação contínua que pode ser utilizado para determinar o efeito de estratégias de utilização do solo na produção agrícola e nos recursos solo e água

⁴ Soil Conservation Service

(Williams, 1998). A bacia hidrográfica considerada pelo EPIC é geralmente uma parcela de até 100 ha em que se assume que a utilização do solo, solo, e condições meteorológicas são homogêneas. Os principais componentes do modelo são a simulação climática, hidrologia, erosão sedimentação, ciclos de nutrientes, destino dos pesticidas, crescimento das plantas, temperatura do solo, mobilização do solo, economia e controlo do ambiente das plantas.

2.3.2.4. AGNPS

(Agricultural Non-Point Source Pollution Model) (Young *et al.*, 1989)

Trata-se de um modelo que funciona evento a evento que simula escoamento superficial, produção de sedimentos, e transporte de nutrientes principalmente de bacias hidrográficas de utilização agrícola. Os nutrientes considerados incluem azoto (N) e fósforo (P), e outros elementos que podem contribuir para a poluição da água. Os componentes básicos do modelo incluem hidrologia, erosão, produção de sedimentos e transporte de produtos químicos.

Para além disso, o modelo considera fontes pontuais de água, sedimentos, nutrientes, e carência química de oxigénio (CQO) de zonas de produção de animais, e fontes de água.

Os componentes modelo usam equações e metodologias que foram estabelecidas e têm sido utilizadas pelo Soil Conservation Service dos Estados Unidos. O volume de escoamento e o escoamento de ponta é calculado utilizando o método de curva do SCS. A erosão é calculada utilizando uma forma modificada da USLE. O transporte químico é calculado com base nas relações apresentadas no modelo CREAMS.

A unidade básica de cálculo varia de 1 a 16 ha.

2.3.2.5. GUEST

(Griffith University Erosion System Template) (Hairsine e Rose, 1992)

Trata-se de um modelo fisicamente baseado e por eventos. O modelo considera o impacto das gotas de chuva e o escoamento superficial como os agentes erosivos, mas considera que uma parte significativa dos sedimentos, uma vez transportados pelo escoamento superficial, é depositada na superfície do solo, formando uma camada de sedimentos depositados, os quais podem ser novamente removidos pelos mesmos agentes erosivos. A acção dos agentes erosivos é, desse modo, dividida entre o destacamento de partículas de solo não perturbado e o redestacamento de partículas da camada de sedimentos depositados. O escoamento em sulcos baseia-se no conceito da potência do escoamento,

considerando também as camadas de solo original e a formada pelos sedimentos depositados (Tomás, 1997).

2.4. Desenvolvimento de um modelo fisicamente baseado

O desenvolvimento de um modelo fisicamente baseado pode dividir-se em duas fases, conforme esquematizado na Fig. 2-2 (Nearing *et al.*, 1994):

- criação de um protótipo do modelo fisicamente baseado
- avaliação do protótipo.

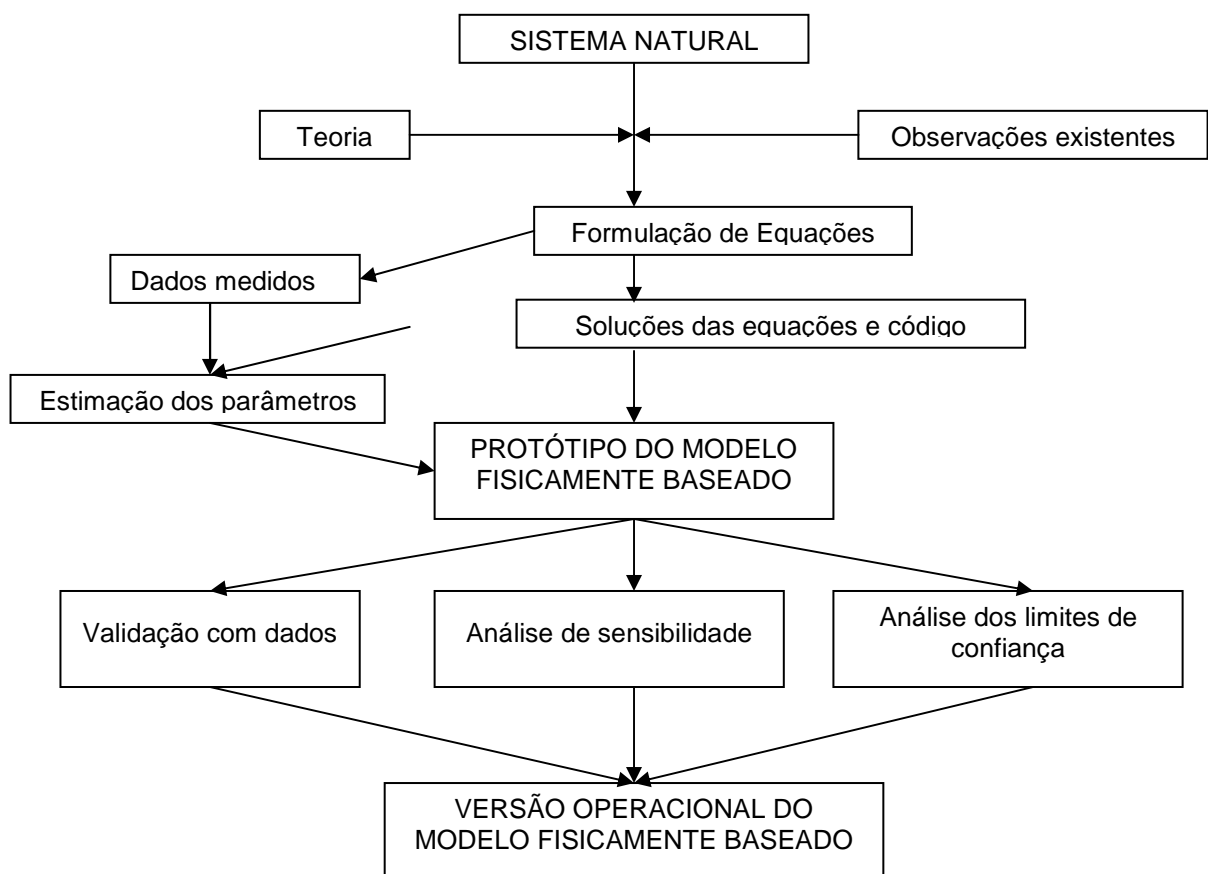


Fig. 2-2 - Metodologia para o desenvolvimento de um modelo fisicamente baseado (adaptado de Nearing *et al.*, (1994) por Tomás (1997)

A criação do modelo inicia-se com a conceptualização do sistema natural, através de um conjunto de equações, que são resolvidas e transcritas para um código ou linguagem de programação, no caso de o modelo ser fisicamente baseado. Em simultâneo, inicia-se o desenvolvimento de uma base de dados para estimação dos parâmetros do modelo. A

estimação dos parâmetros processa-se em duas etapas: identificação e desenvolvimento de técnicas ou equações de estimação. Na primeira etapa, recorre-se à base de dados experimentais, ao código existente e a técnicas de optimização, de modo a obter parâmetros do modelo para os dados medidos. Na segunda etapa, desenvolvem-se metodologias para estimar os parâmetros do modelo em condições ou ambientes não incluídos na base de dados.

A segunda fase do desenvolvimento de um modelo de erosão consiste na sua avaliação, a qual inclui: análise de sensibilidade; análise dos limites de confiança; validação. Os resultados desta fase, desde a sua conceptualização até à estimação dos parâmetros, são utilizados para modificar o modelo, num processo que é, portanto, iterativo, que deve ser prolongado até à satisfação das necessidades dos utilizadores. Obtém-se assim um modelo validado.

No processo de modelação existem quatro fontes principais de erro (Nearing *et al.*, 1994)

- Estabelecimento de relações. Todas as representações matemáticas de processos naturais são aproximadas o que provoca a introdução de erros na descrição do sistema.
- Solução e codificação das equações. Geralmente introduz um erro de pequena importância, excepto quando se utilizam algoritmos com a finalidade de aumentar a eficiência do código, diminuindo o tempo de cálculo.
- Erros nos dados experimentais, devido à grande variação verificada na informação relativa à erosão hídrica.
- Metodologias de estimação dos parâmetros. Os métodos estatísticos desenvolvidos para estimar parâmetros de modelos introduzem erros, muitas vezes de magnitude apreciável, quando aplicados a situações para as quais não foram testados.

2.5. Avaliação de modelos

Um modelo pode ser definido, de acordo com Haan (1988) *cit in* Tomás (1997), como "uma colecção de leis físicas e observações empíricas, descritas sob a forma de equações matemáticas e combinadas de modo a produzir um conjunto de resultados, a partir de um conjunto de condições conhecidas ou hipotéticas".

De modo geral, qualquer modelo pode ser expresso matematicamente na forma:

$$O = f(I,P,t) + \varepsilon$$

Eq. 2.1

em que: O é a matriz dos resultados; f é uma colecção de relações funcionais; I é a matriz de dados; P é um vector de parâmetros de entrada; t é o tempo; e ε é a matriz dos erros. A diferença entre I e P é explicada por Haan do seguinte modo: I representa grandezas que podem variar com o tempo e que podem ser fisicamente medidas, como por exemplo, a precipitação; P representa coeficientes específicos para uma determinada bacia hidrográfica (parâmetros), os quais são estimados a partir de tabelas, ábacos, regressões, observações ou outros meios. O termo mais importante da equação apresentada é a matriz dos erros que traduz a diferença entre os resultados do modelo, O , e os valores observados, Y (Troutman, 1985).

O processo de modelar um sistema físico é constituído pelos seguintes passos:

1. Selecção
2. Calibração e verificação
3. Teste e validação.

Nos últimos anos, tem-se feito um grande esforço no desenvolvimento de modelos fisicamente baseados que forneçam uma descrição realística do ciclo hidrológico (Refsgaard e Knudsen, 1996). Apesar de estes modelos provavelmente serem a melhor ferramenta para tarefas complicadas, vários autores argumentam que a fiabilidade de modelos hidrológicos fisicamente baseados que utilizam parâmetros podem ser questionados (Beldring, 2002). A natureza não linear dos processos envolvidos e a heterogeneidade estrutural dos sistemas naturais tornam improvável que as equações das teorias hidrológicas desenvolvidas em pequenas escalas espaciais e temporais possam ser generalizadas para escala maiores.

Dois aspectos importantes na validação do modelo são (Beldring, 2002):

- Avaliação, isto é, em que medida o comportamento do modelo é coerente com a teoria científica. Esta avaliação está ligada à especificidade do modelo, pelo que nem sempre é fácil de avaliar.
- Avaliação do desempenho operacional, isto é o grau em que as previsões pelo modelo se aproximam de um conjunto correspondente de observações fiáveis, obtidas de uma forma independente.

2.5.1. Selecção

O aumento crescente de modelos de erosão disponíveis tem como consequência o aumento da dificuldade do utilizador em escolher o modelo mais adequado. O processo de selecção de um modelo requer um inventário e avaliação dos modelos disponíveis, adoptando ou adaptando aquele considerado mais adequado em termos de custo e fiabilidade, e calibrando o modelo escolhido para estimar a informação hidráulica e hidrológica de interesse". Apenas em condições de excepção o utilizador tem possibilidade de desenvolver um modelo de raiz, devido ao tempo, recursos e custos que tal tarefa exige.

De modo geral, se o modelo é realmente prático para uma aplicação alargada, é necessário que responda às seguintes questões (Parsons *et al.*, 2001):

Qual é o objectivo inicial do modelo?

Sob que circunstâncias terá um desempenho correcto?

Que precisão podemos esperar nas melhores condições?

Quais as suas limitações?

Estando definidos os critérios de escolha do modelo e respectivas capacidades, esta informação é comparada com as capacidades e características dos modelos disponíveis.

2.5.2. Fontes de erros e incertezas

No processo de modelação coloca-se sempre o problema de analisar e explicar as diferenças entre os resultados observados, Y , e as previsões do modelo, O . Para tal, é necessário quantificar a precisão e validade dos dados de entrada do modelo, valores dos parâmetros, estrutura do modelo e os resultados observados.

As principais fontes de erro são:

- erros dos parâmetros;
- erros de entrada de dados;
- erros estruturais do próprio modelo.

Os erros associados à entrada de dados incluem os erros de amostragem e medição inerente aos dados, quantidade e qualidade dos dados disponíveis para a calibração e validação, e erros associados com o agrupamento de informação, devido a variações temporais e espaciais.

Os erros estruturais dos modelos são, geralmente, os mais difíceis de identificar e os que conduzem a erros mais difíceis de explicar. Resultam do processo de modelação, em que o

sistema natural e a sua complexidade foram simplificados sob a forma de um conjunto de funções e parâmetros utilizados para prever o seu comportamento.

Os erros dos parâmetros são devidos, basicamente, ao processo de calibração e a situações em que é necessário recorrer à sua estimação para condições em que não se conhece o seu valor. Na Fig. 2-3 apresenta-se um diagrama com as fontes principais de erros associados à modelação matemática de um sistema natural.

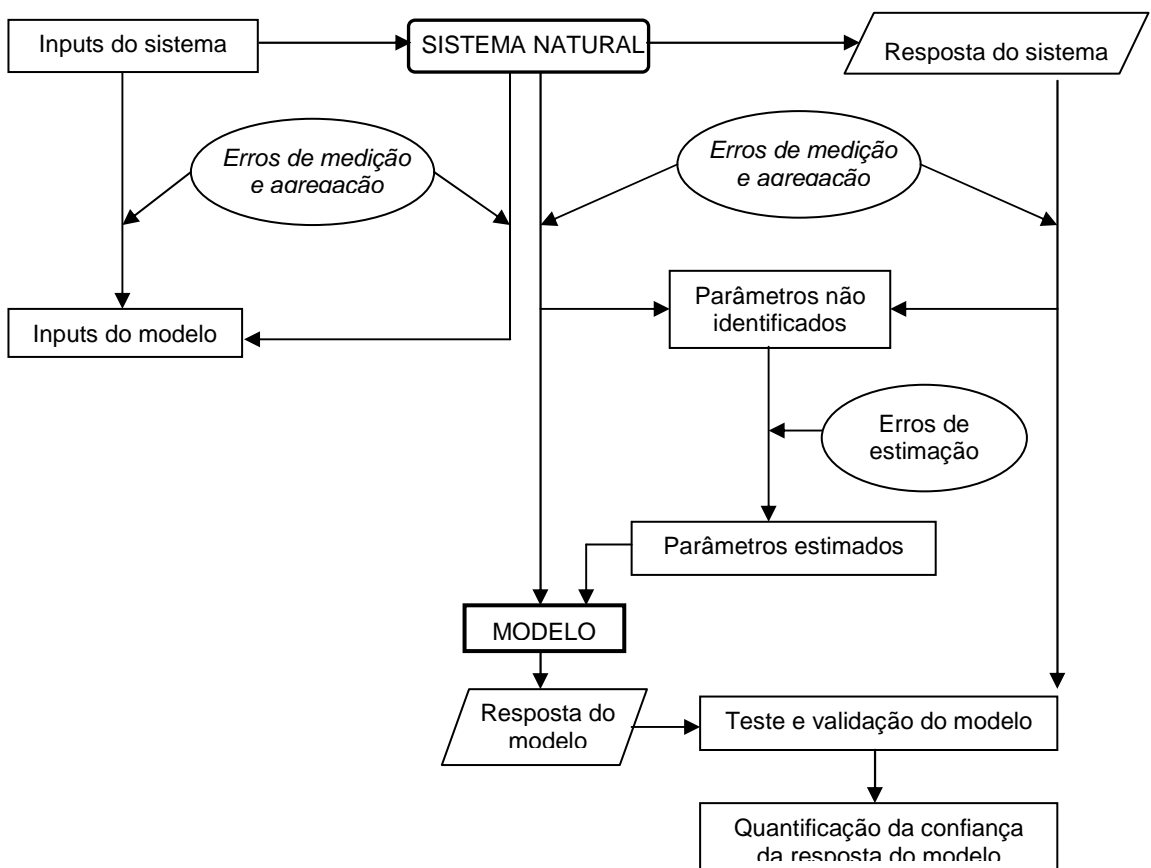


Fig. 2-3 - Diagrama das fontes de erros em modelação hidrológica. Adaptado de Risse e Nearing (1995) por Tomás (1997).

De modo mais detalhado, os erros envolvidos na modelação podem dividir-se em:

a) **Aleatórios e sistemáticos**

Os resultados dos modelos estão sujeitos a erros que podem ser aleatórios ou sistemáticos. Erros aleatórios ocorrem quando o modelo não mostre tendência para estimar por excesso

ou por defeito ao longo de um certo período de tempo. Caso o sinal dos erros tenda a persistir ao longo de um período de tempo, está-se na presença de um erro sistemático (Aitken (1973) *cit in* Tomás (1997)).

b) **Estruturais**

Cada modelo resulta da simplificação de um fenómeno natural: eliminando ou agrupando variáveis temporais e espaciais, desprezando termos considerados pouco significativos e reduzindo a complexidade das equações, assumindo regimes uniformes ou permanentes. Embora não exista uma solução absoluta para este problema, até que seja desenvolvido um modelo perfeito, é fundamental o desenvolvimento e aplicação de métodos de identificação e comparação de erros estruturais, de modo a poder melhorar a estrutura de novos modelos.

c) **Entrada de dados**

Os erros dos dados de entrada dos modelos estão associados às variáveis que são medidas ou estimadas a partir de observações do sistema natural, tais como precipitação, escoamento, características das bacias hidrográficas, condições iniciais, entre outras. O sistema natural recebe informação que varia de modo contínuo no tempo e no espaço. Os modelos recebem informação de modo discreto, muitas vezes de modo acumulado, no tempo e no espaço, de acordo com a sua estrutura e formulação. Deste modo, existe uma diferença entre o valor real de uma dada variável e o valor discreto introduzido no modelo, que pode parecer pontualmente insignificante, mas o seu efeito cumulativo pode introduzir consideráveis erros nos modelos. Erros aleatórios nos dados de entrada conduzem geralmente a erros aleatórios na resposta do modelo. No entanto, os erros sistemáticos podem não ser detectados nas respostas dos modelos pois originam uma incorrecta estimação de parâmetros, geralmente quando da calibração dos modelos, mascarando os erros, o que dificulta a sua detecção. A presença de erros sistemáticos nos dados de entrada pode ser um problema mais grave que os erros aleatórios e justifica a distinção entre os vários tipos de erros (Aitken (1973) *cit in* Tomás (1997)).

d) **Parâmetros**

Os parâmetros são geralmente variáveis usadas nos modelos que não são facilmente medidas, o que torna difícil definir-lhes valores. O processo de determinar parâmetros de modo económico e repetitivo designa-se por calibração. As diferenças entre os valores estimados e o seu valor real no sistema natural designam-se por incerteza dos parâmetros e

são devidas a modelos incompletos, informação incompleta e técnicas de estimação dos parâmetros inadequadas (Haan, 1988).

Por dependerem de observações de variáveis, que apresentam carácter aleatório, as estimativas dos parâmetros apresentam também carácter aleatório e por conseguinte têm um erro ou incerteza associado.

Uma das fontes de erros dos parâmetros resulta da formulação dos modelos: para representarem a realidade, necessitam de simplificar as complexidades do sistema natural, o que resulta que alguns processos não são modelados ou são-no de modo incompleto, obrigando outros processos a compensar essa falha, o que é geralmente conseguido à custa da estimação de parâmetros. Por exemplo, um modelo que não considere a formação de crosta à superfície do solo terá que considerar a correspondente redução da infiltração de outro modo, geralmente através da condutividade hidráulica saturada, K_s . Deste modo o parâmetro K_s é usado para representar um processo para o qual não estava indicado, o que afecta a interpretação e significado físico deste parâmetro e pode levar a más interpretações ou erros, quando se comparam estimativas do parâmetro com medições experimentais em laboratório ou no campo. Por este motivo, a compreensão da incerteza associada à estimação dos parâmetros é essencial na validação de modelos (Risse e Nearing, 1995).

e) **Resultados**

A medição de resultados do sistema natural, como, por exemplo, escoamento e perda de solo de um talhão ou bacia hidrográfica, têm um erro de medição associado, devido ao processo utilizado para medir ou quantificar a variável, designado por erro dos resultados. Este tipo de erro é idêntico aos erros de entrada de dados e podem levar a estimativas enviesadas dos parâmetros ou a conclusões erradas sobre as capacidades do modelo de representar a realidade (Risse e Nearing, 1995).

2.5.3. Verificação e validação

Após a escolha ou desenvolvimento de um modelo e analisados os vários tipos de erros, discute-se o processo de validação.

O processo de validação pode ser definido como sendo "a comparação de resultados do modelo com dados numéricos obtidos de ensaios laboratoriais ou de observações da realidade" (Donigian e Rao, 2004). Uma definição mais elaborada pode ser encontrada em (Beck, 1987): "Dada a estrutura do modelo e estimativas dos parâmetros, a validação é o processo de determinação do comportamento do modelo, para várias condições de entrada

de dados, por comparação da resposta do modelo com diferentes situações observadas". A validação permite confirmar que os passos anteriores na construção de um modelo resultaram numa imagem fiável e representativa do sistema natural.

A verificação consiste apenas na observação do código do modelo, tendo em vista constatar se estão representados os conceitos a modelar e que não existem problemas numéricos quando da obtenção de uma solução, ou seja, que o modelo está correctamente implementado. De modo geral, a verificação antecede a validação, sendo efectuada à medida que o modelo é implementado e construído.

Um dos processos mais importantes na validação de um modelo é a quantificação da comparação entre valores observados e previstos pelo modelo. Embora ainda não esteja disponível uma teoria estatística rigorosa para a determinação do desempenho dos modelos, vários autores propuseram diversas estatísticas para essa quantificação. Não existe nenhuma estatística ou método que individualmente possa prever o desempenho do modelo, sendo necessário recorrer a uma combinação de vários métodos.

De seguida, apresentam-se as ferramentas mais utilizadas, tendo em atenção que a sua aplicação não é geral para todos os modelos, pelo que devem ser escolhidas em conformidade com o fim a que se destinam.

2.5.3.1. Estatísticas descritivas

Um dos requerimentos básicos dos modelos é reproduzirem a média e variância dos valores observados, para um dado período de tempo. Embora seja importante que os valores calculados sejam próximos dos observados, nenhuma destas estatísticas fornece indicação da qualidade dos ajustamentos de observações individuais.

2.5.3.2. Análise dos erros

Os erros ou resíduos definem-se como sendo a diferença entre os valores observados e os previstos pelo modelo (Tomás, 1997).

O erro médio é dado por:

$$\epsilon_m = \frac{\sum_{t=0}^N O_t - Y_t}{N} \quad \text{Eq. 2.2}$$

sendo:

ϵ_m o erro médio;

O_t o valor previsto pelo modelo no intervalo de tempo t ;

Y_t o valor observado no intervalo de tempo t ;

N o número de intervalos de tempo.

O erro relativo é dado por (Tomás, 1992):

$$\epsilon_r = \frac{O_t - Y_t}{Y_t} \quad \text{Eq. 2.3}$$

2.5.3.3. Coeficiente de determinação

Este coeficiente mede o grau de associação entre valores observados e previstos, sendo dado por (Tomás, 1992):

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (Y_t - O_{est})^2}{\sum (Y_t - \bar{Y})^2} \quad \text{Eq. 2.4}$$

sendo:

r^2 o coeficiente de determinação;

Y_t o valor observado;

\bar{Y} a média dos valores observados;

O_t o valor previsto pelo modelo;

O_{est} o valor previsto estimado pela recta de regressão de Y_t sobre O_t .

Nesta equação o numerador representa a variação residual e o denominador a variação inicial. O coeficiente de determinação varia entre zero e a unidade, representando os valores mais elevados uma maior linearidade entre valores observados e previstos. Este coeficiente, embora seja uma boa medida do grau de associação entre valores observados e previstos, não evidencia eventuais enviesamentos existentes entre os valores (Tomás, 1997).

2.5.3.4. Coeficiente de eficiência

Nash e Sutcliffe (1970) introduziram o coeficiente de eficiência, semelhante ao coeficiente de determinação, dado por:

$$CE = 1 - \frac{\sum (Y_t - O_t)^2}{\sum (Y_t - \bar{Y})^2} \quad \text{Eq. 2.5}$$

sendo CE o coeficiente de eficiência e os restantes termos tal como definido anteriormente. Em relação ao coeficiente de determinação, a diferença coloca-se na variação residual, calculada com os valores previstos pelo modelo, em vez de ser com os valores previstos estimados pela recta de regressão de Y_t sobre O_t . Esta diferença é muito importante, pois o coeficiente de eficiência é calculado em relação à recta do ajustamento perfeito, em vez de ser calculado em relação à recta de regressão ajustada aos pontos. No caso dos resultados do modelo serem altamente correlacionados, mas enviesados, o coeficiente de eficiência vem inferior ao coeficiente de determinação.

2.5.3.5. Recta do ajustamento perfeita

Os valores observados na realidade e os previstos pelo modelo devem seguir uma recta do tipo $y = x$, ou seja a ordenada na origem, a , e o declive da recta, b , da recta de regressão entre os valores observados e previstos pelo modelo, devem ser, respectivamente, iguais a zero e à unidade (Tomás, 1997).

Para testar estas duas hipóteses, o erro padrão da ordenada na origem, s_a , e o erro padrão do declive, s_b , são utilizados para calcular as respectivas estatísticas da distribuição t de Student. O intervalo de confiança dos parâmetros da recta de regressão, a e b , são dados por:

$$a \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} S_{oy} \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\bar{Y}}{SSY}} \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$b \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S_{oy}}{S_y \sqrt{N-1}} \quad \text{Eq. 2.7}$$

$$SSY = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad \text{Eq. 2.8}$$

sendo:

$t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ o valor da distribuição t de Student com um nível de significância α ;

S_{oy} a variância de Y sobre O;

S_y a variância de Y;

N o número de observações.

2.5.3.6. Teste de sinais

Este teste permite verificar se uma série de valores contém erros sistemáticos, comparando o número de resíduos positivos e negativos. O teste do Qui-quadrado pode ser utilizado para verificar a significância da sequência de resíduos positivos ou negativos. Caso se verifique a significância do teste, então o modelo introduz erros sistemáticos nos resultados (Aitken, 1973).

2.5.3.7. Distribuições de probabilidade

A comparação das distribuições de probabilidade dos valores observados e previstos é importante pois, se não forem idênticas, então determinadas zonas dos resultados evidenciarão diferenças consistentes, revelando a presença de um erro sistemático. Habitualmente, utiliza-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para calcular as estatísticas de comparação das distribuições (Tomás, 1997).

2.5.3.8. Métodos gráficos

A comparação visual das séries temporais dos valores observados e calculados é um meio rápido e eficaz de analisar resultados. Como exemplo típico, refira-se o caso das séries observadas e calculadas serem idênticas, mas desfasadas no tempo: deste modo, o erro quadrático médio será elevado, mas uma análise visual das séries mostra que apenas existe um desfasamento temporal.

Outras representações gráficas utilizadas são: gráficos do tipo "caixa de bigodes"; gráfico dos resíduos *versus* valores calculados; distribuições de frequências dos valores observados e calculados.

Da apresentação destas ferramentas importa realçar que nenhuma delas poder ser usada individualmente para verificar a qualidade da comparação entre valores observados e calculados pelos modelos. A escolha dos critérios depende dos objectivos a atingir com o modelo e dos parâmetros a calibrar, devendo reduzir-se o número de critérios a um mínimo, geralmente não superior a três, pois critérios adicionais não necessários não contribuem para o resultado final, podendo mesmo conduzir a interpretações erróneas. (Tomás, 1997).

2.5.4. Calibração

Define-se calibração como sendo o processo de estimar os parâmetros de entrada de um modelo, dentro de um determinado intervalo, até que as diferenças entre os valores observados e previstos sejam verificadas por um critério de convergência pré-determinado (Oliva, 2003). Esta definição coincide com a proposta por (Haan, 1988) para a estimação dos parâmetros. A calibração ou estimação dos parâmetros é requerida para a maioria dos modelos hidrológicos devido às variações espaciais não representadas na formulação do modelo, a parâmetros cujo valor não se conhece e que estão incluídos no modelo e à extrapolação de medições de parâmetros em laboratório para o sistema natural.

O procedimento de estimação dos parâmetros apresenta habitualmente três fases, analisadas detalhadamente a seguir:

1. Definição de uma função objectivo.
2. Desenvolvimento de um algoritmo de optimização.
3. Aplicação a um conjunto de dados pré-seleccionados.

Durante este processo, dois critérios devem ser verificados: os resultados do modelo devem concordar com os valores observados e os parâmetros devem ser consistentes com as características das bacias hidrográficas ou talhões.

No entanto, nem sempre é possível obter o valor mais apropriado para um dado parâmetro. Tal situação deve-se a (Sorooshian e Gupta, 1983):

- interdependência entre parâmetros do modelo;
- indiferença da função objectivo a valores irrealistas dos parâmetros em estudo;
- descontinuidades na superfície de resultados;
- presença de pontos óptimos locais devido à não convexidade da superfície de resultados;
- erros nos dados.

Para um dado modelo, o utilizador deve escolher cuidadosamente quais os parâmetros a estimar a partir de características das bacias hidrográficas e quais os parâmetros a calibrar. No entanto, a estimativa óptima do parâmetro pode variar consideravelmente com a escolha do ponto de partida. Por vezes, a resposta da superfície da função objectivo tem centenas, senão milhares de óptimos locais, aninhados em várias escalas (Yapo *et al.*, 1996).

Os parâmetros do modelo a estimar, a partir de dados de campo, devem estar directamente relacionados com características físicas da bacia hidrográfica das quais se disponham de medições fiáveis, como por exemplo a área da bacia, cobertura vegetal, declives e geometria (James e Burges, 1982). Os parâmetros a calibrar são os que apresentam uma maior heterogeneidade espacial e temporal.

No entanto, é necessário um compromisso sobre o número de parâmetros a calibrar, por duas razões fundamentais: o aumento do número de parâmetros a calibrar aumenta a complexidade do processo de calibração; e, o aumento dos parâmetros a calibrar aumenta o número de graus de liberdade do modelo.

Conforme mostrado por Beven (1989), qualquer modelo com suficientes graus de liberdade pode ser ajustado a um conjunto de resultados. Na escolha dos parâmetros a calibrar, a análise de sensibilidade do modelo desempenha um papel fundamental pois revela quais os parâmetros com maior influência no modelo e em que intervalo de variação.

Outro aspecto importante na calibração é esta ser reproduzível e independente da pessoa que a executa, devido à subjectividade presente na análise dos resultados. Por este motivo, vários modelos apresentam rotinas de calibração automática (Yapo *et al.*, 1996).

Para a calibração automática existem várias funções objectivo possíveis, sendo a mais comum a do erro dos mínimos quadrados definida por:

$$\text{LSE} = \sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2 = \sum_{t=1}^N (O_t - Y_t)^2 \quad \text{Eq. 2.9}$$

sendo: LSE o erro quadrático; E_t o resíduo para o intervalo de tempo t ; Y_t e O_t os valores observados e previstos para o intervalo de tempo t ; e N o número de intervalos de tempo. A minimização desta função deve ter em conta que os resíduos devem ter média nula e variância constante e não serem correlacionados (Clarke, 1973).

O processo de calibração tem, no entanto, algumas limitações. A calibração é apenas um teste parcial do par estrutura/comportamento. A calibração destina-se a ajustar as equações do modelo e os seus parâmetros para se adequarem aos valores observados. Existe a possibilidade de o modelo reproduzir os valores observados através de fórmulas irrealistas, e ter um comportamento correcto, por razões incorrectas (Oliva, 2003)

A calibração do modelo é normalmente um processo manual. É um processo iterativo em que o modelador examina as diferenças entre os resultados e os valores observados, identifica possíveis razões para as diferenças, ajusta os parâmetros do modelo num esforço

para corrigir as discrepâncias, e volta ao início. Deste modo, o processo depende da experiência e conhecimentos do modelador (Oliva, 2003)

2.5.5. Sensibilidade

Define-se sensibilidade como sendo a taxa de variação de um determinado factor em relação à variação de um outro factor, podendo ser expressa em termos absolutos ou relativos, do seguinte modo (Nearing *et al.*, 1990):

$$S_a = \frac{\partial O}{\partial I} = \frac{O_2 - O_1}{I_2 - I_1} \quad \text{Eq. 2.10}$$

$$S_r = \frac{\partial O}{\partial I} = \frac{O_2 - O_1}{O_{12}} \bigg/ \frac{I_2 - I_1}{I_{12}} \quad \text{Eq. 2.11}$$

sendo: S, a sensibilidade absoluta; S_r a sensibilidade relativa; "I" o valor de entrada do factor em estudo e "O" o correspondente resultado.

2.6. Modelos de simulação climática.

Designa-se por clima a síntese, de tipo estatístico, dos estados de tempo característicos de um dado local num certo período de tempo: ano, estação do ano, mês, década, etc. O clima é, por isso, caracterizado por valores médios, máximos, mínimos, quantis, distribuições de probabilidade, etc., das grandezas mais adequadas para efectuar essa síntese.

O objectivo de um simulador climático é produzir dados que sejam estatisticamente similares aos valores observados (Dubrovsky, 1977). Por outras palavras os valores estatísticos (incluindo médias, variâncias, frequência de ocorrência de valores extremos e correlações entre as variáveis) obtidos sinteticamente devem ter diferenças estatisticamente não significativas das que se verificam nos dados observados.

Os modelos de simulação climática são modelos de simulação matemática que descrevem a ocorrência de elementos climáticos e têm por objectivo a simulação de um conjunto de dados com as mesmas características estatísticas da série histórica. São largamente utilizados em trabalhos de investigação e extensão no mundo inteiro. Essas ferramentas têm demonstrado ser de grande utilidade em muitas áreas, pois permitem, a um baixo custo, a obtenção de informações a respeito do clima local, permitindo, através de simulações, avaliar a sua influência tanto nos processos naturais como nos decorrentes da

intervenção humana. Os dados climáticos simulados por estes simuladores, entre outras aplicações, são utilizados como dados de entrada em muitos modelos hidrológicos e de previsão de erosão do solo. Estes modelos podem fornecer uma vasta gama de cenários que podem diferir marcadamente dos detalhes dos registos históricos, mantendo as propriedades estatísticas (Chapman, 1998). De uma forma geral, as principais variáveis estudadas são a precipitação, a radiação solar, a temperatura e o vento (Oliveira, 2003).

Os modelos hidrológicos fisicamente baseados, entre os quais se encontram vários modelos de previsão de erosão como é o caso do WEPP, precisam de séries de precipitação diária (Zhang e Garbrecht, 2003). A simulação de dados climáticos diários é útil quando os períodos de medição são pequenos ou há grandes falhas nos dados. Estes modelos podem ser também usados para simular séries de precipitação diárias para zonas de onde não se dispõe de udógrafos, recorrendo à interpolação espacial de parâmetros do modelo a partir de udógrafos situados em zonas adjacentes. Mas o aspecto talvez mais importante destes modelos é que são capazes de simular um espectro de séries climáticas diárias por ajustamento dos seus parâmetros, o que é um factor crítico para prever as respostas dos recursos hidrológicos e naturais às alterações climáticas.

Srikanthan e McMahon (2001) fazem uma extensa revisão dos modelos de simulação climática existentes indicando as suas características e limitações, bem como as condições de aplicação. Constatam que tem havido um grande esforço para a simulação estocástica de dados climáticos em locais individuais. O método de probabilidade de transição parece preservar a maioria das características da precipitação diária, mensal e anual e parece ser o modelo com melhor desempenho. O maior inconveniente deste método é o grande número de parâmetros necessários, que torna quase impossível regionalizar os parâmetros.

2.7. Modelos estocásticos

Seguidamente faremos uma resenha da investigação e prática na simulação estocástica de dados climáticos anuais, mensais e diários.

Uma das maiores falhas na concepção e funcionamento de sistemas hidrológicos é a quantificação da incerteza como resultado da variabilidade climática. Isto aplica-se quer os sistemas sejam sistemas complexos de recursos hídricos ou modelos simples de planeamento do comportamento de uma bacia hidrográfica. Para sistemas muito simples, podem ser suficientes técnicas analíticas de estimativa de incerteza mas, para a maioria dos sistemas, temos de recorrer à simulação do sistema utilizando dados simulados

estocasticamente. Para além de quantificar a incerteza, os dados simulados estocasticamente têm outras aplicações tais como a concepção e funcionamento de sistemas de recursos hídricos, concepção de sistemas de drenagem urbana, alterações do uso do solo e modelos de previsão de erosão hídrica.

Há pouca aplicação directa de dados anuais simulados mas estes são utilizados indirectamente em esquemas de desagregação para obter dados mensais. As estimativas de necessidades de água e a simulação de sistemas de fornecimento de água precisam de dados mensais. Para modelos de precipitação-escoamento e crescimento de planta, são necessários dados diários. Faremos de seguida algumas considerações sobre a simulação de precipitação e dados climáticos tais como temperatura, radiação solar e evaporação. A precipitação e os dados climáticos são medidos em locais determinados mas assume-se que representam as áreas circundantes. Em bacias hidrográficas pequenas a médias, podem ser utilizados dados ponderados em função do local que tomem em conta as variações espaciais. Em bacias hidrográficas grandes, é necessário modelar a variância espacial explicitamente especialmente no que diz respeito à precipitação.

Apesar de estarem disponíveis na literatura numerosos modelos estocásticos, poucos têm sido testados adequadamente com respeito a características a diferentes escalas temporais ou num número de locais com climas diferentes. Por exemplo, um modelo diário adequado deve preservar características mensais e anuais para além de preservar as características diárias.

No passado, os modelos de simulação de dados assumiam que não havia variância nos parâmetros do modelo entre os vários anos, mas apenas se tomavam em conta variações sazonais ou mensais dentro de um ano. É o caso do modelo CLIGEN que estudamos neste trabalho. No entanto, existe uma crescente consciência da variação a longo prazo nos dados climáticos na forma de anos secos e chuvosos ou ciclos ENSO⁵, de modo que os parâmetros dos modelos devem variar de algum modo para modelar os ciclos chuvoso e seco. Tem havido muito pouca investigação sobre este aspecto.

A simulação de precipitação e outros dados climáticos precisam de uma vasta gama de modelos dependendo das escalas temporais e espaciais envolvidas. Cox e Isham (1994) apresentaram três grandes tipos de modelos de precipitação, nomeadamente, modelos empíricos estatísticos, modelos de meteorologia dinâmica e modelos estocásticos

⁵ El Niño/Southern Oscillation

intermédios, uma classificação baseada na quantidade de realismo físico incorporado na estrutura do modelo. Nos modelos empíricos estatísticos, são ajustados modelos estocásticos empíricos aos dados disponíveis. Os modelos para a simulação de precipitação anual, mensal e diária e dados climáticos são deste tipo. Nos modelos de meteorologia dinâmica, são resolvidos numericamente sistemas de equações parciais diferenciais não-lineares simultâneas representando, muito realisticamente, os processos físicos envolvidos. Estes são geralmente utilizados para previsão meteorológica e não para simulação de dados. Em modelos estocásticos intermédios, são utilizados poucos parâmetros para representar o fenómeno de precipitação, sendo estes parâmetros relacionados com fenómenos físicos subjacentes tais como células de trovoadas, superfícies frontais e núcleos de baixas pressões. Estes tipos de modelos são utilizados para a análise de dados recolhidos em pequenos intervalos de tempo tais como uma hora.

2.7.1. Dados de precipitação diária

São cada vez mais necessárias sequências longas de precipitação diária, não apenas para fins hidrológicos mas também para fornecer dados de entrada para modelos de erosão do solo, crescimento de planta, dimensionamento de aterros sanitários, dimensionamento de barragens, deposição no solo de resíduos líquidos e outros projectos ambientalmente sensíveis (Srikanthan e McMahon, 2001). A precipitação é geralmente medida diariamente e esta forma a base para séries de precipitação mensal e anual.

A maioria dos modelos estocásticos de precipitação diária tem duas partes: uma parte para a ocorrência de dias secos e chuvosos e uma parte para a simulação de quantidade de precipitação em dias chuvosos. A variância sazonal da precipitação é um factor importante e este aspecto tem sido abordado de várias maneiras, assumindo que os parâmetros variam em função do mês ou da estação do ano, ou como uma função periódica (tal como séries de Fourier) para fornecer a variância de parâmetros intra-anual.

2.7.2. Ocorrência de precipitação

Os modelos de ocorrência de precipitação são de dois tipos principais: os baseados em cadeias de Markov e os baseados em processos alternativos de renascimento.

2.7.2.1. Cadeias de Markov

As cadeias de Markov especificam o estágio de cada dia como ‘chuvoso’ ou ‘seco’ e desenvolvem a relação entre o estágio do dia corrente e o estágio dos dias precedentes. A

ordem da cadeia de Markov é o número de dias precedentes tomados em conta. A maioria dos modelos de cadeia de Markov referidos na literatura é de primeira ordem (Srikanthan e McMahon, 2001)

A classe de modelo ou processo estocástico mais comum, utilizado para representar séries temporais de variáveis discretas, é conhecido como *cadeia de Markov*. Podemos imaginar uma cadeia de Markov como uma colecção de "estádios" de um sistema modelar. Cada estado corresponde a um dos elementos de partição de exemplo de espaço compreendendo a variável aleatória em questão.

Para cada período de tempo, cuja duração é igual à separação temporal entre observações na série temporal, a cadeia de Markov pode permanecer no mesmo estádio ou alterar-se para um dos outros estádios. Permanecer no mesmo estádio corresponde a duas observações sucessivas do mesmo valor da variável aleatória na série temporal, enquanto que uma alteração de estádio implica dois valores sucessivos diferentes na série temporal.

O comportamento da cadeia de Markov é controlado por um conjunto de propriedades para estas transições, chamadas *probabilidades de transição*. As probabilidades de transição especificam probabilidades de o sistema estar em cada um dos seus estádios possíveis para o período seguinte. A mais comum é chamada *cadeia de Markov de primeira ordem*, para a qual as probabilidades de transição que controlam o estádio seguinte do sistema dependem apenas do estado actual do sistema. Isto é, o conhecimento do estado corrente e da sequência completa de estádios que conduziram ao estádio actual não fornece mais informação acerca da distribuição de probabilidade para os estádios no próximo instante de observação do que o conhecimento do estádio corrente por si só. Esta característica da cadeia de Markov de primeira ordem é conhecida como *propriedade de Markov* que pode ser exprimida de uma forma mais formal como

$$\Pr\{X_{t+1} | X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_1\} = \Pr\{X_{t+1} | X_t\} \quad \text{Eq. 2.12}$$

As probabilidades de estádios futuros dependem do estádio corrente, mas não dependem do modo particular como o sistema atingiu o estádio actual. Em termos de série temporal de dados observados a propriedade de Markov significa que, por exemplo, as previsões para os valores do dado de amanhã podem ser feitas com base na observação de hoje, mas também que conhecendo o estádio de hoje não fornece qualquer informação adicional.

As probabilidades de transição de uma cadeia de Markov são probabilidades condicionais. Para uma cadeia de Markov de primeira ordem, existe uma distribuição condicional de

probabilidade pertinente a cada estágio corrente possível do sistema, e cada uma destas distribuições especifica probabilidades para os estágios do sistema no próximo período de tempo. Dizer que estas distribuições de probabilidade são condicionais permite a possibilidade de as probabilidades de transição serem diferentes, dependendo do estágio actual. O facto de estas distribuições poderem ser diferentes é a essência da capacidade da cadeia de Markov representar a correlação de série, ou persistência, frequentemente exibida pelas variáveis atmosféricas. Se a probabilidade do estágio futuro é a mesma, independentemente do estágio actual, então a série temporal consiste em valores independentes. Nesse caso, a probabilidade de ocorrência de um qualquer dado estado no período de tempo futuro não é afectado pela ocorrência ou não ocorrência de um estágio particular no período de tempo corrente. Se a série temporal a ser modelada exhibe persistência a probabilidade do sistema permanecer num dado estágio tende a ser mais elevada do que as probabilidades de passar de um estágio para outros.

Se as probabilidades de transição de uma cadeia de Markov não se alteram ao longo do tempo e estas não são zero, então a série temporal resultante será estacionária. A modelação de séries de dados não estacionários que exibem, por exemplo, um ciclo anual pode exigir permitir que as probabilidades de transição variem ao também longo do ciclo anual. Um modo de conseguir isto é especificar que as probabilidades variem de acordo com uma curva periódica suave, tal como a função co-seno. Como alternativa, podem ser utilizadas probabilidades de transição separadas, para porções do ciclo aproximadamente estacionárias, tal como trimestres ou meses (Wilks, 1995).

2.7.2.2. Cadeias de Markov de dois estágios de primeira ordem

A classe mais simples de variável aleatória discreta compreende a situação de eventos dicotómicos (sim/não). O comportamento de uma sequência estacionária de valores independentes (que não apresentam correlação de série) de uma variável aleatória discreta é descrito pela distribuição binomial. Isto é, para valores seriados independentes, a sua ordem temporal não tem importância na perspectiva de especificar probabilidades de eventos futuros, de modo que um modelo de série de tempo para o seu comportamento não fornece mais informação que uma distribuição binomial simples.

A cadeia de Markov de dois estágios é um modelo estatístico para a persistência de acontecimentos binários. A ocorrência ou não ocorrência de precipitação num dado dia é o exemplo meteorológico mais simples de um acontecimento aleatório binário e a sequência de observações diárias de "precipitação" e "não precipitação" de um local em particular

constituiu a série temporal dessa variável. Consideremos uma série temporal em que a variável aleatória toma os valores de $X_t=1$ se ocorre precipitação no dia t e $X_t=0$ se não ocorre precipitação. Como exemplo na Tabela 2.1 indica-se a ocorrência ou não de precipitação em Castelo Branco no mês de Janeiro de 1997.

Tabela 2.1 - Série temporal de ocorrência ou não de precipitação em Castelo Branco no mês de Janeiro de 1997.

Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
X_t	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Nota: Nos dias em que ocorre precipitação $X_t=1$, nos dias em que não ocorre precipitação $X_t=0$

Pode observar-se pelo exemplo que aparentemente os 1s e 0s tentem a agrupar-se no tempo. Como ilustrado, a probabilidade de "1" seguido por "1" é aparentemente mais elevada do que "1" seguido por "0" e "0" seguido por "0" é aparentemente mais elevada do que "0" seguido por "1".

Um modelo estocástico comum e frequentemente bom para avaliar este tipo de eventos é uma cadeia de Markov de primeira ordem de dois estádios. A cadeia de Markov de primeira ordem de dois estádios é adequada para avaliar dados dicotómicos uma vez que cada um dos dois estádios pertence a um de dois possíveis valores. A cadeia de Markov de primeira ordem de dois estádios tem uma propriedade que consiste em que as probabilidades de transição que condicionam cada observação na série temporal dependerem apenas do valor do dado anterior na série temporal.

A Fig. 2-4 ilustra esquematicamente a natureza da cadeia de Markov de primeira ordem de dois estádios. Para esclarecer as ideias, os dois estádios identificados têm por base os dados da Tabela 2.1. Para cada valor da série temporal, o processo estocástico está ou no estádio 0 (não ocorre precipitação $X_t=0$) ou no estádio 1 (ocorre precipitação $X_t=1$). A cada intervalo de tempo o processo pode ou permanecer no mesmo estádio ou alterar-se para outro estádio. Deste modo, são possíveis quatro transições diferentes, correspondentes a dia seco a seguir a dia seco (p_{00}), dia chuvoso a seguir a dia seco (p_{01}), dia seco a seguir a dia chuvoso (p_{10}), dia chuvoso a seguir a dia chuvoso (p_{11}). Cada uma destas quatro transições é representada na Fig. 2-4 por setas, referenciadas pelas probabilidades de transição apropriadas. Aqui a notação é tal que o primeiro índice na probabilidade é o estádio no tempo t , e o segundo índice é o estádio no tempo $t + 1$.

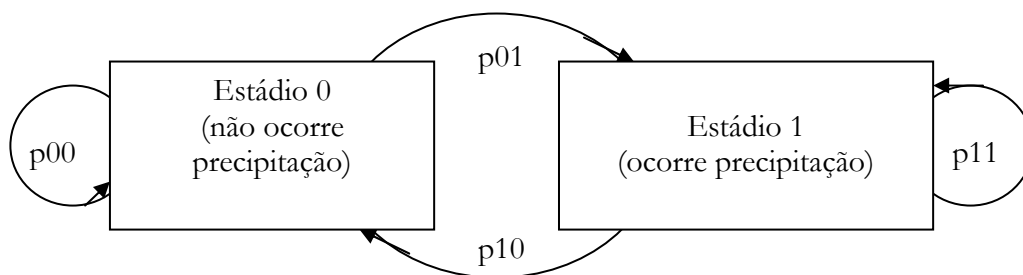


Fig. 2-4 - Representação esquemática de uma cadeia de Markov de dois estádios de primeira ordem, que ilustra a ocorrência ou não ocorrência de precipitação. Os estádios considerados são 0 para não ocorrência de precipitação e 1 para ocorrência de precipitação.

As probabilidades de transição são probabilidades condicionais para o estádio no tempo $t + 1$ (por exemplo amanhã será um dia chuvoso) dado o estádio no tempo t (por exemplo se ocorreu precipitação hoje). Isto é

$$p_{00} = \Pr\{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 0\} \quad \text{Eq. 2.13}$$

$$p_{01} = \Pr\{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 0\} \quad \text{Eq. 2.14}$$

$$p_{10} = \Pr\{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 1\} \quad \text{Eq. 2.15}$$

$$p_{11} = \Pr\{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 1\} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Em conjunto, as equações 2.13 e 2.14 constituem a distribuição condicional de probabilidade para o valor da série temporal no tempo $t+1$, dado que $X_t=0$ no tempo t . De igual modo, as equações 2.15 e 2.16 exprimem a distribuição de probabilidade condicional para o próximo valor na série temporal dado que o valor corrente é $X_t = 1$ (Wilks, 1995).

De notar que as quatro probabilidades nas equações 2.13 a 2.16 fornecem informação redundante. Uma vez que a cadeia de Markov está num ou noutra estádio no tempo t , o espaço para X_{t+1} são dois acontecimentos mutuamente exclusivos. Deste modo $p_{00} + p_{01} = 1$ e $p_{10} + p_{11} = 1$ de modo que apenas é necessário focar a nossa atenção num único par de probabilidades de transição, digamos p_{01} e p_{11} . Em particular, é suficiente estimar

apenas dois parâmetros de uma cadeia de Markov de primeira ordem de dois estádios, uma vez que os dois pares de probabilidades condicionais devem somar 1. O procedimento de estimativa de parâmetros consiste simplesmente em calcular frequências relativas condicionais, que produzem os estimadores de máxima probabilidade

$$\hat{p}_{01} = \frac{\text{número de 1's a seguir a 0's}}{\text{número total de 0's}} = \frac{n_{01}}{n_{0\bullet}} \quad \text{Eq. 2.17}$$

e

$$\hat{p}_{11} = \frac{\text{número de 1's a seguir a 1's}}{\text{número total de 1's}} = \frac{n_{11}}{n_{1\bullet}} \quad \text{Eq. 2.18}$$

Aqui, n_{01} é o número de transições do estádio 0 para o estádio 1, n_{11} é o número de pares de intervalos de tempo em que há dois 1's consecutivos na série, $n_{0\bullet}$ é o número de 0's na série seguidos por outro ponto de dados e $n_{1\bullet}$ é o número de 1's seguidos por outro ponto de dados. Isto é o "•" em índice indica o total de todos os valores do índice substituídos por este símbolo, de modo que $n_{1\bullet} = n_{10} + n_{11}$ e $n_{0\bullet} = n_{00} + n_{01}$. As equações afirmam que o parâmetro p_{01} é estimado procurando a frequência condicional relativa do evento $x_{t+1} = 1$ considerando apenas os pontos na série temporal seguindo valores para os quais $x_t = 0$. De igual modo, p_{11} é estimado como a fração de pontos para os quais $x_t = 1$ é seguido por pontos com $x_{t+1} = 1$.

Há certas propriedades que estão implícitas numa série temporal descrita por uma cadeia de Markov. Estas propriedades são controladas pelos valores das probabilidades de transição, e podem ser calculadas a partir delas. Em primeiro lugar, as frequências relativas a longo prazo dos eventos correspondentes aos dois estádios da cadeia de Markov, são designadas por *probabilidades estacionárias*. Para uma cadeia de Markov que descreve a ocorrência ou não ocorrência diária de precipitação, a probabilidade estacionária para a precipitação, π_1 , corresponde à probabilidade climatológica incondicional de precipitação. Em termos de probabilidades de transição p_{01} e p_{11} ,

$$\pi_1 = \frac{p_{01}}{1 + p_{01} - p_{11}}, \quad \text{Eq. 2.19}$$

sendo a probabilidade estacionária para o estádio 0 simplesmente $\pi_0 = 1 - \pi_1$.

A reprodução que o modelo de simulação climática faz da variabilidade das características a longo prazo (mensal, sazonal ou anual) é um aspecto crítico e de extrema importância (Gregory *et al.*, 1993). Dubrovsky (1977) verificou que um dos modelos testados diminuía a variabilidade dos valores gerados em cerca de 30%. Formulou a hipótese que esta subestimação das variâncias pode ser o resultado de: tipo de modelo de simulação, especialmente a insuficiência do modelo em cadeia de Markov de primeira ordem; insuficiência da distribuição gama para representação da distribuição de precipitação; baixa frequência da variabilidade climática nos anos em que foram determinados os parâmetros.

Mason (2004) verificou que para a precipitação no oeste dos Estados Unidos, os modelos baseados em cadeia de Markov de primeira ordem, tendem a subestimar a probabilidade de ciclos longos de dias secos pelo que sugere a utilização de modelos de cadeia de Markov de segunda ordem (em que a ocorrência de precipitação depende da ocorrência ou não de precipitação nos dois dias anteriores).

2.7.3. Quantidade de precipitação

Para cálculo das quantidades de precipitação diária utiliza-se a distribuição Gama de dois parâmetros, distribuição exponencial mista, a distorção da distribuição normal. O CLIGEN utiliza a distorção da distribuição normal (Nicks *et al.*, 1995). Chapman (1998) investigou o impacto de dias chuvosos adjuntos na distribuição de quantidades de precipitação e descobriu que os modelos que tomam esta em conta se adequam melhor à precipitação do que os modelos que juntam os dados.

No modelo CLIGEN, como noutros, considera-se que a quantidade de precipitação em dias chuvosos corresponde a uma função de distribuição de probabilidade. No entanto Buishand (1978) verificou diferenças significativas entre as precipitações médias nos dias chuvosos agrupados de acordo com o número de dias chuvosos consecutivos. Chapman (1998) verificou que, para as condições da Austrália, se verificam diferenças estatísticas na quantidade de precipitação quando um dia chuvoso tem 0, 1 ou 2 dias adjacentes chuvosos. As diferenças de precipitação entre as classes de 1 ou 2 dias podem ser atribuídas a diferentes durações de precipitação, uma vez que geralmente a duração de precipitação num dia de início ou de fim de período chuvoso é geralmente menor que nos dias intermédios. As diferenças entre dias com 0 dias adjacentes chuvosos, podem ser uma indicação do mecanismo de formação de precipitação, sendo os dias chuvosos isolados geralmente provocados por fenómenos convectivos, enquanto nos outros dias a origem da precipitação é geralmente um fenómeno de superfície frontal ou de depressão.

Chapman (1998) afirma que os modelos de simulação climática que ignoram este efeito, sobrestimam a precipitação que ocorre em dias chuvosos isolados e subestimam a precipitação que ocorre em dias integrados em conjuntos de vários dias chuvosos consecutivos. Ao aplicar estes modelos de simulação climática em modelos de previsão de erosão hídrica, estes erros propagam-se pelos cálculos seguintes, dando origem a resultados imprevisíveis.

Chapman (1997) comparou os cinco modelos seguintes para avaliar a quantidade de precipitação: o modelo exponencial (um parâmetro), o modelo misto exponencial (três parâmetros), o modelo Gama (dois parâmetros), a distribuição normal distorcida (três parâmetros) e a distribuição Kappa (dois parâmetros). Para validação destes modelos utilizou dados de precipitação de 273 locais em ilhas e atóis do Pacífico. Verificou que o melhor modelo é a distribuição normal distorcida, seguido pelo modelo misto exponencial, o modelo Kappa, o modelo Gama, e por último, o modelo exponencial. Verificou-se também consistência nos modelos escolhidos para diferentes grupos de dados (dia chuvoso isolado, primeiro dia de um período chuvoso etc.). Observou pequena variância no coeficiente de variação entre diferentes grupos e relativamente pequena entre meses.

Os modelos estocásticos de precipitação diária, com parâmetros variáveis anualmente, não preservam habitualmente a variância de precipitação mensal e anual (Srikanthan e McMahon, 2001). Esta subestimação pode ser devida a tendências reais a longo prazo da precipitação, a alterações nas técnicas de recolha de dados ou na exposição do udógrafo, à inadequação do modelo, e/ou à existência de padrões de circulação atmosférica de grande escala que não exibem periodicidade anual (Woolhiser *et al.*, (1993) *cit in* Srikanthan e McMahon (2001).

2.7.3.1. Incerteza nos parâmetros do modelo

Na maioria dos modelos acima, assume-se que os valores estimados dos parâmetros são valores “verdadeiros” e os erros amostrais são ignorados (Srikanthan e McMahon, 2001). Esta abordagem tradicional para simular dados estocásticos subestima a gama de variação da média e da variância das sequências futuras prováveis.

Um dos problemas que pode advir da utilização de certos modelos de simulação climática, nomeadamente dos que dependem de cadeias de Markov, é que consideram que a precipitação em dias chuvosos tem sempre o mesmo valor médio. Chapman, (1998) estudou o impacto dos dias chuvosos adjuntos sobre a distribuição das quantidades de precipitação e concluiu que, para os dados de precipitação da Austrália, Estados Unidos e

ilhas no oceano Pacífico, existem diferenças significativas na quantidade de precipitação de um dia chuvoso quando o dia anterior e seguinte são secos, quando há um dia adjacente que é chuvoso ou quando os dois dias adjacentes são também chuvosos. Esta diferença justifica-se devido à origem da precipitação que no caso de dias chuvosos isolados é geralmente de origem convectiva, enquanto nos outros casos é geralmente originada por núcleos de baixas pressões ou superfícies frontais. Os modelos que ignoram este facto sobrestimam a precipitação em dias isolados e subestimam a precipitação quando um dia adjacente é chuvoso. De acordo com Chapman (1998), quando estes modelos são aplicados para o cálculo de balanço hídrico ou erosão do solo, estes erros podem propagar-se aos cálculos, com resultados imprevisíveis.

Apesar de os modelos de simulação estocástica de precipitação funcionarem a uma escala diária, os resultados que estes produzem exibem variações de baixa frequência cujas características dependem da estrutura do modelo de precipitação diária subjacente. Esta variação pode ser caracterizada quantitativamente em termos de variância, que será análoga à variância interanual da precipitação mensal total observada (Wilks, 1999).

Os modelos de simulação climática devem reproduzir, pelo menos de uma forma aproximada a variabilidade interanual da precipitação, tal como indicado pelas variações da precipitação mensal ou sazonal de ano para ano, que é habitualmente menor que na realidade (Gregory *et al.*, 1993). Verifica-se no entanto que os modelos de simulação climática apresentam variações de baixa frequência menores que as observadas (Buishand, (1978); Gregory *et al.*, (1993)). Este termo é chamado sobredispersão⁶ (Katz e Parlange, 1998). As investigações que se realizaram sobre este problema nos modelos estocásticos de simulação climática não determinaram se esta sobredispersão é resultado de modelos estatísticos inadequados do processo de simulação de precipitação (por ex. cadeias de Markov de primeira ordem contra cadeias de ordem superior), se os modelos falham em reflectir a variabilidade interanual do processo físico responsável pela precipitação, ou se é uma combinação destes dois aspectos (Wilks, 1999).

Em segundo lugar, a frequência com que estes modelos produzem acontecimentos extremos, particularmente períodos de seca, é também inferior ao observado (Buishand, 1978; Semenov e Porter, 1995).

⁶ Overdispersion no original inglês

Wilks (1999) verificou que os modelos de cadeia de Markov de primeira ordem parecem adequados para a realização de simulação climática do centro e leste dos Estados Unidos, mas que são inadequados para a região Oeste (particularmente para o estado da Califórnia) relativamente não só à aderência global de dados, mas também quanto à sua capacidade de representar a variância observada do número de dias chuvosos por mês e a duração de períodos longos de seca.

2.7.3.2. Conclusões deste sub-capítulo

Tem havido muita investigação sobre a simulação de precipitação diária em num único local. O método probabilidade de transição parece preservar a maioria das características diárias, mensais e anuais da precipitação e é considerado o modelo com melhor desempenho (Chapman, 1997). O principal inconveniente da utilização deste método é o grande número de parâmetros, que torna quase impossível regionalizar os parâmetros.

Uma limitação dos modelos existentes é a subestimação consistente das variâncias dos totais simulados de precipitação mensal e anual. Esta limitação torna-se evidente no caso que estudámos, sendo proposta uma alteração para minimizar esta situação (ver capítulo 4).

3. Material e métodos

3.1. *Estação experimental de erosão de solo de Castelo Branco*

A estação experimental de erosão do solo de Castelo Branco encontra-se em funcionamento desde 1990. Ao longo destes anos, temos realizado diversos trabalhos nesta estação experimental, nomeadamente as operações culturais, a recolha de informação de precipitação e a recolha de dados de perda de solo.

A existência desta estação experimental, cujo funcionamento temos acompanhado desde 1992, tem permitido a recolha de dados, em termos de precipitação, escoamento e perda de solo.

A informação recolhida constitui já um rico património de dados, que devem ser explorados e divulgados, podendo ser utilizados para calibração e validação de modelos de previsão de erosão hídrica.

A estação está situada na Quinta da Senhora de Mércules, pertencente à Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco, nas proximidades da cidade de Castelo Branco (39° 49' N, 7° 29' W).

A estação experimental onde se desenrolaram os trabalhos é constituída por dois conjuntos de 18 talhões, localizados sobre Solos Litólicos Não Húmicos derivados, respectivamente, de granitos porfiróides e de xistos mosqueados, ambos correspondentes a Cambissolos, segundo a classificação da FAO/UNESCO (1988), os quais poderão ser caracterizados por possuírem um perfil do tipo Ap-Bw-C, apresentando o *solum* a espessura média de 25 a 50 cm, textura franco-arenosa em toda essa espessura, e uma estrutura anisóforme sub-angulosa, média e fina, fraca, condicionada certamente pelo reduzido teor de matéria orgânica, correspondendo, na Carta de Solos da Quinta da Senhora de Mércules (Pinheiro, 1990), a solos pertencentes às séries 54 (mancha 810) e 79 (mancha 820), derivados de xistos mosqueados, e às séries 81 (mancha 795) e 81s (mancha 777), derivados de granitos porfiróides. Estes solos foram escolhidos por serem representativos na região.

Os talhões experimentais, com 22,13 m de comprimento e 1,9 m de largura (área total de 42 m²), foram delimitados inicialmente por chapas de plástico e posteriormente por chapas galvanizadas em duas encostas com cerca de 9% de declive, correspondendo, assim, a

talhões padrão, tal como proposto por Wischmeier e Smith (1978). Os talhões estão orientados no sentido Norte-Sul, com exposição a Norte.

Os 36 talhões a que se refere o presente estudo foram ocupados, em cada um dos tipos de solo, de forma aleatória, pelas seguintes 4 modalidades distribuídas pelos talhões:

Testemunha, solo mantido limpo de vegetação, através de mobilizações manuais periódicas (3 talhões em cada tipo de solo);

Monocultura, de Aveia (*Avena sativa* L.) no solo derivado de xisto (3 talhões) e de Centeio (*Secale cereale* L.) no de granito (3 talhões);

Prado Permanente de Sequeiro, constituído por uma consociação de Trevo Subterrâneo (*Trifolium subterraneum* L.), Serradela (*Ornithopus compressus* L.) e Azevém Bastardo (*Lolium rigidum* Gaud.) (3 talhões em cada tipo de solo);

Rotação Trienal: Tremocilha (*Lupinus luteus* L.) – **Tremocilha** – **Aveia**, em que o segundo ano da tremocilha é de ressementeira natural (ocupando, no total, 9 talhões em cada tipo de solo).

Na parte inferior de cada talhão experimental, encontra-se um colector e uma caleira que conduzem o escoamento superficial e os respectivos carrejos para um tanque de sedimentação (com uma capacidade de 0,267 m³). No caso de este tanque encher, a água em excesso escoar-se por um partidor, que conduz uma fracção (1/9) para um segundo tanque (com uma capacidade de 0,608 m³). No primeiro depósito encontra-se um conjunto de três redes de plástico, com malha de dimensões decrescentes destinadas a reter no primeiro depósito a maior quantidade de solo.

A mobilização do solo foi feita manualmente, com enxadas no início de cada ano agrícola, nos talhões experimentais destinados a cereais ou ao primeiro ano de tremocilha (preparação da cama de sementeira). Os talhões testemunha foram mantidos permanentemente nus, também mediante mobilizações manuais, executadas regularmente. Por outro lado, não se realizaram quaisquer práticas culturais conservativas em nenhum dos talhões experimentais, pelo que a mobilização dos talhões foi feita sempre na direcção do maior declive. Nos talhões de prado, tem-se mantido o solo, na medida do possível, sem qualquer tipo de intervenção, excepto a necessária para a erradicação de matos e silvas.

Os volumes correspondentes ao escoamento foram medidos no final de cada chuvada ou conjunto de chuvadas (sempre que as quantidades de precipitação ou de escoamento o justificaram), tendo-se procedido, simultaneamente à recolha de amostras de água com o material em suspensão e sedimentos.

O clima de Castelo Branco é caracterizado por Verão temperado seco, com ocorrência de 77% da precipitação durante o Outono e Inverno, que corresponde a um clima tipo Csa de acordo com a classificação climática de Köppen, e tipo C₁B₂s a¹ de acordo com a classificação de Thornthwaite, tendo-se registado, de 1951 a 1980, uma precipitação média anual de 821,4 mm (INMG, 1991). Durante os anos a que se refere este estudo a precipitação média anual foi de 789,3 mm.

A precipitação foi quantificada, no local de estudo, através de um udógrafo de balsa (calibrado para a precisão de 0,2 mm de chuva), ligado a um *Data Logger*, ambos da marca *Delta-T Devices Ltd.*⁷, que registava a quantidade total de precipitação que ocorria em períodos de 10 minutos. Os dados armazenados no *Logger* foram semanalmente transferidos para um computador portátil.

Na Tabela 3.1 indica-se a precipitação mensal observada na estação experimental de erosão de solo de Castelo Branco nos anos hidrológicos de 1991/1992 a 2002/2003 e os respectivos totais anuais, médias e desvio padrão mensais.

Tabela 3.1 – Precipitação mensal (mm) observada na estação experimental de erosão de solo de Castelo Branco nos anos hidrológicos de 1991/1992 a 2002/2003. Totais anuais, médias e desvio padrão mensais.

Mês	Ano Hidrológico												Média	Desvio padrão	Coef. de variação
	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98	98/99	99/00	00/01	01-02	02-03			
Set.	13,7	17,6	49,4	1,0	30,0	53,4	43,0	90,4	82,2	15,8	35,4	82,0	42,8	29,7	0,69
Out.	51,1	51,1	280,4	58,8	56,6	54,2	182,0	23,2	204,0	59,0	174,4	85,8	106,7	81,6	0,76
Nov.	39,7	15,2	140,2	95,2	152,4	65,4	343,8	15,0	15,6	158,4	24,0	151,0	101,3	96,3	0,95
Dez.	45,8	71,7	12,8	49,8	280,0	274	208,6	62,4	34,0	318,6	14,6	197,4	130,8	115,7	0,88
Jan.	39,2	32,5	94,0	67,0	399,6	184,2	55,8	80,2	10,0	246,2	105,8	146,6	121,8	110,6	0,91
Fev.	48,7	30,2	123,0	103,6	30,4	4,2	85,0	8,4	32,0	79,4	18,4	130,0	57,8	44,6	0,77
Mar.	26,4	43,9	2,4	21,8	82,2	0,4	30,8	61,0	37,6	229	128,2	109,0	64,4	65,3	1,01
Abr.	55,9	52,0	29,2	27,4	33,6	29,4	58,2	38,4	202,4	10,8	59,6	81,8	56,6	49,8	0,88
Mai.	34,9	112,1	166,4	16,6	168,0	104,6	135,6	49,0	95,0	89,0	27,0	0,4	83,2	57,4	0,69
Jun.	17,0	8,6	0,6	25	0,2	40,4	17	6,2	0,2	6,0	2,2	2,4	10,5	12,3	1,17
Jul.	3,4	0,0	0,2	2,6	0,0	34,6	0,0	15,4	6,2	10,0	0,0	6,8	6,6	10,1	1,53
Ago.	10,2	0,0	2,2	0,0	0,0	28,2	1,6	22,2	2,2	2,8	0,6	12,4	6,9	9,5	1,38
Total	386,0	434,9	900,8	468,8	1233	873,0	1161,4	471,8	721,4	1225	590,2	1005,6	789,3	320,1	0,41

⁷ As marcas comerciais referidas neste trabalho não revelam qualquer preferência do autor nem dos promotores deste estudo, e são referidas apenas para informação do leitor.

Verifica-se que o desvio padrão é muito elevado, com um coeficiente de variação superior a 0,69, chegando mesmo a ser superior a 1 nos meses de Março, Junho, Julho e Agosto. Isto fica a dever-se à grande dispersão dos valores de precipitação mensal, com fortes variações de ano para ano. Esta distribuição de precipitação é típica das regiões de clima mediterrâneo em que cerca de 70% do total anual ocorre nos meses de Outubro a Fevereiro. Para além disso, há uma grande variabilidade inter-anual, em que alternam normalmente anos chuvosos com anos secos.

3.2. Descrição do modelo CLIGEN⁸

3.2.1. O que é?

Segundo Nicks *et al.*, (1995) os métodos de simulação climática utilizados no modelo WEPP são baseados nos simuladores utilizados nos modelos EPIC⁹ (Williams *et al.*, 1984), e SWRRB¹⁰ (Williams *et al.*, 1985). Ainda segundo Nicks *et al.*, (1995) esta escolha foi baseada no seguinte:

- 1) os simuladores existentes têm sido bem testados em muitos locais nos Estados Unidos;
- 2) foram desenvolvidos dados de entrada para estes modelos para aproximadamente 200 estações; e
- 3) estão disponíveis *software* e técnicas para estimativa de parâmetros.

Os métodos de simulação climática utilizados nos modelos existentes têm sido modificados de modo a incluir as exigências adicionais para distribuição de intensidade de precipitação.

O modelo WEPP exige como dados de entrada para os cálculos a efectuar, os seguintes dados climáticos: precipitação diária, temperatura diária máxima e mínima, radiação solar diária, e direcção e velocidade médias diárias do vento. Estes dados, podem ser introduzidos no modelo de dois modos:

Se estes valores estão disponíveis, nomeadamente quando se dispõe de registos udográficos contínuos (provenientes de udografos de sifão ou de báscula), podem utilizar-se estes

⁸ CLIGEN: de CLImate GENerator

⁹ Erosion Productivity Impact Calculator

¹⁰ Simulator for Water Resources in Rural Basins

valores directamente. Para tal, está disponível o programa BPCDG.EXE¹¹ (Zelege *et al.*, 1995), que gera ficheiros climáticos, para um ano.

Este programa exige como dados de entrada quatro ficheiros:

- ficheiro de precipitação discriminada entre pontos de inflecção;
- ficheiro de temperatura mínima e máxima diárias, direcção e velocidade do vento às 08 e às 18 horas;
- ficheiro de direcção e velocidade do vento, radiação solar e temperatura de ponto de orvalho;
- ficheiro de dados da estação meteorológica (latitude, longitude, altitude, número de anos de observação, ano de início, número de anos simulados).

Este programa gera ficheiros climáticos (*.cli) que são posteriormente utilizados pelo WEPP nos seus cálculos.

Deste modo, podem comparar-se as perdas de solo previstas pelo WEPP com as observadas, parametrizando-se seguidamente o modelo WEPP. No entanto, as previsões obtidas são válidas apenas para o ano a que os dados climáticos dizem respeito.

Torna-se então necessário utilizar um modelo de simulação climática. O modelo de simulação climática utilizado pelo modelo WEPP é o CLIGEN (Nicks, 1985). Este programa gera a precipitação diária, temperatura diária máxima e mínima, radiação solar diária, e direcção e velocidade médias diárias do vento. Estes valores simulados são depois utilizados em diversos componentes do modelo WEPP. Para o cálculo da erosão e do escoamento os valores mais importantes são a precipitação e a temperatura diárias. A temperatura define se a precipitação ocorre sob a forma de chuva ou de neve. A velocidade e direcção do vento influenciam a deriva da neve. A radiação solar indica a entrada de energia no sistema e condiciona o crescimento das plantas.

Habitualmente são necessários dados meteorológicos para os modelos de simulação de processos hidrológicos e agrícolas. As observações históricas são frequentemente curtas, incompletas, ou simplesmente não se encontram disponíveis. Por isso, há necessidade de simular sinteticamente sequências meteorológicas que preservem estatisticamente a média e variações que se observam nos dados históricos. O CLIGEN é um simulador climático que produz ficheiros climáticos diários para os modelos hidrológicos. Para satisfazer as

¹¹ Do Acrónimo **B**reak**P**oint **C**limate **D**ata **G**enerator

necessidades do WEPP foi introduzida a capacidade de simular os padrões dentro da chuvada (Nicks *et al.*, 1995). Yu (2000) encontrou um erro no código que simula a intensidade máxima e foram feitas alterações subsequentes no algoritmo e os parâmetros relevantes re-calibrados.

Uma característica única do CLIGEN que o distingue de outros simuladores climáticos como WGEN, USCLIMATE, e WM2, é a sua capacidade de simular a duração da chuvada, intensidade máxima e tempo para atingir a intensidade máxima. Estes valores são necessários para prever a quantidade de escoamento e intensidade máxima de escoamento que por sua vez determinam a quantidade de erosão de solo durante eventos em que se verifica escoamento (Yu, 2003). A intensidade máxima de precipitação influencia profundamente a previsão de solo pelo WEPP uma vez que afecta directamente a erosão laminar, e indirectamente afecta a erosão nos sulcos através do seu efeito no escoamento máximo, volume de escoamento e tensão crítica de arrastamento (Yu, 2000).

O CLIGEN é um modelo estocástico ou probabilístico de simulação climática que produz séries temporais de estimativas de precipitação, temperatura, ponto de orvalho, vento e radiação solar, para um dado ponto geográfico, baseado em valores estatísticos mensais tais como média, desvio padrão e coeficiente de assimetria, para o período de registo climático. As estimativas de cada parâmetro são simuladas independentemente de todos os outros. Com o gerador de número aleatório que possui, correndo o programa várias vezes no mesmo computador, produzirá resultados idênticos.

3.2.2. História do desenvolvimento do CLIGEN

O modelo CLIGEN foi desenvolvido inicialmente por Nicks *et al.*, (1995) no laboratório do Agricultural Research Service (ARS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em Durant, Oklahoma. Seguidamente, Scheele *et al.*, (2001) continuaram o trabalho no código deste programa de modo a gerar os parâmetros mensais necessários pelo CLIGEN, a partir de dados históricos. Fizeram uma revisão dos dados climáticos existentes e adicionaram uma grande quantidade de estações climáticas nos Estado Unidos. Yu (2000) verificou que os cálculos de intensidade de precipitação não apresentavam valores correctos devido a um erro de conversão de unidades da intensidade máxima de 30 minutos, pelo que os valores deste parâmetro eram interpretados como sendo 25.4 vezes superiores ao que deviam ser. Fez então as seguintes correcções:

-
1. diferentes valores por defeito para o número de dias de chuva quando a probabilidade condicional de dia chuvoso é zero e de precipitação para dia chuvoso quando precipitação média por dia chuvoso é zero;
 2. na conversão do máximo mensal de 30 minutos de precipitação (para cada dia chuvoso) para a média mensal (de todos os dias chuvosos) da precipitação máxima mensal de 30 minutos;
 3. no cálculo da intensidade máxima de precipitação instantânea.

Meyer (2004a) reviu o código e incluiu as alterações sugeridas por Yu (2000) e incluiu correcções de problemas aritméticos que se verificavam quando se fazia correr o programa em ciclos longos. Verificou-se posteriormente a existência de problemas com a geração de números aleatórios, incluindo um mau ajustamento entre as médias mensais simuladas e as observadas, e que o modelo não produzia números aleatórios com uma distribuição uniforme. Meyer *et al.*, (2002) introduziram um controlo de qualidade dos números aleatórios de modo a corrigir este erro.

Na resposta às preocupações levantadas com as alterações bruscas de parâmetros de um mês para o seguinte Meyer, (2004a) também introduziu quatro opções de interpolação para as médias mensais de dados climáticos: sem interpolação; interpolação linear simples; série de Fourier; interpolação linear modificada que preserva o valor médio de um parâmetro mês a mês.

Em Janeiro de 2001 foi lançada a versão 5.1 do CLIGEN, tendo as versões seguintes recebido o número 5.1xx (O'Neal *et al.*, 2002)

O CLIGEN é um simulador climático estocástico que produz séries temporais diárias de estimativas de precipitação, temperatura, ponto de orvalho, vento e radiação solar, para um local geográfico, baseado em medições mensais médias para o período de registo histórico, tal como médias, desvio padrão e distorção. À excepção das temperaturas, as estimativas diárias de cada parâmetro, são estimadas independentemente das outras. Com o gerador de números aleatórios actual, quando se corre o modelo sucessivamente no mesmo computador, obter-se-ão resultados idênticos (Meyer, 2004a)

Os utilizadores do CLIGEN devem considerar os impactos das suas características na sua aplicação. Pode esperar-se que as distribuições dos parâmetros individualmente reproduzam bem as distribuições históricas. No entanto, se a nossa aplicação é sensível à interacção de dois ou mais parâmetros produzidos pelo CLIGEN, provavelmente não será

este o melhor simulador climático. Isso porque, para um dado dia a radiação solar e as temperaturas máximas e mínimas é simulado independentemente da precipitação. A experiência e o sentido comum dizem que estes parâmetros não são independentes. Na prática, isto pode não ser um grande problema uma vez que muitos modelos, como é o caso do modelo WEPP, são sensíveis a um parâmetro e relativamente insensíveis a outros.

Há algumas verificações de lógica integrada no CLIGEN. Apesar de poderem alterar as distribuições de cada parâmetro individualmente, ganha-se em termos de estes valores fazerem mais sentido individualmente e entre si. Por exemplo, não se permite que a precipitação seja negativa; e a temperatura mínima é obrigada a ser inferior à máxima. A radiação solar também está condicionada dentro de certos limites.

Um dos parâmetros que tem sofrido mais alterações com os trabalhos de diversos autores tem sido o referente à duração das chuvadas. Nicks *et al.*, (1995) calculam a duração da chuvada (D em horas) como

$$D = \frac{9.210}{-2 \ln(1 - rI)} \quad \text{Eq. 3.1}$$

em que rI é um parâmetro adimensional da distribuição gama das quantidades médias mensais de 30 minutos de precipitação. Esta equação foi desenvolvida assumindo uma chuvada com a duração máxima de 24 horas e que o tempo para a intensidade máxima corresponde a 40% da duração total da chuvada (Arnold e Williams, 1989). No entanto, segundo Elliot e Arnold, (2001) os algoritmos estatísticos do CLIGEN foram baseados nos climas do centro e sul dos Estados Unidos. Yu (2000) propõe que a constante no numerador da Eq. 3.1 seja substituído por Δ que pode ser interpretado como a média da relação entre a intensidade máxima e a intensidade média da precipitação. Para um conjunto de estações meteorológicas na Austrália, Yu (2000) verificou que este valor varia de 3,7 a 4,5 com um valor médio de 3,99. Este valor é o actualmente definido internamente pelo CLIGEN (Yu, 2003).

3.2.3. O que faz e como faz?

O CLIGEN gera nove resultados diários a partir de análises estatísticas de dados meteorológicos observados:

- Probabilidade de Precipitação (para cada dia)
- Quantidade de Precipitação

-
- Tempo para a intensidade máxima
 - Temperatura Máxima
 - Temperatura Mínima
 - Temperatura do ponto de orvalho
 - Radiação solar
 - Direcção do vento
 - Velocidade do vento

Para cada um destes valores, é utilizado um pseudo gerador de número aleatório, que produz uma distribuição uniforme de números aleatórios com valores compreendidos entre zero e um. Para cada parâmetro produzido é utilizado um número semente (seed) diferente, o que garante que os conjuntos de números aleatórios utilizados para simular cada parâmetro são independentes.

Um gerador de números aleatórios funciona do seguinte modo: recebe o número gerado anteriormente pelo simulador e produz um novo número aleatório. O número usado como entrada da *primeira* execução do simulador é conhecido como *número semente* (também designado “ponto de partida”), e faz com que, para um mesmo comando, a série de números aleatórios a obter seja idêntica.

Para simular todos os nove parâmetros, o CLIGEN utiliza as médias mensais e desvio padrão do período de observações para o local.

Assume-se que as temperaturas máxima, mínima e de ponto de orvalho têm distribuição normal. Os valores diários são simulados multiplicando o desvio padrão normal (positivo ou negativo) pelo desvio padrão do parâmetro para o mês corrente, e adicionando-o à média mensal. No entanto, este pressuposto da distribuição normal da temperatura é posta em causa por Harmel *et al.*, (2001) que verificaram que num conjunto de 15 estações meteorológicas nos Estados Unidos, a temperatura mínima e máxima não seguem uma distribuição normal, mas são ligeiramente distorcidas. Este aspecto não afecta as médias mensais, mas pode ter influência na determinação de períodos sem formação de geada.

Para a precipitação, as coisas são um pouco mais complicadas. A precipitação é calculada utilizando a distribuição conjunta da probabilidade de ocorrência de precipitação hoje, sabendo que ontem ocorreu ou não ocorreu precipitação. Isto é, o CLIGEN utiliza a probabilidade de um dia chuvoso a seguir a um dia seco e um dia seco a seguir a um dia chuvoso. O número aleatório gerado é comparado com a probabilidade de ocorrência de

precipitação hoje, sabendo que o dia de ontem foi chuvoso ou seco. Se ocorre precipitação, a sua quantidade é simulada por uma equação de Pearson tipo III e da assimetria mensal, para além da média e desvio padrão mensal. Assume-se que a precipitação tem uma distribuição normal assimétrica.

O CLIGEN gera quatro variáveis relacionadas com a precipitação em cada dia chuvoso (Nicks *et al.*, 1995): quantidade de precipitação P (mm), duração da precipitação D (h), tempo para a intensidade máxima como uma fracção da duração da precipitação, t_p , e relação entre a intensidade máxima e a intensidade média, i_p . No CLIGEN, o tempo é normalizado pela duração da precipitação, D , e a intensidade da precipitação é normalizada pela intensidade média P/D . Deste modo, t_p e i_p são variáveis adimensionais, a que nos referiremos respectivamente como tempo para a intensidade máxima normalizado e intensidade máxima normalizada.

No WEPP é utilizada uma função dupla exponencial para descrever o padrão da intensidade normalizada (Yu, 2003):

$$i(t) = \begin{cases} i_p e^{b(t-t_p)} & 0 \leq t \leq t_p \\ i_p e^{-bt_p(t-t_p)/(1-t_p)} & t_p \leq t \leq 1 \end{cases} \quad \text{Eq. 3.2}$$

em que b é um parâmetro que depende de t_p e i_p :

$$i_p(1 - e^{-bt_p}) - bt_p = 0 \quad \text{Eq. 3.3}$$

O padrão de precipitação utilizado pelo WEPP é definido unicamente pelas quatro variáveis definidas pelo CLIGEN. Tendo como base este padrão de chuvada o WEPP utiliza a equação de Green-Ampt para prever o escoamento e a intensidade máxima de precipitação (Stone *et al.*, 1995).

Para ilustrar o padrão de chuvada gerado pelo CLIGEN apresentamos na Fig. 3-1 um exemplo de chuvada observado e o respectivo padrão gerado pelo CLIGEN. A duração da chuvada foi de 8,7 horas em que se verificaram 107 mm de precipitação. A intensidade máxima instantânea foi de 97,9 mm de modo que i_p foi de 7,96 mm. O tempo para a intensidade máxima foi de 3,55 horas com $t_p = 0,408$. Pode verificar-se que o WEPP preserva a quantidade total e intensidade máxima, mas perde muita informação sobre a variação de intensidade dentro do evento.

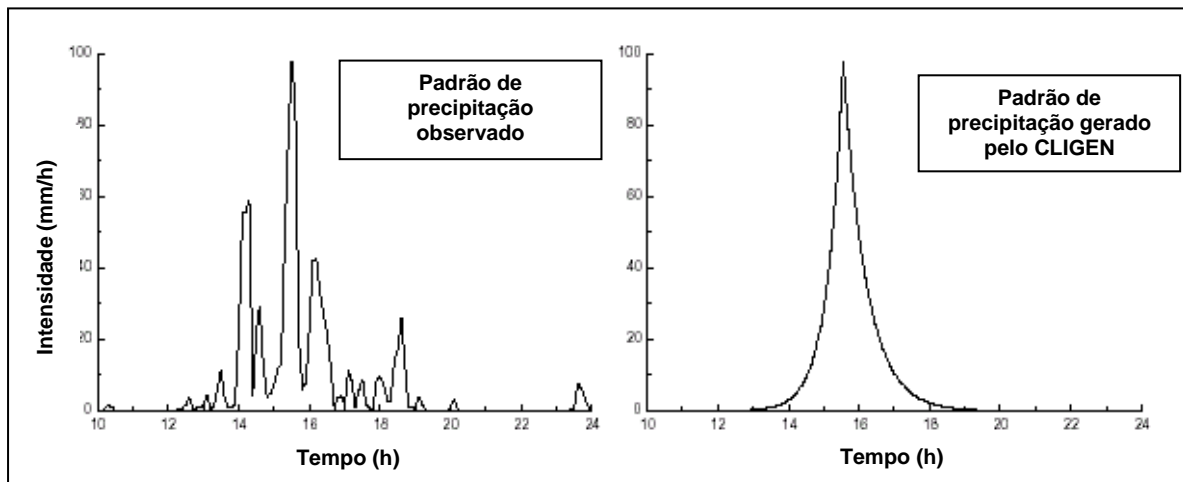


Fig. 3-2 - Exemplo de uma chuvada observada e o padrão adoptado pelo CLIGEN e WEPP (Yu, 2003)

Para simular a radiação solar, é produzido uma distribuição normal e multiplicada pelo desvio padrão mensal (tal como na temperatura). Este valor é então multiplicado por $\frac{1}{4}$, a diferença entre a média mensal e o seu máximo teórico é adicionado à média mensal.

O número e distribuição de acontecimentos chuvosos são simulados utilizando o modelo de Markov em cadeia de dois estádios. Dada a condição inicial que o dia anterior foi chuvoso ou seco, o modelo determina estocasticamente se ocorre ou não precipitação no dia corrente. É gerado um número aleatório (compreendido ente 0 e 1) e comparado com a probabilidade apropriada dia com precipitação / dia sem precipitação. Se o número aleatório é inferior a ou igual à probabilidade de dia com precipitação / dia sem precipitação, ocorre precipitação naquele dia. Números aleatórios maiores que a probabilidade de dia com precipitação / dia sem precipitação são dias em que não ocorre precipitação. Quando ocorre precipitação, a quantidade de precipitação é determinada a partir de uma função assimétrica normal de distribuição. A duração da precipitação para acontecimentos individuais é simulada a partir de uma distribuição exponencial utilizando a duração média mensal. A precipitação diária é dividida entre precipitação e queda de neve utilizando a temperatura diária do ar. As temperaturas diárias máximas e mínimas e a radiação solar são simulados a partir de funções normais de distribuição (NSERL, 2004).

Esquemáticamente o funcionamento do CLIGEN é o que se indica na Fig. 3-3.

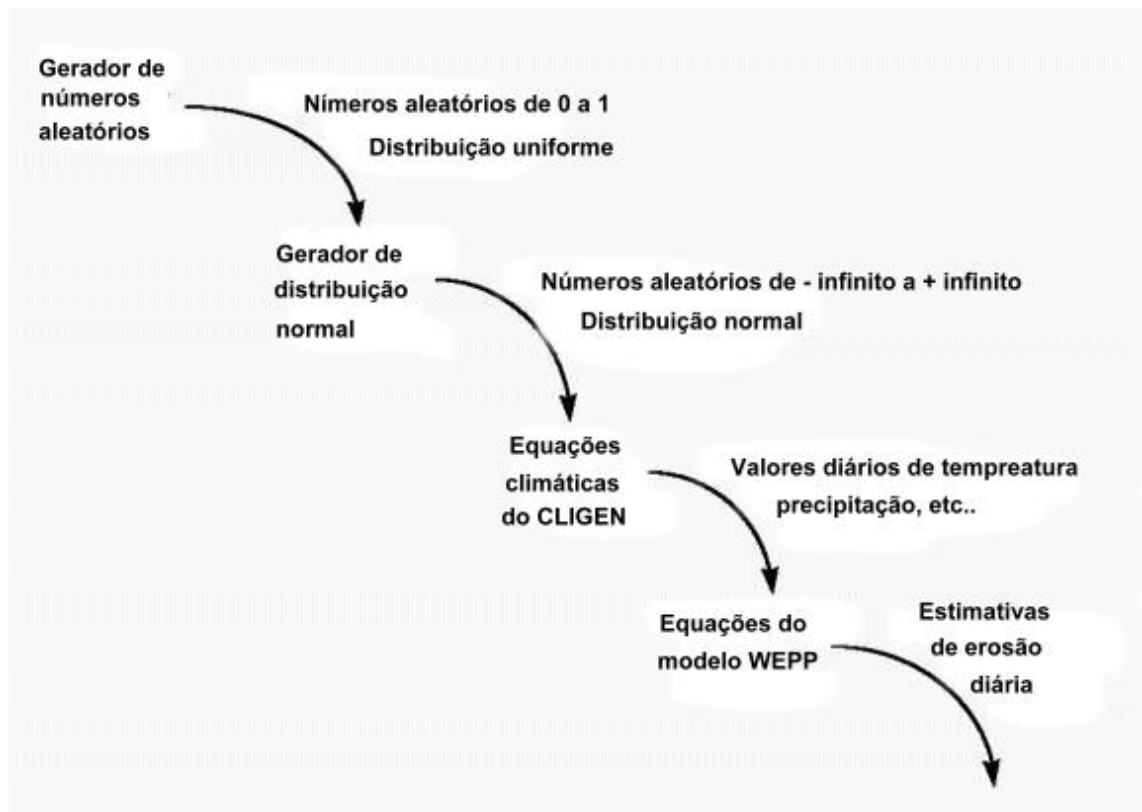


Fig. 3-3 – Esquema de funcionamento do CLIGEN (NSERL, 2004)

3.2.4. Para que serve?

Uma das maiores restrições à utilização de modelos fisicamente baseados é a obtenção de conjuntos de dados, em quantidade e de boa qualidade. Apesar de este problema ser universal, é ainda mais premente em zonas onde não se dispõe de informação. Com o advento da informática, os modelos de nova simulação, são habitualmente fornecidos com ferramentas para criar os ficheiros de introdução de dados exigidos pelo modelo. O modelo CLIGEN é um programa isolado, que fornece os dados de entrada para o modelo WEPP e tem uma base de dados climáticos para cerca de 2600 estações meteorológicas nos Estados Unidos (Flanagan *et al.*, 2001).

3.2.5. Porque não há ficheiros de parâmetros fora dos Estados Unidos?

Sendo o Modelo WEPP desenvolvido nos Estados Unidos, é natural que compreenda as situações de solo e clima prevalentes neste país. Isto compreende-se, até porque sendo desenvolvido por uma agência governamental, são os contribuintes deste país que o

custeiam. Deste modo, só estão disponíveis ficheiros de parâmetros para cerca de 2600 estações meteorológicas nos Estados Unidos. Os utilizadores do modelo WEPP fora dos Estados Unidos são encorajados a:

- a) Utilizar o ficheiro de parâmetros climáticos de uma estação meteorológica no território dos Estados Unidos com um clima semelhante à zona onde pretendem aplicar o modelo; ou
- b) Elaborar o seu próprio ficheiro de parâmetros climáticos.

Se a hipótese escolhida for a segunda, então estão disponíveis o código fonte e o compilador necessário para a formulação do modelo de simulação climática. (Meyer, 2004a).

As informações necessárias para elaborar um ficheiro de entrada de dados são (Meyer, 2004a):

- Nome da estação climática;
- Latitude e longitude;
- Número de anos de registo;
- Altitude acima do nível do mar;

Os parâmetros estatísticos necessários para a caracterização climática são:

- Quartil de ocorrência da intensidade máxima de precipitação;
- Altura máxima de 30 minutos e de 6 horas de precipitação;
- Precipitação média equivalente para os dias em que ocorre precipitação¹²;
- Desvio padrão da precipitação diária (por mês);
- Coeficiente de assimetria do valor da precipitação diária (por mês);
- Probabilidade de um dia chuvoso¹³ a seguir a um dia chuvoso (por mês);
- Probabilidade de um dia chuvoso a seguir a um dia seco (por mês);
- Média e desvio padrão mensais da temperatura máxima e mínima diária;
- Média e desvio padrão mensais da radiação solar média diária;
- Intensidade máxima média diária de 30 minutos de precipitação (por mês);
- Média mensal da temperatura do ponto de orvalho;

¹² Corresponde ao quociente entre a precipitação média mensal e o número de dias em que ocorre precipitação nesse mês.

- Valores mensais da distribuição acumulada do tempo calculado para a intensidade máxima de precipitação;
- Valores relativos à direcção e velocidade do vento. Para cada uma das 16 direcções consideradas: percentagem de tempo que o vento sopra dessa direcção, velocidade média do vento, desvio padrão da velocidade do vento, coeficiente de assimetria da velocidade do vento, (valores mensais). É necessário também a informação da percentagem de tempo em que não há vento (por mês);

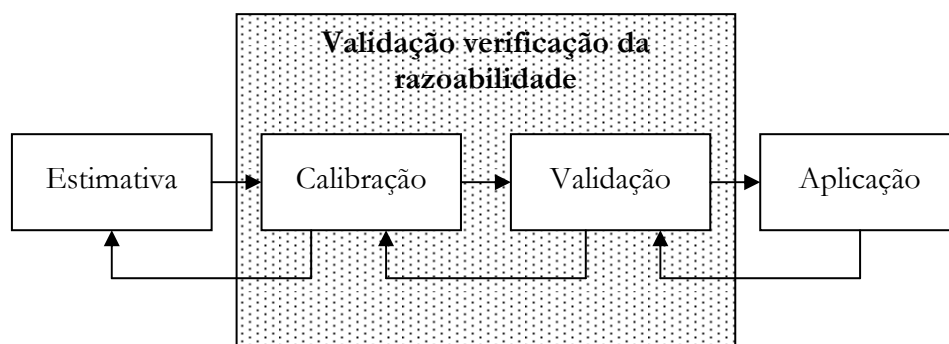
Com estes parâmetros introduzidos, o modelo pode simular estocasticamente dados climáticos, para um período de n anos (número a definir pelo utilizador).

Seguidamente devem ser feitos testes estatísticos que nos permitam confirmar se os dados apresentam as mesmas características estatísticas que os que lhe deram origem, ou seja proceder à calibração e validação do modelo (Meyer, 2004a).

O modelo CLIGEN não tem sido muito testado fora dos Estados Unidos. Segundo Yu (2003) o modelo terá sido utilizado em dois locais na Austrália (Yu, 2000) quatro no Brasil (Favis-Mortlock e Guerra, 1999) e em dois locais na Inglaterra. É mais fácil a utilização do CLIGEN nos Estados Unidos devido à existência de ficheiros de parâmetros.

3.2.6. Necessidades de calibração e validação

O processo de validação e calibração de um modelo, pode ser representado graficamente da seguinte forma (United States Department of Transportation, 2001)



¹³ Definido como dia com precipitação

Estimação do modelo: são utilizados processos de estimação estatística para encontrar os valores dos parâmetros do modelo (nomeadamente coeficientes) que maximizam a probabilidade de os valores se ajustarem aos dados observados. O objectivo é especificar correctamente a forma do modelo e determinar o significado estatístico das variáveis.

Calibração do modelo: depois da estimativa dos parâmetros do modelo, é realizada a sua calibração para ajustar os parâmetros até que os valores previstos se ajustem aos observados. Para tal estão disponíveis o código fonte em linguagem Fortran (Meyer, 2004).

Validação do modelo: de modo a testar a capacidade de o modelo prever o comportamento futuro, é necessário comparar as previsões do modelo com outra informação não utilizada na estimação do modelo. Este processo é tipicamente um processo iterativo, ligado à calibração do modelo. Envolve a comparação do modelo com valores observados ajustar os parâmetros até que os resultados do modelo estejam dentro de uma determinada margem de erro.

Aplicação do modelo: apesar de o modelo poder representar bem as condições presentes, a aplicação do modelo a condições futuras exige verificar a razoabilidade das previsões, de modo que também existe uma ligação entre a aplicação e a validação. A sensibilidade do modelo e o modo como responde a alterações do sistema é uma questão fundamental na aplicação do modelo.

Esquematicamente, o procedimento a seguir será o indicado na Fig 3.1

.

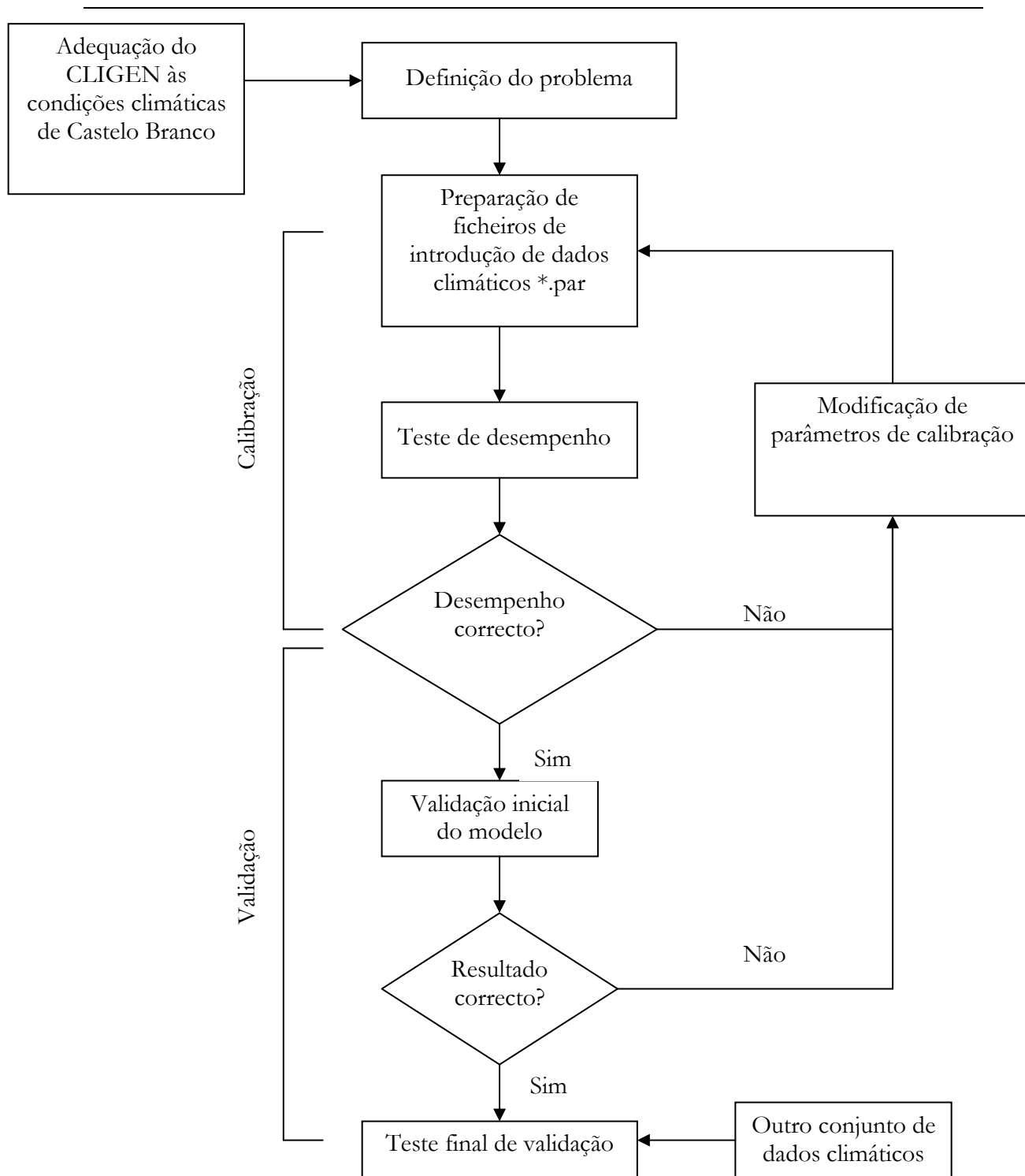


Fig. 3-4 - Procedimento utilizado para calibração e validação de um modelo

3.3. Dados e programas informáticos utilizados

Para a calibração do modelo CLIGEN, foram utilizados os seguintes elementos:

Precipitação: dados recolhidos no local do ensaio desde 1991 com uma resolução temporal de 10 minutos.

Temperatura do ar (máxima e mínima diárias), velocidade do vento: recolhidos no posto meteorológico da Escola Superior Agrária, a cerca de 300 m do local do ensaio.

Programas informáticos:

Modelo WEPP: obtido a partir de NSERL (2004) (versão 2002.700), WEPP Windows interface (Março 2004)

Modelo CLIGEN versão 5.2254 obtido a partir de NSERL, (2004).

3.4. Aspectos a calibrar/validar

O nosso trabalho dividiu-se em duas fases: calibração e validação.

3.4.1. Fase de calibração

A partir dos dados climáticos de Castelo Branco, elaborámos o ficheiro de parâmetros para Castelo Branco (*.par), uma vez que dispomos de todos os dados para determinar os parâmetros relativos à temperatura e precipitação. Não houve preocupação com os valores referentes à velocidade e direcção do vento, uma vez que estes valores só vão ter influência na acumulação e fusão de neve (Nicks *et al.*, 1995), fenómeno raro em Castelo Branco. Influenciam também a evapotranspiração, fenómeno que não é objecto de estudo neste trabalho. Para além disso, no nosso trabalho apenas pretendemos estudar a simulação que o CLIGEN faz da ocorrência e quantidade de precipitação. No entanto, uma vez que o modelo exige que as linhas com estes valores não estejam em branco (caso contrário o modelo dá erro), utilizámos os dados de uma estação dos Estados Unidos, seleccionada aleatoriamente.

O ficheiro *.par criado, tem o seguinte aspecto:

```
Castelo Branco
LATT= 39.49 LONG= -7.29 YEARS= 12. TYPE= 2
ELEVATION = 1120. TP5 = 0.54 TP6= 2.04
MEAN P 0.29 0.19 0.18 0.21 0.20 0.12 0.16 0.14 0.21 0.28 0.32 0.26
S DEV P 0.36 0.24 0.21 0.24 0.24 0.11 0.15 0.10 0.23 0.38 0.38 0.31
SKEW P 1.91 1.74 1.58 1.78 1.94 1.71 1.43 0.34 1.43 2.04 1.74 1.83
P(W/W) 0.65 0.63 0.48 0.61 0.59 0.32 0.23 0.19 0.45 0.62 0.60 0.68
P(W/D) 0.33 0.35 0.22 0.31 0.24 0.12 0.04 0.05 0.16 0.30 0.45 0.39
TMAX AV 53.54 58.02 64.26 65.58 73.00 82.95 91.18 89.83 82.00 70.65 60.50 54.66
TMIN AV 37.93 39.89 42.92 44.81 50.47 56.29 62.04 60.27 57.51 51.51 44.08 40.58
SD TMAX 4.81 5.52 7.38 8.60 8.76 8.81 7.60 6.91 8.60 6.93 5.67 5.02
SD TMIN 6.38 5.67 5.33 5.12 5.26 5.14 5.35 5.01 5.15 5.58 6.62 7.13
SOL.RAD 26.0 42.0 67.0 71.0 66.0 81.0 87.0 78.0 63.0 46.0 25.0 21.0
SD SOL 13.0 12.6 7.7 17.3 20.3 21.7 14.9 13.4 15.5 17.1 12.3 12.3
MX .5 P 0.65 0.87 0.93 0.96 0.94 0.79 1.01 0.39 0.79 1.09 0.87 0.91
DEW PT 36.70 36.38 38.96 40.52 46.99 50.14 50.90 2.00 1.00 9.00 8.00 6.00
Time Pk 2.643 1.556 1.780 1.239 0.976 1.212 0.722 0.667 1.183 1.264 1.937 2.474
% N 4.89 6.25 6.23 7.19 7.10 6.41 5.56 5.32 6.00 6.00 5.09 4.75
MEAN 3.23 3.74 3.77 4.09 3.69 3.24 2.73 2.73 3.03 3.48 3.15 3.12
STD DEV 1.95 2.25 2.09 2.34 1.91 1.68 1.20 1.25 1.53 1.91 1.75 1.79
SKEW 1.45 1.04 1.07 1.01 1.01 1.24 1.18 1.62 1.47 1.06 1.22 1.36
(...)
CALM 35.08 28.54 20.48 18.80 17.83 19.20 22.45 23.24 27.94 33.58 37.73 41.20
```

Uma das principais dificuldades com que nos deparámos na elaboração deste ficheiro, diz respeito às unidades. De facto, as unidades utilizadas neste ficheiro são unidades do sistema imperial inglês, enquanto as unidades produzidas pelo CLIGEN, podem vir em unidades do sistema métrico ou imperial inglês. Por isso foi necessário converter inicialmente cada um dos valores de precipitação de milímetro para polegada e temperatura de grau Centígrado para grau Fahrenheit utilizando para isso a metodologia ou a conversão de unidades descritas nas fórmulas publicadas pela Soil Science Society of America Journal. Houve o cuidado de converter primeiro cada valor diário e só depois calcular a média e desvio padrão.

No Anexo I indica-se o significado de cada linha de informação do ficheiro de acordo com (Flanagan, 2001).

Uma vez elaborado o ficheiro de parâmetros climáticos, fizemos correr o modelo CLIGEN 5.2, por um período de 100 anos, com o valor de defeito para semente de números aleatórios aleatória, sem interpolação, tal como referido por (Zhang e Garbrecht, 2003).

Para preparar os dados climáticos com vista à elaboração do ficheiro de parâmetros utilizámos os dados de precipitação registados pelo udógrafo de báscula do ensaio com resolução temporal de 10 minuto, para determinar as seguintes características da precipitação diária: quantidade total de precipitação (P), duração da precipitação (D) tempo para a intensidade máxima como fracção da duração da precipitação (t_p) e a relação entre a intensidade máxima e a intensidade média, (i_p). A quantidade de precipitação diária é a que ocorre no período das 0 às 24 hora. A duração da chuvada é o número de intervalos em que se verificou precipitação \times 10 minuto. Todos os intervalos em que não se verificou precipitação foram ignorados. A intensidade máxima de precipitação é definida como a precipitação total a dividir pela duração da precipitação e o valor de i_p é o quociente entre a intensidade horária máxima ocorrida num intervalo de 10 minuto e a intensidade média. O tempo para a intensidade máxima é o tempo decorrido entre o primeiro intervalo chuvoso e o ponto médio do intervalo em que ocorre a intensidade máxima. Foram ignorados os intervalos sem precipitação e t_p é o quociente entre o tempo para a intensidade máxima e a duração total da chuvada. O processo acima descrito é idêntico ao descrito por Yu (2003) excepto que este autor utilizou dados de precipitação com intervalos de 6 minuto.

3.4.2. Fase de validação

Para a validação do modelo a CLIGEN e eventuais alterações a realizar, utilizaremos um outro conjunto de dados não utilizados anteriormente, concretamente dados da estação meteorológica de Castelo branco, do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

3.4.3. Perspectivas de trabalho futuras

Tendo obtido parâmetros com os dados climáticos de Castelo Branco, passaremos à validação do modelo com outros dados meteorológicos, não utilizados anteriormente.

Serão realizados os mesmos testes que na fase de calibração. Se se verificar uma boa aderência entre os valores observados e os valores simulados, então poderemos afirmar que o modelo de simulação climática CLIGEN é adequado para as condições climáticas de

Castelo Branco. Se não se verificar uma boa aderência entre os valores observados e os valores simulados será necessário proceder a alterações no modelo.

Numa fase posterior a este trabalho, pretendemos realizar outros trabalhos de calibração/validação do modelo WEPP, para as condições de clima e solos de Castelo Branco.

Esse trabalho de calibração/validação será feito utilizando metodologia idêntica à utilizada por Tomás (1997), Baffaut *et al.*, (1998) e Risse *et al.*, (1995)

Resumidamente, a metodologia a aplicar, baseia-se no seguinte:

Utilização de dados climáticos observados, evento a evento (considerado um evento uma chuvada ou conjunto de chuvadas, no final do qual se procedeu a uma recolha de amostras de água).

Para o funcionamento do modelo WEPP, há quatro parâmetros de solo que o WEPP utiliza, mas que não são habitualmente determinados experimentalmente:

- Condutividade hidráulica efectiva, K_b ;
- Erodibilidade intersulcos, K_i ;
- Erodibilidade nos sulcos, K_r ;
- Tensão crítica de arrastamento do solo, τ_c

Por norma, o WEPP determina o valor destes parâmetros internamente, utilizando as fórmulas internas do programa, a partir de características do solo, como percentagem de areia, percentagem de areia muito fina, percentagem de argila, capacidade de troca catiónica, número de curva para o escoamento (SCS CN), percentagem de matéria orgânica.

O procedimento de optimização a utilizar será o seguinte:

Fazer correr o modelo com os valores gerados internamente, e verificar se os valores gerados de escoamento são iguais aos valores observados, evento a evento. Se não forem iguais, então iremos manipular os valores de condutividade hidráulica efectiva até que estes valores sejam iguais. Este valor representará a condutividade hidráulica optimizada para esse evento. Se não se conseguir a igualdade de valores, será considerado o valor com o menor erro.

Uma vez acertados os valores de escoamento, evento a evento, proceder-se-á de igual modo para os outros parâmetros, tentando que os valores de perda de solo previstos sejam

iguais aos observados, ou que minimizem os erros. Estes valores corresponderão aos parâmetros de solo para cada evento.

Para determinar a eficiência do modelo, para o cálculo do escoamento e da perda de solo, utilizaremos o termo Eficiência do Modelo tal como proposto por Nash e Sutcliffe, (2004) que avalia a aderência entre os valores observados e os previstos pelo modelo do seguinte modo:

$$ME = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{prev})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{med})^2} \quad \text{Eq. 3.4}$$

em que ME é a eficiência do modelo, Y_{obs} são os resultados medidos, Y_{prev} são os resultados previstos pelo modelo e Y_{med} são os resultados médios medidos de todos os eventos. De modo semelhante ao coeficiente de determinação, quando a eficiência do modelo toma o valor 1, isso indica uma concordância perfeita entre os valores medidos e previstos, e valores menores uma menor correlação.

4. Resultados obtidos com o modelo CLIGEN

A versão do modelo WEPP utilizada neste trabalho, com interface de 17 de Março de 2004 possui um editor de ficheiro *.par. Esta interface parece ser de grande utilidade, principalmente quando se dispõe dos dados meteorológicos em unidades SI. Outra das grandes vantagens é que permite fazer alterações de parâmetros de precipitação (por exemplo, modificar a precipitação média em dias chuvosos ou as probabilidades de ocorrência de dias secos e chuvosos) e verificar imediatamente em termos globais, as alterações que se verificam.

Os valores são introduzidos em unidades do sistema imperial inglês mas podem ser convertidas em unidades SI.

Os autores desta interface fazem as seguintes observações (NSERL, 2004):

Alterar os valores de modo a estar de acordo com as condições locais. O tempo para a intensidade máxima representa a distribuição acumulada dos valores de T_p baseados em precipitação de 15 minutos.

A precipitação média mensal e o número de dias chuvosos são calculados a partir das probabilidades de dia chuvoso a seguir a dia chuvoso e de dia chuvoso a seguir a dia seco. Para ajustar a precipitação média mensal, alterar os campos de probabilidade e recalcular.

No nosso trabalho, não utilizámos esta interface uma vez dispúnhamos das médias mensais de precipitação e pudemos calcular as probabilidades de ocorrência de dia chuvoso a seguir a dia seco e de dia chuvoso a seguir a dia chuvoso.

Na Tabela 4.1 apresentam-se as Estatísticas observadas da precipitação mensal obtidas utilizando os dados de anos hidrológicos de 1987/1988 a 2002/2003, na estação meteorológica da Escola Superior Agrária de Castelo Branco (anos 1987 a 1991) e na estação experimental de erosão do solo da Escola Superior Agrária de Castelo Branco (1991 a 2003).

Tabela 4.1. Estatísticas observadas da precipitação mensal em Castelo Branco

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Precipitação média mensal (mm)	116,9	59,1	52,7	55,3	66,1	12,9	6,4	6,7	41,7	122,9	107,1	119,7
Desvio padrão	92,9	55,3	43,4	39,6	53,6	24,7	11,2	9,4	33,2	94,9	88,8	113,8
Assimetria	1,7	1,0	0,6	1,8	0,7	3,3	2,2	1,4	0,6	1,2	1,5	0,9
Número de dias de precipitação (d)	15,1	12,8	8,9	12,2	11,4	4,6	1,6	1,7	7,2	14,1	13,8	16,7
Desvio padrão	6,7	4,2	6,0	5,6	5,0	4,5	1,6	1,5	4,4	6,3	6,7	7,0
P (WW)	0,65	0,63	0,48	0,61	0,59	0,32	0,23	0,19	0,45	0,62	0,60	0,68
P (WD)	0,33	0,35	0,22	0,31	0,24	0,12	0,04	0,05	0,16	0,30	0,45	0,39
I 30 máximo	16,4	22,0	23,6	24,4	24,0	20,0	25,6	10,0	20,0	27,6	22,0	23,2

No Anexo II apresenta-se o extracto do ficheiro de parâmetros relativo aos parâmetros de precipitação.

Foram feitas comparações entre os dados observados e os dados simulados estocasticamente pelo CLIGEN. Foram calculadas as médias de precipitação mensal e anual e respectivo desvio padrão, número de dias de precipitação e respectivo desvio padrão, P (W/W) e P (W/D) e foram feitos testes de comparação entre as médias das populações de valores simulados e de valores observados.

4.1. Definições de variáveis estatísticas

Designa-se por **coeficiente de assimetria** o quociente:

$$\gamma_1 = \frac{E(X - \mu)^3}{\sigma^3} = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad \text{Eq. 4.1}$$

em que μ_3 é o terceiro momento em relação à média da população e σ o desvio padrão. Um coeficiente de assimetria nulo indica que a população tem uma distribuição simétrica em torno da média. Quando o coeficiente de assimetria tem um valor positivo (a distribuição é «mais abrupta do lado esquerdo»), predominam os desvios positivos e quando tem um valor negativo predominam os desvios negativos (a distribuição é «mais abrupta do lado direito») (Murteira *et al.*, 2001).

Designa-se por **coeficiente de excesso** ou de **curtose** o quociente:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad \text{Eq. 4.2}$$

em que μ_4 é o quarto momento em relação à média da população e σ o desvio padrão. Um valor de curtose superior a 3 apresenta uma distribuição com caudas mais “espessas” (zona central mais “pontaguda”) que a distribuição normal (*leptokurtica*). Quando o valor de curtose é inferior a 3 tem-se uma distribuição com caudas mais “finas” (zona central mais “achatada”) que a distribuição normal (*platikurtica*). Quando curtose toma o valor de 3 designa-se por *mesokurtica* (Murteira *et al.*, 2001)

4.2. Resultados da simulação

Uma vez introduzidos os parâmetros climáticos obtidos a partir dos registos históricos, fizemos correr o modelo CLIGEN de modo a gerar uma série estocástica de 100 anos de dados. A partir dos dados de 100 anos gerados estocasticamente pelo CLIGEN, foram calculadas valores estatísticos mensais e anuais, incluindo média, desvio padrão, coeficientes de assimetria e de curtose, percentis, valores máximos e mínimos. Estes valores foram então comparados com as médias mensais observadas a partir dos dados históricos utilizados para calcular os parâmetros de simulação. Foi calculado também o erro relativo (ER) como o quociente entre a diferença entre os valores gerados e os valores observados sobre os valores observados. Foi realizado o *teste-t* de comparação de médias entre os valores observados de precipitação mensal e os valores gerados pelo CLIGEN. Foi utilizado um nível de significância de 5%. Geralmente, para a realização do *teste-t* assume-se a que as populações têm uma distribuição normal e que há igualdade de variâncias. Podemos ignorar estas exigências quando as amostras são de grande dimensão. Segundo Ott (1988) “quando as suposições de normalidade e igualdade de variâncias não são válidas mas as populações são grandes, os resultados de um *teste-t* são aproximadamente correctos”.

Para comparação dos desvios padrão foi utilizado o *Teste F*.

Para o nível de significância escolhido, rejeita-se a hipótese nula (“**Rejeitar H0**”) quando se rejeita a hipótese de igualdade de médias entre os valores observados e os valores gerados pelo CLIGEN. Caso contrário, não se rejeita a hipótese nula (“**Não rejeitar H0**”)

Os valores estatísticos observados e simulados foram precipitação média mensal, número de dias de precipitação mensal, precipitação diária máxima mensal e precipitação média em dia chuvoso.

Para o número de anos da nossa base de dados (18 anos), para o número de anos simulados (100 anos) e para o valor de Alfa definido (5%), o valor tabelado da distribuição *F-Snedcor* é de 2,32 e o valor de tabelado da distribuição *t-Student* é de 1,658 (Murteira *et al.*, 2001).

4.2.1. Precipitação mensal

Na Tabela 4.2 indicam-se as Estatísticas da precipitação mensal observadas e simuladas pelo CLIGEN. Podemos observar que, a precipitação média mensal simulada pelo CLIGEN não difere significativamente dos valores observados (t calculado $<$ t tabelado) excepto no mês de Abril. Em termos anuais o erro relativo foi de -1,73%. No entanto, os desvios padrão diferem significativamente em todos os meses, excepto em Abril, com erro relativo entre 29 e 69% sendo sistematicamente menores nos valores gerados pelo CLIGEN. Elliot e Arnold (2001) obtiveram resultados idênticos com dados de precipitação em dois locais no Uganda em que o CLIGEN também gerou menores valores de desvio padrão. Isto pode ser devido à maior variabilidade na previsão de dias chuvosos. Uma das explicações possíveis para este fenómeno é que o CLIGEN assume certos valores que são válidos no centro dos Estados Unidos, mas não são válidos em regiões com grande variabilidade de precipitação (Elliot e Arnold, 2001).

O coeficiente de assimetria observado e gerado tem sempre valores positivos, o que indica que a distribuição é mais abrupta do lado esquerdo, ou seja, predominam valores mais baixos. Tal não surpreende, devido ao facto de haver um maior número de meses com precipitação mais baixa do que muito elevada. No entanto, o erro relativo varia entre 89% e -54%, pelo que o CLIGEN não gera adequadamente a assimetria da precipitação mensal.

O coeficiente de curtose observado é inferior a 3 em 7 meses (zona central achatada e caudas finas) e superior a 3 em 5 meses (zona central pontiaguda e caudas espessas). O coeficiente de curtose gerado é superior a 3 apenas em Julho, sendo inferior em todos os outros meses. Rejeitamos a hipótese de igualdade de coeficiente de curtose em todos os meses excepto Janeiro e Novembro.

Quanto às diferenças entre os percentis verifica-se a seguinte tendência: no percentil 25 os valores observados são sempre inferiores aos gerados. No percentil 50 os valores

observados são inferiores aos gerados excepto em Maio e Setembro. No percentil 75 a tendência é mista e no percentil 95 os valores observados são sempre superiores aos gerados. O CLIGEN tem pois uma tendência a sobreprever as precipitações mensais com meses mais secos (percentil 25) e a subprever precipitações mensais mais chuvosas.

Verifica-se pois que o CLIGEN não está preparado para reflectir correctamente a variabilidade interanual que se verifica nas regiões de clima mediterrâneo. De facto, para gerar a precipitação o CLIGEN considera como dados de entrada apenas a probabilidade de ocorrência de precipitação, a precipitação média mensal em dia chuvoso e o desvio padrão da precipitação média em dia chuvoso. Não há qualquer parâmetro em que se possa actuar, para criar qualquer variabilidade interanual. Em regiões onde isto se verifica, como é o caso das regiões de clima mediterrâneo, o CLIGEN não reflecte estas variações.

Tabela 4.2. Estatísticas da precipitação mensal observadas e simuladas pelo CLIGEN

Médias	Jan.		Fev.		Mar		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez		Ano		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	116,91	110,75	59,14	72,05	52,73	45,45	55,25	74,38	66,09	59,07	12,93	13,84	6,41	5,92	6,72	6,22	41,74	36,13	122,93	102,01	107,11	135,89	119,73	126,54	767,70	788,25	
Desvio Padrão	95,55	45,71	56,92	26,19	44,69	23,28	40,79	28,98	55,11	33,01	25,47	9,91	11,54	7,20	9,72	5,79	34,13	22,67	97,65	42,73	91,35	49,17	117,15	36,08	244,31	102,75	
Coefficiente de assimetria	1,72	0,38	1,04	0,60	0,57	0,17	1,80	0,87	0,67	1,03	3,26	1,13	2,17	2,28	1,39	0,78	0,62	0,96	1,16	0,64	1,50	0,78	0,95	0,10	0,20	0,23	
Coefficiente de Curtose	3,48	0,29	0,01	0,64	-0,73	-0,60	3,73	0,81	-0,72	1,47	11,76	1,52	3,83	8,09	0,37	-0,29	-0,87	0,75	0,93	-0,15	3,00	2,21	-0,40	0,05	-0,80	0,54	
Percentis	25	47,55	80,70	14,95	52,65	10,80	28,00	29,50	53,83	15,25	35,05	0,25	6,40	0,00	0,23	0,15	0,53	16,55	19,53	53,30	68,25	42,35	97,48	34,40	102,98	581,00	723,30
	50	76,30	111,60	38,55	69,80	44,45	44,75	49,20	71,65	55,75	51,90	2,80	12,30	1,40	3,35	2,20	5,00	33,20	31,90	79,10	92,80	85,30	135,70	63,70	130,80	775,20	776,90
	75	166,28	138,10	96,35	85,78	79,10	60,73	59,25	90,58	103,80	79,23	14,90	17,95	4,65	9,65	8,63	9,83	61,43	47,50	173,85	130,18	146,30	169,30	204,35	146,83	921,40	854,40
	95	260,53	186,09	169,09	118,59	124,80	85,87	132,14	126,93	165,13	130,30	46,06	32,82	35,02	20,04	25,82	18,06	101,37	82,32	311,87	177,42	246,88	207,52	294,85	183,02	1160,49	946,02
Máximo	401,20	251,60	184,30	154,50	141,80	100,20	175,40	171,80	167,00	179,50	106,50	47,70	37,40	44,20	28,20	21,00	102,30	106,20	364,40	228,50	372,00	344,00	380,10	221,20	1184,80	1119,80	
Mínimo	30,20	26,10	2,80	9,30	0,20	0,60	11,90	17,80	3,60	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	17,80	32,70	6,00	41,10	2,30	45,80	387,70	536,10	
Diferença entre médias (mm)	-6,16		12,91		-7,28		19,13		-7,02		0,91		-0,49		-0,50		-5,62		-20,92		28,78		6,81		20,55		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de assimetria	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de curtose	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

4.2.2. Número de dias de precipitação mensal

Na **Tabela 4.3** indicam-se as Estatísticas do número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN. Podemos observar que o número de dias de precipitação mensal simulada pelo CLIGEN não difere significativamente dos valores observados (t calculado $<$ t tabelado) excepto no mês de Novembro. O erro relativo máximo mensal foi de 17,94% no mês de Novembro. Em termos anuais o erro relativo foi de 3,13%, com um erro médio mensal de 1,56%. Em termos de comparação de médias, não rejeitamos a hipótese de igualdade de médias. Os desvios padrão são sistematicamente menores nos valores gerados pelo CLIGEN. Rejeita-se a hipótese de igualdade de desvios padrão nos meses de Janeiro, Março, Abril, Junho, Outubro, Novembro e Dezembro.

O coeficiente de assimetria observado e gerado tem valores positivos e negativos, o que indica que as distribuições variam de mês para mês. No entanto, o erro relativo varia entre -19% e 987%, pelo que se rejeita a hipótese de o CLIGEN gerar adequadamente a assimetria da distribuição de número de dias de precipitação mensal.

O coeficiente de curtose observado e gerado é inferior a 3 em todos os meses (zona central achatada e caudas finas). O erro relativo varia de 6,97 a 560%.

Quanto às diferenças entre os percentis verifica-se a seguinte tendência: para o percentil 25, os valores observados são inferiores aos gerados em todos os meses, excepto Maio. Nos percentis 50 e 75 a tendência é mista, mas com uma grande proximidade entre os valores gerados e observados. No percentil 95 os valores observados são sempre superiores aos gerados excepto no mês de Fevereiro.

Tabela 4.3. Estatísticas do número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN

Médias	Jan.		Fev.		Mar		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez		Ano		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Número de dias	15,06	14,88	12,78	14,14	8,89	9,46	12,17	13,36	11,39	11,37	4,61	4,51	1,61	1,42	1,67	1,71	7,17	6,65	14,06	13,39	13,78	16,25	16,67	16,44	119,83	123,58	
Desvio Padrão	6,90	3,78	4,35	3,32	6,13	3,57	5,72	3,45	5,19	3,97	4,68	2,40	1,65	1,19	1,57	1,47	4,55	2,99	6,52	3,33	6,94	2,81	7,24	3,04	29,14	9,76	
Coefficiente de assimetria	0,32	-0,18	-0,25	0,29	0,93	-0,08	1,01	0,21	-0,80	0,07	1,51	0,14	0,62	0,67	0,73	0,87	0,80	0,23	-0,03	0,30	0,14	-0,02	-0,31	0,23	0,23	0,01	
Coefficiente de Curtose	-0,41	-0,38	-0,27	0,68	0,12	-0,19	2,59	-0,12	0,16	-0,73	1,76	-0,65	-0,76	-0,07	-0,47	0,18	0,19	-0,50	-0,65	-0,03	-1,12	1,15	-1,04	-0,68	-0,98	0,21	
Percentis	25	11	12	9	12	6	7	10	11	10	8	2	3	0	1	0	1	4	5	9	11	9	15	12	14	96	117
	50	15	15	14	14	7	9	13	13	13	11	2	4	2	1	1	1	6	6	14	13	12	16	17	16	117	124
	75	17	17	16	16	13	12	14	15	15	14	6	6	3	2	3	3	10	9	21	16	21	18	23	19	144	129
	95	25	21	18	19	20	15	21	20	18	17	14	8	4	4	4	4	14	11	23	18	24	20	25	21	157	140
Máximo	28	23	21	25	23	18	28	21	19	20	17	10	5	5	5	6	18	15	25	23	25	26	27	24	176	150	
Mínimo	4	5	4	6	2	2	3	5	0	3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	6	3	8	3	11	79	97	
Diferença entre médias (dia)	-0,18		1,36		0,57		1,19		-0,02		-0,10		-0,19		0,04		-0,52		-0,67		2,47		-0,23		3,75		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

4.2.3. Precipitação diária máxima mensal

Na **Tabela 4.4** indicam-se as Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN. Podemos observar que a precipitação diária máxima mensal simulada pelo CLIGEN não difere significativamente dos valores observados (t calculado $< t$ tabelado). O erro relativo máximo mensal foi de 26,84% no mês de Junho. No entanto, os desvios padrão diferem significativamente, com erro relativo entre 15 e 61% sendo sistematicamente menores nos valores gerados pelo CLIGEN. Rejeita-se a hipótese de igualdade de desvios padrão em todos os meses excepto em Janeiro e Abril.

O coeficiente de assimetria observado e gerado tem valores positivos. No entanto, o erro relativo varia entre -503% e 86%, pelo que o CLIGEN não gera adequadamente a assimetria da distribuição da precipitação mensal.

O coeficiente de curtose observado e gerado é inferior a 3 em todos os meses (zona central achatada e caudas finas). O erro relativo varia de -305 a 1964%.

Quanto às diferenças entre os percentis verifica-se a seguinte tendência: para o percentil 25, os valores observados são inferiores aos gerados em 8 meses. Nos percentis 50 e 75 a tendência é mista. No percentil 95 os valores observados são sempre superiores aos gerados.

Tabela 4.4. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN

Médias	Jan.		Fev.		Mar		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	31,64	26,89	20,96	18,30	17,43	14,47	21,46	16,71	22,70	17,27	8,02	5,87	5,47	4,16	4,59	3,79	17,44	13,14	35,88	27,14	36,33	29,79	29,22	25,96	
Desvio Padrão	13,45	11,39	15,28	7,53	12,81	6,41	12,10	9,10	18,16	8,90	7,63	3,88	10,59	4,28	7,08	2,88	12,76	6,29	21,76	10,87	30,27	11,70	21,53	9,87	
Coefficiente de assimetria	0,17	1,03	1,27	1,25	0,36	0,45	1,06	0,37	1,05	1,32	0,75	1,95	2,44	1,16	1,56	0,20	0,94	0,78	0,74	1,24	1,21	1,03	0,59	1,79	
Coefficiente de Curtose	-0,20	0,79	2,67	1,95	-0,62	0,22	0,47	0,72	0,61	2,47	-0,42	7,91	4,96	1,21	0,93	-0,48	1,00	0,92	1,23	2,67	0,76	1,23	-0,70	4,94	
Percentis	25	21,95	18,83	9,68	13,18	5,68	9,95	15,98	12,53	8,20	10,90	1,03	3,85	0,00	0,23	0,00	0,53	9,53	9,05	24,05	19,35	10,68	21,28	11,53	19,80
	50	34,45	23,95	19,75	16,45	17,75	14,15	18,30	15,95	19,75	15,05	6,40	5,40	1,25	3,20	0,90	4,20	14,35	11,90	34,20	25,30	27,85	26,95	26,55	23,60
	75	37,40	32,88	28,30	22,05	25,40	17,38	21,83	21,90	28,15	21,40	12,38	7,33	4,00	6,63	4,80	6,03	24,73	16,63	42,35	32,80	44,20	36,48	45,53	29,45
	95	55,36	45,86	44,91	31,85	36,15	25,65	43,75	31,73	59,30	33,32	20,85	11,65	33,72	11,01	18,97	7,91	37,07	23,99	69,13	45,08	91,46	50,21	66,59	42,27
Máximo	57,40	65,60	64,20	44,40	43,80	33,60	49,10	41,50	64,40	53,10	24,50	26,70	33,80	18,30	19,90	12,90	49,90	34,40	90,80	72,90	108,20	71,00	72,20	71,00	
Mínimo	6,60	10,60	1,00	4,30	0,20	0,30	4,40	0,00	2,30	3,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,40	1,90	9,00	6,00	12,30	2,10	11,10	
Diferença entre médias (dia)	-4,76		-2,66		-2,96		-4,75		-5,43		-2,15		-1,31		-0,81		-4,31		-8,74		-6,54		-3,27		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

4.2.4. Precipitação média em dia chuvoso

Na **Tabela 4.5** indicam-se as Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN. Podemos observar que a precipitação média em dia chuvoso simulada pelo CLIGEN não difere significativamente dos valores observados (t calculado $< t$ tabelado) excepto nos meses de Julho e Dezembro em que o erro relativo máximo mensal foi de 74% e 26% respectivamente. No entanto, os desvios padrão diferem significativamente, com erro relativo entre 2,92 e 66,8% sendo sistematicamente menores nos valores gerados pelo CLIGEN. Rejeita-se a hipótese de igualdade de desvios padrão em todos os meses excepto Abril, Junho, Julho, Agosto e Setembro, pelo que consideramos que o CLIGEN não representa bem a distribuição da precipitação média em dia chuvoso nas regiões de clima mediterrâneo, nos meses mais chuvosos.

O coeficiente de assimetria observado tem valores positivos, excepto no mês de Setembro em que é negativo, e o coeficiente de assimetria gerado apenas valores positivos. O erro relativo varia entre -241% e 670%, pelo que o CLIGEN não gera adequadamente a assimetria da distribuição de precipitação média em dias chuvosos.

O coeficiente de curtose observado e gerado é inferior a 3 em todos os meses (zona central achatada e caudas finas) excepto em Março e Julho para os valores observados e em Fevereiro, Março e Outubro para os valores simulados.

Quanto às diferenças entre os percentis verifica-se a seguinte tendência: para o percentil 25, os valores observados são inferiores aos gerados em todos os meses. Nos percentis 50 e 75 a tendência é mista mas com uma grande proximidade entre os valores gerados e observados. No percentil 95 os valores observados são superiores aos gerados excepto nos meses de Junho e Setembro. Concluimos que o CLIGEN também não representa bem a distribuição da precipitação média em dia chuvoso.

Tabela 4.5. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN

Médias	Jan.		Fev.		Mar		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez		Ano		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	7,49	7,37	4,40	5,10	5,71	4,72	4,80	5,64	5,59	5,09	1,68	2,93	2,37	3,03	2,39	2,93	5,43	5,47	9,35	7,77	7,89	8,33	6,15	7,75	6,44	6,38	
Desvio Padrão	3,76	2,39	3,29	1,51	5,47	1,81	2,67	1,78	3,60	2,07	2,02	1,54	4,39	3,15	3,06	2,28	2,79	2,71	6,62	3,62	5,98	2,53	4,27	2,11	1,77	0,66	
Coefficiente de assimetria	0,89	0,49	0,32	1,09	2,11	0,37	1,27	0,29	0,51	0,95	1,20	0,83	2,77	1,40	1,33	0,37	-0,21	1,17	1,41	3,52	0,94	0,24	0,60	0,99	1,18	-0,26	
Coefficiente de Curtose	0,18	-0,13	-1,16	3,33	6,09	1,20	1,68	-0,59	-0,36	0,99	0,57	1,50	8,14	2,18	0,63	-0,45	-0,18	2,19	1,77	21,72	0,27	-0,46	-0,38	2,35	1,86	0,62	
Percentis	25	4,97	5,61	1,42	4,24	2,23	3,41	3,01	4,33	3,04	3,77	0,03	2,04	0,00	0,23	0,00	0,41	3,83	3,61	5,16	5,60	3,22	6,40	2,80	6,44	5,34	6,03
	50	6,62	6,99	4,61	4,90	4,84	4,80	3,86	5,45	5,81	4,73	0,89	2,84	0,65	2,55	0,90	3,00	5,23	5,03	7,25	7,28	6,12	8,39	5,93	7,62	6,02	6,41
	75	8,32	8,94	7,00	5,69	7,09	5,75	6,21	6,92	6,80	6,03	2,99	3,55	2,33	4,39	3,56	4,36	7,49	6,87	12,00	8,92	10,92	10,06	8,10	8,63	7,65	6,80
	95	14,54	11,52	9,86	7,50	13,17	7,49	9,35	8,67	11,62	9,45	5,96	6,03	10,54	10,11	8,60	7,50	9,30	10,65	21,20	12,97	19,07	12,98	13,09	12,07	8,72	7,26
Máximo	15,71	14,33	10,24	11,27	23,47	11,10	11,93	9,74	12,85	11,19	6,23	8,27	17,30	14,73	9,35	9,00	10,12	15,20	27,00	32,64	21,73	14,88	15,20	16,33	11,29	8,05	
Mínimo	2,57	2,78	0,16	0,85	0,00	0,30	1,18	1,62	0,60	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	1,78	2,65	0,55	3,43	0,63	3,52	4,27	4,29	
Diferença entre médias (dia)	-0,12		0,70		-0,99		0,84		-0,50		1,25		0,66		0,54		0,04		-1,58		0,45		1,60		-0,06		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Na Tabela 4.6 apresenta-se o Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados.

Tabela 4.6 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados.

Parâmetro	Média mensal	Desvio padrão	Assimetria	Curtose	Percentil			
					25	50	75	95
Precipitação mensal	=	≠	≠	≠	↑↑	↑	↔	↓↓
Número de dias de precipitação mensal	=	≠	≠	≠	↑	↔	↔	↓
Precipitação diária máxima mensal	=	≠	≠	≠	↑↑	↑	↔	↓↓
Precipitação média em dia chuvoso	=	≠	≠	≠	↑	↑	↔	↓

Legenda:

= Não difere significativamente em seis ou mais meses.

≠ Difere significativamente em seis ou mais meses

Percentis:

↓↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em todos os meses

↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em 3 ou menos meses

↔ - Tendência mista

↑ - Os valores simulados são superiores aos observados em 9 ou mais meses

↑↑ - Os valores simulados são sempre superiores aos observados em todos os meses

Como podemos ver o valor médio de precipitação mensal, o número médio de dias de precipitação mensal, a precipitação diária máxima mensal média e a média da precipitação média em dia chuvoso gerados pelo CLIGEN não diferem significativamente dos observados em seis ou mais meses. Podemos afirmar que o CLIGEN simula adequadamente estes valores. No entanto não simula adequadamente os desvios padrão e os coeficientes de assimetria. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Elliot e Arnold (2001) com dados de precipitação do Uganda, em que concluem que o CLIGEN gera quantidades e duração de precipitação semelhantes aos valores observados. Concluem também que pode haver um menor número de chuvadas previsto, mas a quantidade de precipitação por chuvada será maior. Verificam também que os desvios padrão da precipitação gerada pelo CLIGEN são geralmente inferiores aos valores observados.

Por outro lado também Wilks (1999) verificou que os modelos de cadeia de Markov de primeira ordem (como é o caso do CLIGEN) não são adequados para a região Oeste dos Estados Unidos.

Confrontados com estes resultados, procurámos determinar que influência poderia ter a variação dos padrões de precipitação nos valores simulados pelo CLIGEN. A questão que formulámos foi: e se separarmos os parâmetros dos anos chuvosos e dos anos secos? O que acontecerá aos valores simulados pelo CLIGEN? Haverá mais variabilidade? Com uma mistura entre parâmetros de anos secos e anos chuvosos, conseguiremos manter a representação dos valores médios, e melhorar o desvio padrão?

4.2.5. Alterações de parâmetros do CLIGEN

Para procurar responder a esta questão fizemos correr o modelo CLIGEN com os parâmetros de anos secos e anos chuvosos de Castelo Branco. Esta abordagem é semelhante à utilizada por Zhang (2003). Este autor, utilizando os dados meteorológicos de uma estação meteorológica no estado de Oklaoma, Estados Unidos, gerou três cenários possíveis em termos de precipitação: anos secos, médios e chuvosos, sendo a divisão feita pelos percentis 25 e 75 respectivamente. Concluiu que o CLIGEN simula bem a precipitação nestes três cenários, mas este autor não fez uma junção de cenários.

Esta variabilidade de baixa frequência, que frequentemente é subestimada pelos simuladores climáticos, pode afectar os modelos de crescimento de plantas (Dubrovsky *et al.*, 2004), ou de perda de solo.

Para a nossa simulação, começámos por separar os anos hidrológicos da base de dados em dois cenários: **anos secos** e **anos chuvosos**. Considerámos arbitrariamente como anos secos, os anos com precipitação inferior à média e como anos chuvosos os anos com precipitação superior à média. Estes critérios definem o que no restante capítulo consideramos “anos secos” e “anos chuvosos”.

Foram assim considerados como secos os anos:

1985/1986; 1986/1987; 1988/1989; 1990/1991; 1991/1992; 1992/1993; 1994/1995; 1998/1999; 1999/2000; 2001/2002

Foram considerados como chuvosos os anos:

1987/1988; 1989/1990; 1993/1994; 1995/1996; 1996/1997; 1997/1998; 2000/2001; 2002/2003

Seguidamente foram criados ficheiros de parâmetros para cada um dos tipos de anos, seguindo a metodologia anteriormente utilizada (Capítulo 4, página 66). No Anexo II encontra-se o extracto destes ficheiros que diz respeito à precipitação.

4.3. Resultados da simulação em anos secos

Da comparação da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos ressalta o seguinte: não se rejeita a hipótese de igualdade de média e o desvio padrão em nenhum dos meses. Pelo contrário rejeita-se a hipótese de igualdade das médias dos coeficientes de assimetria e de Curtose em todos os meses (**Tabela 4.7**).

No caso do número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN em anos secos não se rejeita a hipótese de igualdade de média em todos os meses excepto Outubro, mas rejeita-se a hipótese de igualdade de desvio padrão em Abril, Maio, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro (**Tabela 4.8**).

No caso da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos não se rejeita a hipótese de igualdade da média e do desvio padrão em todos os meses (**Tabela 4.9**).

Já no caso da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos não se rejeita a hipótese de igualdade da média em todos os meses excepto Junho e do desvio padrão excepto em Março e Outubro (**Tabela 4.10**).

Tabela 4.7. Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	69,90	77,66	52,75	57,85	62,04	55,63	57,45	69,68	39,57	45,74	8,09	12,87	3,32	3,96	6,65	7,96	38,14	38,85	97,15	103,89	64,08	63,77	41,46	50,89	
Desvio Padrão	60,82	39,88	40,40	27,23	39,40	28,88	45,44	32,94	34,89	22,15	9,06	9,29	4,70	4,45	9,52	8,38	41,22	25,87	74,64	40,20	52,83	48,73	24,92	22,04	
Coefficiente de assimetria	2,70	0,92	0,67	0,54	0,20	0,75	2,19	0,69	1,05	0,35	0,90	1,13	2,29	1,45	1,44	1,83	0,85	0,60	0,37	0,32	0,57	1,81	0,30	0,77	
Coefficiente de Curtose	7,82	1,63	-0,25	-0,28	-0,81	-0,10	5,92	0,75	0,37	-0,87	-0,62	2,30	6,09	2,17	0,63	3,69	-1,13	-0,45	-1,93	-0,46	-1,27	3,74	-0,02	0,98	
Percentis	25	38,75	49,00	24,80	37,15	29,43	32,73	37,95	46,68	11,18	27,98	1,03	5,68	0,00	0,00	0,15	2,38	6,20	18,98	33,03	71,68	19,78	33,60	30,35	35,73
	50	51,10	71,95	47,80	51,95	66,55	48,45	49,20	64,25	30,85	41,95	4,55	12,20	2,80	2,75	2,20	5,70	20,05	31,75	65,90	102,55	51,60	52,95	37,05	48,25
	75	72,65	101,80	71,65	75,73	79,10	75,40	59,25	89,95	58,20	61,33	14,90	17,48	3,55	6,00	8,63	10,18	70,90	57,38	171,33	128,00	103,30	74,75	58,45	63,25
	95	164,92	156,35	116,88	109,50	120,36	110,02	129,82	122,73	96,03	83,49	22,17	28,25	10,83	12,26	23,87	25,52	101,81	85,90	193,32	176,32	143,24	169,51	76,99	85,01
Máximo	235,70	234,00	127,90	132,60	121,80	135,50	175,40	179,00	111,10	90,30	25,00	51,40	15,60	20,60	25,40	40,20	102,30	108,50	205,60	210,50	149,40	260,30	86,80	123,20	
Mínimo	30,20	0,60	2,80	10,60	4,40	6,40	11,90	9,80	7,00	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	17,80	23,80	6,00	6,30	2,30	4,50	
Diferença entre médias	7,76		5,10		-6,41		12,23		6,17		4,78		0,64		1,31		0,71		6,74		-0,31		9,43		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de assimetria	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de Curtose	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.8. Estatísticas de número de dias de precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos.

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Número de dias	12,40	12,82	11,60	12,14	9,30	9,21	12,10	12,62	8,50	10,10	3,70	4,60	1,40	1,49	1,50	2,12	5,40	6,19	10,40	13,76	9,80	10,90	10,10	11,43	
Desvio Padrão	6,19	3,69	4,12	3,01	5,23	2,96	7,02	3,04	6,20	3,00	3,16	1,93	1,43	1,32	1,84	1,44	4,90	2,25	6,95	2,99	6,91	2,92	6,45	3,06	
Coefficiente de assimetria	0,26	-0,44	-0,74	-0,25	0,89	0,64	1,09	-0,07	-0,06	0,05	1,24	0,36	0,54	0,77	1,07	0,55	0,75	0,08	-0,04	-0,03	0,90	0,16	0,00	0,60	
Coefficiente de Curtose	-0,11	0,56	-0,68	-0,13	-0,43	0,60	2,40	-0,25	-1,29	-0,45	0,20	0,36	-0,79	0,19	-0,26	-0,06	-1,07	-0,48	-0,77	0,29	2,00	0,04	-0,45	0,67	
Percentis	25	7,25	10,00	8,50	11,00	6,00	7,00	7,00	10,75	2,75	8,00	2,00	3,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	5,00	7,25	12,00	5,25	9,00	6,50	9,00
	50	13,50	13,00	13,50	12,00	7,00	9,00	13,50	13,00	10,00	10,00	2,00	5,00	1,50	1,00	1,00	2,00	3,50	6,00	10,00	14,00	10,50	11,00	10,50	11,00
	75	15,00	15,00	14,00	14,00	12,75	11,00	14,00	15,00	12,50	12,00	5,25	6,00	2,00	2,00	2,50	3,00	9,00	8,00	14,00	16,00	11,00	13,00	14,25	13,00
	95	20,85	18,05	16,00	17,00	17,65	14,05	21,70	18,00	16,65	15,05	9,10	8,00	3,55	4,00	4,55	5,00	13,00	10,00	20,10	19,00	20,05	16,00	18,75	16,10
Máximo	24,00	21,00	16,00	19,00	19,00	18,00	28,00	20,00	18,00	17,00	10,00	10,00	4,00	6,00	5,00	6,00	13,00	11,00	21,00	21,00	25,00	19,00	21,00	22,00	
Mínimo	4,00	1,00	4,00	5,00	3,00	3,00	3,00	6,00	0,00	3,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	6,00	0,00	3,00	0,00	6,00	
Diferença entre médias	0,42		0,54		-0,09		0,52		1,60		0,90		0,09		0,62		0,79		3,36		1,10		1,33		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.9. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	26,18	27,20	22,59	22,22	21,53	18,23	23,69	19,82	13,78	15,22	6,36	6,61	2,28	2,83	4,19	4,98	17,55	19,43	27,90	30,98	28,28	28,66	17,69	17,80	
Desvio Padrão	14,05	13,96	16,36	11,95	9,82	8,31	11,25	12,17	9,14	6,96	5,38	4,69	2,66	3,00	6,32	4,95	15,65	12,13	17,99	13,63	29,91	24,48	10,64	12,25	
Coeficiente de assimetria	1,10	1,70	1,97	1,50	-0,31	1,80	0,65	0,44	0,43	0,55	0,71	1,03	1,40	1,49	2,04	1,85	0,87	0,54	0,15	1,15	2,17	2,26	0,23	2,95	
Coeficiente de Curtose	2,05	5,84	5,36	2,53	-0,47	5,86	-0,83	0,01	-1,34	0,58	0,21	1,64	2,31	2,95	4,29	4,80	0,17	-0,36	-0,65	2,69	5,42	6,79	-1,22	11,49	
Percentis	25	19,50	17,90	17,40	14,98	17,58	12,63	18,05	12,23	7,60	10,15	1,60	3,43	0,00	0,00	0,15	1,50	5,20	10,00	13,00	21,00	9,00	13,53	9,50	11,33
	50	23,80	25,05	19,75	18,05	20,05	15,90	19,95	17,55	10,80	14,65	6,40	6,05	2,05	2,35	1,40	3,65	16,90	17,50	33,40	29,35	24,60	22,40	17,10	14,90
	75	31,85	33,05	23,35	27,45	29,45	23,60	32,70	28,18	20,23	19,85	9,48	9,20	3,23	4,33	4,80	6,65	25,60	28,45	39,80	37,90	32,20	33,60	26,55	19,73
	95	48,13	51,05	48,27	48,30	33,99	29,29	40,42	40,68	27,21	25,93	14,05	14,03	6,51	7,95	15,27	13,56	42,35	42,09	51,50	54,66	78,40	78,91	32,50	41,33
Máximo	57,40	97,40	64,20	65,30	34,80	58,00	42,80	57,90	27,70	39,10	17,20	23,80	8,40	15,10	19,90	28,40	49,90	51,20	60,60	90,80	108,20	152,20	33,40	83,80	
Mínimo	6,60	0,60	3,00	6,40	3,90	3,70	9,10	0,00	2,30	0,40	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,30	1,90	7,10	6,00	2,20	2,10	1,80	
Diferença entre médias	1,02		-0,37		-3,30		-3,87		1,44		0,25		0,55		0,79		1,88		3,08		0,37		0,11		
Comparação de médias	Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		Não rejeitar H ₀		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.10. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN em anos secos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	6,04	5,96	4,68	4,84	7,78	6,06	4,94	5,51	4,58	4,55	1,76	2,79	1,36	2,45	2,43	3,52	5,16	6,12	8,81	7,71	7,16	5,96	3,78	4,58	
Desvio Padrão	3,82	2,39	2,81	2,15	6,38	2,67	2,78	2,38	3,16	1,87	2,00	1,85	1,43	2,14	2,66	2,71	3,35	3,70	7,15	3,10	6,77	4,95	2,17	2,14	
Coefficiente de assimetria	2,05	0,55	-0,50	0,74	1,77	1,11	2,01	1,11	0,98	0,39	1,37	1,21	0,72	1,66	1,34	2,57	-0,22	0,92	2,06	1,07	1,22	2,73	0,15	1,93	
Coefficiente de Curtose	4,95	0,58	-1,21	0,26	4,10	1,66	4,68	2,04	1,22	-0,25	1,71	1,99	-0,50	4,32	2,04	11,89	-0,77	1,40	5,16	2,72	0,97	9,77	-1,27	6,56	
Percentis	25	3,72	4,33	2,32	3,37	4,07	4,13	3,25	3,91	2,30	3,27	0,19	1,59	0,00	0,90	0,15	1,58	3,71	3,53	5,82	5,64	2,43	3,18	1,82	3,22
	50	5,33	5,50	5,33	4,53	6,78	5,70	3,86	5,03	4,36	4,20	1,27	2,35	1,40	2,05	2,20	2,88	5,32	5,54	6,78	7,01	4,01	4,72	4,06	4,21
	75	6,45	7,23	7,00	5,95	9,01	7,40	5,87	6,90	6,12	5,59	2,77	3,45	1,77	3,28	3,56	4,76	7,49	8,61	9,52	9,81	10,79	6,76	5,45	5,32
	95	12,30	9,73	7,79	9,05	18,01	10,45	9,38	10,28	9,09	7,78	4,98	6,40	3,68	6,10	6,64	7,46	9,53	12,66	20,58	12,26	18,07	14,48	6,69	8,50
Máximo	15,71	13,67	7,99	11,44	23,47	15,66	11,93	14,82	11,40	9,31	6,23	10,28	3,90	11,90	8,47	19,30	10,12	19,96	27,00	21,54	21,73	32,26	7,23	15,40	
Mínimo	2,57	0,60	0,16	1,20	0,73	1,07	2,38	1,63	0,82	0,31	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	1,78	1,59	0,55	0,95	1,11	0,64	
Diferença entre médias	-0,09		0,16		-1,72		0,56		-0,03		1,03		1,09		1,09		0,95		-1,10		-1,20		0,79		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Na **Tabela 4.11** indicam-se o Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados em anos secos.

Tabela 4.11 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados em anos secos.

Parâmetro	Média mensal	Desvio padrão	Assimetria	Curtose	Percentil			
					25	50	75	95
Precipitação mensal	=	=	≠	≠	↑↑	↑	↔	↔
Número de dias de precipitação mensal	=	≠	≠	≠	↑↑	↔	↔	↔
Precipitação diária máxima mensal	=	=	≠	≠	↑↑	↔	↔	↔
Precipitação média em dia chuvoso	=	=	≠	≠	↑	↑	↔	↔

Legenda:

= Não difere significativamente em seis ou mais meses.

≠ Difere significativamente em seis ou mais meses

Percentis:

↓↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em todos os meses

↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em 3 ou menos meses

↔ - Tendência mista

↑ - Os valores simulados são superiores aos observados em 9 ou mais meses

↑↑ - Os valores simulados são sempre superiores aos observados em todos os meses

Verificamos que nesta situação os valores médios de precipitação mensal, número de dias de precipitação mensal, precipitação diária máxima mensal e precipitação média em dia chuvoso gerados pelo CLIGEN não diferem significativamente dos observados em anos secos em seis ou mais meses. Os desvios padrão de precipitação mensal, precipitação diária máxima mensal e precipitação média em dia chuvoso gerados pelo CLIGEN não diferem significativamente dos observados em seis ou mais meses.

Quando comparados estes valores com os valores gerados pelo CLIGEN original (**Tabela 4.6**) verificamos que houve melhorias em termos de semelhança entre os desvios padrão simulados e observados. Em termos de percentis, também há muito mais semelhanças nos percentis 50, 75 e 95. No entanto, no percentil 25, de um modo geral os valores simulados são superiores aos observados.

4.4. Resultados da simulação em anos chuvosos

Da comparação da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos ressalta o seguinte: não se rejeita a hipótese de igualdade de média em nenhum dos meses, mas rejeita-se a hipótese de igualdade do desvio padrão em Junho e Outubro. Pelo contrário rejeita-se a hipótese de igualdade das médias dos coeficientes de assimetria e de Curtose em todos os meses (**Tabela 4.12**).

No caso do número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN em anos chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade de média em todos os meses, mas rejeita-se a hipótese de igualdade de desvio padrão em Março e Junho (**Tabela 4.13**).

No caso da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade da média excepto em Março e Maio. Não se rejeita a hipótese de igualdade de desvio padrão em todos os meses (**Tabela 4.14**).

Já no caso da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade da média em todos os meses excepto Março, Junho e Dezembro. Não se rejeita a hipótese de igualdade do desvio padrão excepto em todos os meses (**Tabela 4.15**).

Tabela 4.12. Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	177,07	179,36	50,39	54,51	45,94	55,87	42,21	55,62	104,53	105,56	21,21	27,62	11,74	13,49	7,79	8,91	46,25	47,28	155,15	130,95	160,90	175,29	217,56	259,88	
Desvio Padrão	109,60	63,87	62,94	32,15	52,78	28,63	24,74	25,52	62,30	38,34	39,75	16,68	16,98	19,70	11,08	10,08	24,54	33,18	117,73	50,20	103,57	66,52	113,31	68,73	
Coefficiente de assimetria	1,65	0,94	1,44	1,66	1,14	0,41	1,04	0,61	-0,62	0,00	2,16	1,44	1,07	3,04	1,46	1,59	0,66	1,42	1,13	0,48	1,25	1,15	-0,63	1,07	
Coefficiente de Curtose	3,36	0,46	0,70	4,71	0,52	-0,51	1,12	0,34	-0,87	-0,20	4,65	3,59	-1,02	14,33	0,69	2,68	0,32	2,43	-0,21	-0,52	1,75	1,95	0,53	2,63	
Percentis	25	107,90	136,48	12,25	32,33	4,30	31,13	29,30	37,40	67,85	78,35	0,10	16,53	0,00	0,00	1,30	0,55	27,88	23,75	70,75	93,53	85,55	126,40	176,10	215,23
	50	166,40	169,05	22,60	52,30	36,80	52,15	29,80	50,05	109,60	108,65	0,40	25,25	0,20	5,95	2,20	6,90	46,70	39,95	102,50	123,15	143,60	163,30	240,40	256,10
	75	191,80	205,68	67,80	66,65	67,10	79,68	53,05	71,70	157,90	129,35	20,70	34,03	22,30	21,68	10,75	12,23	56,08	61,23	206,15	167,03	198,70	205,08	276,65	293,25
	95	340,96	312,76	149,96	109,46	126,02	101,77	77,53	95,97	166,34	166,46	85,17	59,80	36,56	51,93	25,35	29,04	81,85	112,74	342,77	219,10	320,48	307,84	345,00	369,16
Máximo	401,20	355,10	166,40	201,30	141,80	136,70	88,00	135,60	167,00	205,40	106,50	99,00	37,40	135,70	28,20	48,90	91,40	166,80	364,40	247,90	372,00	444,10	380,10	541,50	
Mínimo	72,50	85,70	3,60	7,40	0,20	5,40	13,00	2,80	3,60	14,00	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	16,20	0,30	54,20	43,40	55,40	67,30	12,60	123,40	
Diferença entre médias	2,29		4,12		9,93		13,40		1,03		6,41		1,75		1,12		1,03		-24,21		14,39		42,31		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de assimetria	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de Curtose	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN
Obs.: Observado

Tabela 4.13. Estatísticas número de dias de precipitação observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Número de dias	19,14	19,21	13,71	13,42	8,86	9,26	11,86	13,19	13,86	14,51	5,57	6,00	1,71	1,71	2,14	1,72	8,50	7,75	15,50	14,76	18,25	17,52	22,88	21,54	
Desvio Padrão	6,74	3,05	4,50	3,55	8,05	3,51	4,49	3,73	3,39	3,67	6,73	2,55	2,06	1,74	1,68	1,44	4,63	2,81	5,55	3,29	5,63	2,91	3,18	3,33	
Coefficiente de assimetria	0,19	-0,14	0,34	0,14	1,04	0,68	0,55	0,45	-1,49	-0,40	1,14	0,55	0,85	1,21	-0,31	0,69	1,24	0,22	0,18	0,22	-1,18	-0,07	-0,81	0,17	
Coefficiente de Curtose	-2,10	-0,02	-0,28	-0,11	-0,04	0,86	2,22	0,73	3,50	-0,09	-0,37	0,30	-0,98	1,36	-1,47	-0,14	1,94	0,16	-1,76	0,48	1,52	-0,47	0,42	0,41	
Percentis	25	14,00	17,00	11,00	11,00	2,50	7,00	10,50	11,00	13,50	12,00	1,00	4,00	0,00	0,00	1,00	1,00	4,75	6,00	11,25	13,00	16,25	16,00	21,50	20,00
	50	17,00	19,00	13,00	13,00	6,00	9,00	11,00	13,00	15,00	15,00	2,00	6,00	1,00	1,00	2,00	1,50	8,50	8,00	14,50	15,00	20,00	18,00	23,50	21,00
	75	25,00	21,00	16,00	16,00	13,00	11,00	13,00	15,00	15,00	17,00	9,00	7,00	3,00	3,00	3,50	3,00	9,50	10,00	21,00	16,00	21,25	20,00	25,00	23,25
	95	27,10	24,05	19,80	20,00	20,90	16,00	17,90	19,05	17,10	20,00	15,80	10,05	4,70	5,00	4,00	4,00	15,55	13,00	22,30	21,00	23,95	22,00	26,30	27,00
Máximo	28,00	26,00	21,00	23,00	23,00	20,00	20,00	25,00	18,00	22,00	17,00	14,00	5,00	8,00	4,00	6,00	18,00	16,00	23,00	24,00	25,00	24,00	27,00	31,00	
Mínimo	11,00	11,00	8,00	6,00	2,00	2,00	5,00	5,00	7,00	4,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	1,00	9,00	7,00	7,00	11,00	17,00	12,00	
Diferença entre médias	0,07		-0,29		0,40		1,33		0,65		0,43		0,00		-0,42		-0,75		-0,74		-0,73		-1,34		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.14. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	38,96	35,03	15,69	19,22	13,63	21,34	19,10	18,30	36,50	25,89	9,67	11,16	10,70	8,78	5,83	6,10	17,78	18,38	45,26	36,70	45,94	46,99	45,18	44,52	
Desvio Padrão	10,09	13,70	12,35	10,92	15,52	11,61	14,30	11,75	21,11	11,34	10,46	5,92	15,96	12,75	8,75	6,18	6,90	11,41	22,57	16,66	27,56	26,52	21,55	19,29	
Coefficiente de assimetria	-0,27	1,41	0,17	1,76	1,38	1,43	1,82	0,58	-0,21	0,62	0,44	1,94	1,13	3,21	1,21	1,22	0,84	1,08	1,37	0,69	0,84	1,39	-0,85	2,10	
Coefficiente de Curtose	1,87	3,36	-2,41	6,30	1,89	2,24	4,27	0,15	-0,22	0,61	-2,03	7,74	-0,97	14,29	-0,85	1,64	-0,78	1,02	1,51	-0,05	-0,62	1,71	0,90	7,24	
Percentis	25	36,45	24,58	6,15	11,20	1,65	13,70	13,00	10,30	27,85	16,28	0,40	6,98	0,00	0,00	0,30	0,55	13,70	10,28	31,85	22,95	24,90	27,83	35,18	31,58
	50	37,60	32,35	11,10	17,75	12,80	17,90	17,20	16,30	30,20	26,10	5,80	10,10	0,20	4,35	1,20	4,90	14,35	15,60	38,50	36,30	42,10	39,25	49,95	39,85
	75	42,90	44,10	27,80	24,13	17,65	26,33	18,50	23,68	51,40	32,38	18,30	13,90	20,45	11,85	10,10	8,95	22,38	24,13	50,53	44,23	54,80	58,48	56,00	53,03
	95	51,46	54,96	29,50	36,89	37,20	47,51	40,31	40,33	62,60	43,51	23,21	20,23	33,77	26,32	18,68	16,70	28,18	41,34	81,88	70,15	87,63	103,91	69,89	74,96
Máximo	55,00	96,90	29,80	75,80	43,80	61,10	49,10	53,90	64,40	64,60	24,50	42,60	33,80	84,30	18,80	29,20	29,40	56,50	90,80	83,00	88,50	138,30	72,20	138,30	
Mínimo	21,40	16,60	1,00	3,20	0,20	4,30	4,40	0,00	2,40	5,40	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	10,20	0,30	23,20	11,20	14,80	14,50	4,00	18,00	
Diferença entre médias	-3,93		3,53		7,72		-0,80		-10,61		1,49		-1,93		0,28		0,61		-8,57		1,06		-0,65		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.15. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN em anos chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	Obs.	C	
Média (mm)	8,81	9,27	3,17	4,01	3,45	6,17	4,01	4,24	7,02	7,27	1,71	4,56	4,16	5,25	2,68	3,88	5,76	6,09	10,03	8,99	8,79	10,03	9,11	12,08	
Desvio Padrão	2,84	2,68	3,35	2,12	2,59	2,99	2,24	1,79	4,20	2,18	2,32	2,04	6,73	6,11	3,85	3,73	2,07	3,92	6,29	3,49	5,13	3,62	4,50	2,60	
Coefficiente de assimetria	1,51	1,01	1,58	1,88	-0,15	2,26	0,63	0,93	-0,18	0,45	1,11	1,57	1,62	1,95	1,31	1,26	0,91	1,73	0,71	1,98	1,02	1,65	-0,71	1,03	
Coefficiente de Curtose	1,82	0,53	2,18	5,13	-1,98	11,76	-0,88	0,87	-0,46	-0,11	0,26	4,32	1,82	5,47	-0,11	2,16	-0,33	4,09	-1,22	8,79	0,65	3,90	0,84	2,88	
Percentis	25	6,79	7,25	1,15	2,84	1,43	4,36	2,86	2,90	4,97	5,80	0,00	3,39	0,00	0,00	0,27	0,55	4,65	3,73	4,88	6,57	5,56	7,36	7,27	10,43
	50	8,02	8,86	1,71	3,64	3,35	5,83	2,98	3,79	6,85	7,15	0,10	4,12	0,00	3,40	0,70	3,58	5,23	5,33	7,73	8,32	7,46	9,43	9,24	11,75
	75	9,58	10,34	4,07	4,76	5,74	8,06	5,43	5,32	9,47	8,55	2,98	5,42	5,93	7,75	4,08	5,88	6,35	7,38	14,80	11,07	10,96	11,32	12,11	13,60
	95	13,26	14,70	8,45	7,08	6,27	9,95	7,14	8,08	12,29	11,75	5,04	7,70	14,92	14,77	8,66	9,35	8,96	13,06	19,19	14,39	16,70	16,81	14,33	16,13
Máximo	14,33	17,15	9,79	12,58	6,43	24,03	7,30	9,99	12,85	12,84	5,92	13,65	17,30	33,93	9,35	17,45	9,16	22,57	20,17	28,58	18,60	25,33	15,20	23,29	
Mínimo	6,59	5,30	0,24	0,93	0,00	1,35	1,18	0,56	0,60	2,93	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33	0,30	3,78	3,29	3,08	4,97	0,63	7,26	
Diferença entre médias	0,45		0,85		2,72		0,23		0,25		2,85		1,09		1,20		0,34		-1,04		1,24		2,97		
Comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Na **Tabela 4.16** indica-se o Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados em anos chuvosos.

Tabela 4.16 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados em anos chuvosos.

Parâmetro	Média mensal	Desvio padrão	Assimetria	Curtose	Percentil			
					25	50	75	95
Precipitação mensal	=	=	≠	≠	↑	↑	↔	↔
Número de dias de precipitação mensal	=	=	≠	≠	↑	↔	↔	↔
Precipitação diária máxima mensal	=	=	≠	≠	↑↑	↔	↔	↔
Precipitação média em dia chuvoso	=	=	≠	≠	↑	↑↑	↑	↔

Legenda:

= Não difere significativamente em seis ou mais meses.

≠ Difere significativamente em seis ou mais meses

Percentis:

↓↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em todos os meses

↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em 3 ou menos meses

↔ - Tendência mista

↑ - Os valores simulados são superiores aos observados em 9 ou mais meses

↑↑ - Os valores simulados são sempre superiores aos observados em todos os meses

Verificamos que nesta situação os valores médios de precipitação mensal, o número de dias de precipitação mensal, a precipitação diária máxima mensal e a precipitação média em dia chuvoso gerados pelo CLIGEN não diferem significativamente dos observados em anos secos em seis ou mais meses, o que também já se verificava anteriormente para os valores gerados pelo CLIGEN original e em anos secos. Os desvios padrão de precipitação mensal, número de dias de precipitação mensal, precipitação diária máxima mensal e precipitação média em dia chuvoso gerados pelo CLIGEN não diferem significativamente dos observados em seis ou mais meses.

Quando comparados estes valores com os valores gerados pelo CLIGEN original (**Tabela 4.6**) verificamos que houve melhorias em termos de semelhança entre os desvios padrão simulados e observados. Em termos de percentis, também há muito mais semelhanças nos percentis 50, 75 e 95. No entanto, no percentil 25, os valores simulados são superiores aos observados, mas em menor grau que nos valores originais.

Comparativamente à simulação em anos secos (**Tabela 4.11**) a melhoria que se verifica é em termos de desvio padrão do número de dias de precipitação mensal.

4.5. Resultados da simulação em anos secos e chuvosos

Perante os resultados acima obtidos juntámos os resultados dos dois conjuntos de anos secos e de anos chuvosos previamente obtidos, (200 anos) e comparámos as estatísticas destes novos valores com a totalidade dos valores observados.

Para o número de anos da nossa base de dados (18 anos), para o número de anos simulados (200 anos) e para o valor de Alfa definido (5%), o valor tabelado da distribuição *F-Snedcor* é de 2,28 e o valor tabelado da distribuição *t-Student* é de 1,651 (Murteira *et al.*, 2001).

Da comparação da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos ressalta o seguinte: não se rejeita a hipótese de igualdade de média excepto em Junho, e rejeita-se a hipótese de igualdade do desvio padrão em Fevereiro, Março, Junho e Outubro. Pelo contrário rejeita-se a hipótese de igualdade das médias dos coeficientes de assimetria e de Curtose em todos os meses (**Tabela 4.17**).

No caso do número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade de média em todos os meses excepto Fevereiro, mas rejeita a hipótese de igualdade de desvio padrão em Março, Abril, Junho, Setembro, Outubro e Novembro (**Tabela 4.18**).

No caso da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade da média excepto em todos os meses, mas rejeita a hipótese de igualdade de desvio padrão em Maio (**Tabela 4.19**).

Já no caso da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade da média em todos os meses excepto, Junho Agosto e Dezembro. Não se rejeita a hipótese de igualdade do desvio padrão excepto em Fevereiro, Março e Outubro (**Tabela 4.20**).

Tabela 4.17. Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	
Média (mm)	116,91	128,51	59,14	56,18	52,73	55,75	55,25	62,65	66,09	75,65	12,93	20,25	6,41	8,73	6,72	8,43	41,74	43,06	122,93	117,42	107,11	119,53	119,73	155,38	
Desvio Padrão	95,55	73,62	56,92	29,77	44,69	28,68	40,79	30,23	55,11	43,29	25,47	15,36	11,54	15,03	9,72	9,26	34,13	29,97	97,65	47,35	91,35	80,67	117,15	116,47	
Coefficiente de assimetria	1,72	0,85	1,04	1,21	0,57	0,58	1,80	0,79	0,67	0,57	3,26	1,62	2,17	4,17	1,39	1,71	0,62	1,24	1,16	0,55	1,50	0,84	0,95	0,53	
Coefficiente de Curtose	3,48	0,54	0,01	2,86	-0,73	-0,32	3,73	0,98	-0,72	-0,40	11,76	4,48	3,83	26,73	0,37	3,16	-0,87	2,21	0,93	-0,14	3,00	0,63	-0,40	-0,70	
Percentis	25	47,55	72,18	14,95	35,70	10,80	32,08	29,50	39,85	15,25	39,95	0,25	9,18	0,00	0,00	0,15	1,48	16,55	20,88	53,30	81,98	42,35	53,03	34,40	48,28
	50	76,30	115,10	38,55	52,30	44,45	50,95	49,20	57,75	55,75	69,35	2,80	16,95	1,40	3,60	2,20	6,20	33,20	37,85	79,10	112,85	85,30	111,55	63,70	123,30
	75	166,28	171,13	96,35	71,68	79,10	76,95	59,25	83,50	103,80	108,53	14,90	27,23	4,65	10,28	8,63	11,40	61,43	59,38	173,85	144,98	146,30	169,33	204,35	256,10
	95	260,53	265,16	169,09	109,50	124,80	106,92	132,14	113,31	165,13	153,91	46,06	46,36	35,02	34,27	25,82	28,04	101,37	101,23	311,87	207,08	246,88	264,58	294,85	341,80
Máximo	401,20	355,10	184,30	201,30	141,80	136,70	175,40	179,00	167,00	205,40	106,50	99,00	37,40	135,70	28,20	48,90	102,30	166,80	364,40	247,90	372,00	444,10	380,10	541,50	
Mínimo	30,20	0,60	2,80	7,40	0,20	5,40	11,90	2,80	3,60	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	17,80	23,80	6,00	6,30	2,30	4,50	
Diferença entre médias	11,60		-2,96		3,02		7,40		9,56		7,31		2,32		1,71		1,32		-5,51		12,42		35,65		
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de assimetria	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de Curtose	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.18. Estatísticas do número de dias de precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	
Número de dias	15,06	16,02	12,78	6,26	8,89	9,24	12,17	12,91	11,39	12,31	4,61	5,30	1,61	1,60	1,67	1,92	7,17	6,97	14,06	14,26	13,78	14,21	16,67	16,49	
Desvio Padrão	6,90	4,65	4,35	6,46	6,13	3,24	5,72	3,40	5,19	4,01	4,68	2,36	1,65	1,54	1,57	1,45	4,55	2,66	6,52	3,17	6,94	4,41	7,24	5,99	
Coeficiente de assimetria	0,32	-0,33	-0,25	0,25	0,93	0,67	1,01	0,32	-0,80	0,09	1,51	0,66	0,62	1,15	0,73	0,60	0,80	0,33	-0,03	0,15	0,14	0,01	-0,31	0,12	
Coeficiente de Curtose	-0,41	-0,07	-0,27	-1,63	0,12	0,84	2,59	0,63	0,16	-0,59	1,76	0,73	-0,76	1,46	-0,47	-0,16	0,19	0,18	-0,65	0,46	-1,12	-0,78	-1,04	-1,07	
Percentis	25	11,25	13,00	9,25	0,00	6,00	7,00	10,00	11,00	10,00	9,00	2,00	4,00	0,00	0,00	0,25	1,00	4,00	5,00	9,00	12,00	9,25	11,00	11,50	11,00
	50	15,00	16,50	13,50	6,00	6,50	9,00	13,00	13,00	13,00	12,00	2,00	5,00	1,50	1,00	1,00	2,00	6,00	7,00	14,00	14,00	12,00	14,00	16,50	16,00
	75	17,00	19,25	15,75	12,00	13,00	11,00	14,00	15,00	15,00	15,00	6,00	7,00	2,75	2,00	2,75	3,00	9,75	9,00	20,50	16,00	20,50	18,00	22,75	21,00
	95	25,45	23,00	18,45	16,00	19,60	15,05	21,20	18,05	18,15	19,00	13,60	10,00	4,15	4,00	4,15	5,00	13,75	12,00	23,30	20,00	24,15	21,00	25,30	26,00
Máximo	28,00	26,00	21,00	19,00	23,00	20,00	28,00	25,00	19,00	22,00	17,00	14,00	5,00	8,00	5,00	6,00	18,00	16,00	25,00	24,00	25,00	24,00	27,00	31,00	
Mínimo	4,00	1,00	4,00	0,00	2,00	2,00	3,00	5,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	6,00	3,00	3,00	3,00	6,00	
Diferença entre médias	0,96		-6,52		0,35		0,74		0,92		0,69		-0,01		0,25		-0,20		0,20		0,43		-0,18		
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.19. Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	
Média (mm)	31,64	31,12	20,96	20,72	17,43	19,79	21,46	19,06	22,70	20,55	8,02	8,88	5,47	5,80	4,59	5,54	17,44	18,91	35,88	33,84	36,33	37,82	29,22	31,16	
Desvio Padrão	13,45	14,35	15,28	11,52	12,81	10,19	12,10	11,96	18,16	10,80	7,63	5,79	10,59	9,71	7,08	5,62	12,76	11,76	21,76	15,45	30,27	27,06	21,53	20,96	
Coefficiente de assimetria	0,17	1,36	1,27	1,60	0,36	1,67	1,06	0,50	1,05	0,94	0,75	1,52	2,44	4,36	1,56	1,49	0,94	0,79	0,74	0,92	1,21	1,54	0,59	1,58	
Coefficiente de Curtose	-0,20	3,66	2,67	3,91	-0,62	3,69	0,47	0,04	0,61	1,19	-0,42	5,67	4,96	26,93	0,93	2,75	1,00	0,19	1,23	0,87	0,76	2,68	-0,70	4,36	
Percentis	25	21,95	22,00	9,68	13,00	5,68	13,10	15,98	10,80	8,20	12,33	1,03	5,00	0,00	0,00	1,30	9,53	10,18	24,05	21,80	10,68	20,00	11,53	15,05	
	50	34,45	28,30	19,75	18,00	17,75	17,30	18,30	17,10	19,75	19,35	6,40	8,10	1,25	2,90	0,90	4,25	14,35	16,80	34,20	31,30	27,85	31,00	26,55	26,05
	75	37,40	37,90	28,30	26,15	25,40	24,60	21,83	26,20	28,15	27,68	12,38	12,10	4,00	6,70	4,80	8,13	24,73	24,90	42,35	42,25	44,20	47,53	45,53	41,73
	95	55,36	54,14	44,91	40,47	36,15	38,13	43,75	40,62	59,30	40,01	20,85	18,95	33,72	20,82	18,97	16,04	37,07	42,00	69,13	62,47	91,46	94,11	66,59	68,65
Máximo	57,40	97,40	64,20	75,80	43,80	61,10	49,10	57,90	64,40	64,60	24,50	42,60	33,80	84,30	19,90	29,20	49,90	56,50	90,80	90,80	108,20	152,20	72,20	138,30	
Mínimo	6,60	0,60	1,00	3,20	0,20	3,70	4,40	0,00	2,30	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,30	1,90	7,10	6,00	2,20	2,10	1,80	
Diferença entre médias	-0,53		-0,24		2,35		-2,40		-2,15		0,86		0,33		0,95		1,46		-2,04		1,49		1,94		
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.20. Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN com junção de valores de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	
Média (mm)	7,49	7,61	4,40	4,43	5,71	6,11	4,80	4,87	5,59	5,91	1,68	3,68	2,37	3,99	2,39	4,30	5,43	6,10	9,35	8,35	7,89	7,99	6,15	8,33	
Desvio Padrão	3,76	3,03	3,29	2,17	5,47	2,83	2,67	2,19	3,60	2,44	2,02	2,14	4,39	4,94	3,06	3,16	2,79	3,80	6,62	3,35	5,98	4,78	4,27	4,45	
Coefficiente de assimetria	0,89	0,61	0,32	1,23	2,11	1,78	1,27	1,17	0,51	0,42	1,20	1,16	2,77	2,62	1,33	1,89	-0,21	1,35	1,41	1,58	0,94	1,52	0,60	0,35	
Coefficiente de Curtose	0,18	0,57	-1,16	1,96	6,09	7,78	1,68	2,25	-0,36	-0,07	0,57	2,71	8,14	10,11	0,63	5,46	-0,18	2,81	1,77	6,45	0,27	4,16	-0,38	-0,70	
Percentis	25	4,97	5,49	1,42	3,01	2,23	4,30	3,01	3,29	3,04	4,01	0,03	2,18	0,00	0,60	0,00	1,82	3,83	3,65	5,16	6,07	3,22	4,76	2,80	4,21
	50	6,62	7,25	4,61	3,93	4,84	5,79	3,86	4,56	5,81	5,72	0,89	3,43	0,65	2,68	0,90	3,60	5,23	5,43	7,25	7,69	6,12	7,26	5,93	8,45
	75	8,32	9,30	7,00	5,48	7,09	7,74	6,21	5,94	6,80	7,46	2,99	4,83	2,33	5,40	3,56	5,62	7,49	7,89	12,00	10,45	10,92	10,34	8,10	11,81
	95	14,54	13,85	9,86	8,79	13,17	10,38	9,35	8,84	11,62	10,16	5,96	7,21	10,54	13,29	8,60	8,99	9,30	13,04	21,20	13,66	19,07	16,29	13,09	15,12
Máximo	15,71	17,15	10,24	12,58	23,47	24,03	11,93	14,82	12,85	12,84	6,23	13,65	17,30	33,93	9,35	19,30	10,12	22,57	27,00	28,58	21,73	32,26	15,20	23,29	
Mínimo	2,57	0,60	0,16	0,93	0,00	1,07	1,18	0,56	0,60	0,31	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,30	1,78	1,59	0,55	0,95	0,63	0,64	
Diferença entre médias	0,12		0,02		0,40		0,07		0,32		2,00		1,62		1,90		0,68		-1,00		0,11		2,18		
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 4.21 Resumo de comparação de parâmetros estatísticos simulados pelo CLIGEN e observados com a utilização conjunta de parâmetros de anos secos e chuvosos.

Parâmetro	Média mensal	Desvio padrão	Assimetria	Curtose	Percentil			
					25	50	75	95
Precipitação mensal	=	=	≠	≠	↑↑	↑↑	↔	↔
Número de dias de precipitação mensal	=	≠	≠	≠	↑	↔	↔	↔
Precipitação diária máxima mensal	=	=	≠	≠	↑↑	↔	↔	↔
Precipitação média em dia chuvoso	=	=	≠	≠	↑	↑	↔	↔

Legenda:

= Não difere significativamente em seis ou mais meses.

≠ Difere significativamente em seis ou mais meses

Percentis:

↓↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em todos os meses

↓ - Os valores simulados são inferiores aos observados em 3 ou menos meses

↔ - Tendência mista

↑ - Os valores simulados são superiores aos observados em 9 ou mais meses

↑↑ - Os valores simulados são sempre superiores aos observados em todos os meses

Verificamos que nesta situação os valores médios de precipitação mensal, o número médio de dias de precipitação mensal, a precipitação diária máxima mensal e a precipitação média em dia chuvoso gerados pelo CLIGEN não diferem significativamente dos observados em anos secos em seis ou mais meses, o que também já se verificava anteriormente para os valores gerados pelo CLIGEN original, pela simulação em anos secos e em anos chuvosos. Os desvios padrão de precipitação mensal, precipitação diária máxima mensal e precipitação média em dia chuvoso gerados pelo CLIGEN não diferem significativamente dos observados em seis ou mais meses. No entanto, o número médio de dias de precipitação mensal difere significativamente em seis ou mais meses.

Quando comparados estes valores com os valores gerados pelo CLIGEN original (**Tabela 4.6**) verificamos que houve melhorias em termos de semelhança entre os desvios padrão simulados e observados. Em termos de percentis, também há muito mais semelhanças no percentil 50. Nos percentis 75 e 95 não há diferenças significativas em mais de seis meses. No entanto, no percentil 25, os valores simulados são superiores aos observados, mas em menor grau que nos valores originais.

Para comparar o desempenho do modelo nas quatro situações até aqui analisadas (modelo original, anos secos, anos chuvosos e junção de parâmetros de anos secos e anos chuvosos), contamos o número de meses em que as médias, desvio padrão, coeficientes de assimetria e de Curtose, para os valores analisados (precipitação média mensal, número de dias de precipitação mensal, precipitação diária máxima mensal e precipitação média em dia chuvoso) não diferem significativamente (de um total possível de 120 combinações de meses/variáveis). Os valores obtidos encontram-se no **Tabela 4.22**.

Tabela 4.22 Número de vezes em que as combinações meses/variáveis gerados não diferem significativamente dos observados por tipo de simulação

<i>Tipo de simulação</i>	<i>Não se rejeita a hipótese de igualdade de médias em ... casos</i>
Original	54
Anos secos	85
Anos chuvosos	84
Junção de anos secos e chuvosos	77

Perante este cenário, somos levados a pensar que se pode melhorar o modelo CLIGEN de modo a reflectir melhor a alternância existente entre anos secos e chuvosos.

De facto, o clima mediterrâneo caracteriza-se por alternância de um período de Inverno (com temperaturas médias mais baixas e precipitação mais elevada), e por um período de Verão (com temperaturas médias mais elevadas e precipitação mais baixa ou inexistente). Para além disso há uma variabilidade de baixa frequência em que alternam períodos de um ou mais anos secos com um ou mais anos chuvosos.

Nas regiões do centro-oeste dos Estado Unidos, tal não se verifica. Nesta região a precipitação ocorre ao longo de todo o ano, sem grande variabilidade de ano para ano. Pelo facto de ter sido desenvolvido principalmente com dados climáticos desta zona, o modelo CLIGEN não reproduz correctamente as características do clima mediterrâneo. Um facto curioso é que não se encontra na bibliografia consultada qualquer tentativa de validação do CLIGEN, com dados climáticos do estado da Califórnia, que se caracteriza também por um clima mediterrâneo.

5. Alterações feitas ao CLIGEN

No sentido de tentar melhorar o desempenho do modelo CLIGEN, e tendo em atenção que a simulação feita para anos secos e chuvosos e com a junção destes dois tipos de anos, tem melhores resultados em termos de não rejeição da hipótese de igualdades entre os valores simulados e observados, procurámos fazer alterações no código fonte do CLIGEN, que nos permitissem verificar se há uma melhoria do desempenho do modelo.

Fizemos pois alterações no código fonte do CLIGEN de modo a introduzir duas alterações:

- desactivar o controlo de qualidade de números aleatórios;
- introduzir uma variável de modo a considerar a simulação de anos secos e chuvosos.

5.1. *Justificação das alterações realizadas*

5.1.1. **Alteração dos números aleatórios**

De acordo com Zhang e Garbrecht (2003) o nível de confiança definido internamente pelo CLIGEN é 50%. Isto significa que um certo número de conjuntos de números aleatórios podem ser rejeitados e esses conjuntos podem conter valores extremos ou subconjuntos de valores que as afastam da média. Deste modo, a selecção de conjuntos de números aleatórios que o CLIGEN faz, altera certamente os resultados do modelo, particularmente no que diz respeito aos valores extremos. Desactivámos esta função de controlo tal como feito por Yu (2002).

5.1.2. **Introdução da variável anos secos e chuvosos**

Normalmente, a preservação que os modelos estocásticos fazem dos valores médios, não é um problema. Os problemas surgem com a *variabilidade* (por exemplo, variabilidade das médias mensais) e acontecimentos extremos (como períodos de chuvas intensas ou de grandes secas). Estas discrepâncias podem ter uma importância fundamental nos modelos de previsão de erosão ou de crescimento de plantas que usam os modelos estocásticos (Dubrovsky, 1997). Para além disso, parece que o CLIGEN tende a sobreprever a variabilidade em meses secos e a subprever a variabilidade em meses chuvosos, facto

provavelmente devido à escolha aleatória que o CLIGEN faz da probabilidade de ocorrência de um dia chuvoso a seguir a dia chuvoso (Elliot e Arnold, 2001).

Apesar de reflectirem com grande detalhe a variabilidade da precipitação diária, verifica-se que os modelos estocásticos de simulação de precipitação diária frequentemente são deficientes em relação a duas características potencialmente importantes (Wilks, 1999).

Em primeiro lugar, a sua representação da variabilidade interanual, como verificado por exemplo para as variações na precipitação mensal ou sazonal, é tipicamente inferior à do clima real (Gregory *et al.*, 1993; Jones e Thornton, 1997; Katz e Parlange, 1993; Katz e Parlange, 1998; Wilks, 1989).

Em segundo lugar, tem-se verificado que a frequência com que estes modelos produzem acontecimentos de precipitação extremos, particularmente períodos de seca longos, é também inferior à observada (Buishand, 1978; Guttorp, 1995)

Para a introdução da alternância entre anos secos e chuvosos, tivemos em consideração o número de anos secos (10 anos) e chuvosos (8 anos) do período de observação. Por simplificação considerámos que a probabilidade de ocorrência de anos secos é idêntica à de ocorrência de anos chuvosos.

Para incluirmos esta variável efectuámos as seguintes alterações. O CLIGEN gera inicialmente uma sequência de números aleatórios com distribuição normal (média zero e desvio padrão um). É gerado um número aleatório por cada ano da simulação. Depois é feita a seguinte verificação: se o aleatório gerado é inferior a zero, considera-se que o ano é seco; se o aleatório gerado é superior a zero, considera-se que o ano é chuvoso.

Utilizámos os parâmetros climáticos para anos secos e chuvosos, como apresentado anteriormente (Anexo II). Foi introduzida uma rotina que permite que, se o ano for seco, sejam utilizados os parâmetros climáticos para anos secos e se o ano for chuvoso, sejam utilizados os parâmetros climáticos para anos chuvosos.

5.2. Resultados obtidos com as alterações introduzidas

Nos **Tabela 5.1** a **Tabela 5.4** indicam-se os resultados da simulação feita com desactivação do controlo de qualidade dos números aleatórios e integração de rotina de geração de anos secos e chuvosos.

Da comparação da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos ressalta o seguinte: não se rejeita a hipótese de igualdade de média excepto em Fevereiro, Abril, Setembro e Outubro e rejeita-se a hipótese de igualdade do desvio padrão em Fevereiro, Março, Junho e Outubro. Pelo contrário rejeita-se a hipótese de igualdade das médias dos coeficientes de assimetria e de Curtose em todos os meses (**Tabela 5.1**).

No caso do número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos rejeita-se a hipótese de igualdade de média em Fevereiro, Abril, Julho, Agosto, Setembro Outubro e Dezembro. Só não se rejeita a hipótese de igualdade de desvio padrão em Julho e Agosto (**Tabela 5.2**).

No caso da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade da média excepto Setembro, mas rejeita-se a hipótese de igualdade de desvio padrão em Janeiro, Março, Outubro, Novembro e Dezembro (**Tabela 5.3**).

Já no caso da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos não se rejeita a hipótese de igualdade da média e de desvio padrão excepto em todos os meses (**Tabela 5.4**).

Tabela 5.1. Estatísticas da precipitação média mensal observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.
Média (mm)	116,20	100,54	63,46	38,15	51,31	39,65	59,55	40,55	66,53	54,71	15,72	12,76	6,56	6,79	6,59	8,40	39,82	12,36	107,91	79,51	115,92	113,72	127,93	131,97
Desvio Padrão	98,16	68,52	48,86	31,13	58,33	33,20	44,36	30,22	54,34	39,25	24,88	10,15	11,63	10,66	9,83	11,42	32,41	13,64	78,75	54,50	101,00	99,88	123,56	85,09
Coefficiente de assimetria	1,58	1,61	0,86	2,13	1,96	2,69	2,16	1,74	0,59	1,81	3,10	2,21	2,18	2,89	1,39	2,34	0,60	1,89	0,55	2,13	1,29	2,38	0,90	0,93
Coefficiente de Curtose	2,85	4,09	0,24	6,08	4,26	10,90	5,93	3,95	-0,73	3,60	10,89	6,70	3,92	10,07	0,34	6,50	-0,87	3,80	-0,64	7,71	1,50	6,44	-0,45	0,04
Percentis 25	53,40	48,96	30,25	16,26	12,73	17,86	30,45	18,86	19,20	29,41	1,38	5,86	0,00	0,90	0,00	1,24	14,53	3,35	51,88	44,80	33,38	51,91	34,55	61,47
50	83,00	86,43	47,75	29,40	34,20	34,88	53,95	29,64	56,50	46,01	7,75	10,07	1,70	2,46	1,90	3,67	32,70	7,72	72,40	64,66	115,95	79,56	67,05	113,34
75	171,20	131,60	97,68	44,75	59,40	50,66	62,15	56,18	102,20	67,65	17,83	15,51	5,55	7,08	8,63	11,74	58,05	17,38	173,58	103,74	150,60	122,86	205,80	175,54
95	269,21	229,51	132,67	92,96	143,32	92,32	131,00	90,41	166,64	135,20	50,19	30,93	35,14	26,72	25,82	32,77	92,19	41,13	215,46	167,72	345,14	271,35	330,80	313,20
Máximo	399,60	423,00	181,80	189,06	229,00	216,96	202,40	161,32	168,00	203,69	105,70	60,94	38,20	61,82	28,20	62,55	102,30	70,04	280,40	370,24	352,70	555,24	399,90	362,12
Mínimo	10,00	17,85	4,20	4,58	0,40	0,40	10,80	1,84	2,30	4,47	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,90	14,35	11,60	26,06	2,30	26,32
Diferença entre médias	-15,66		-25,31		-11,66		-19,00		-11,82		-2,96		0,24		1,81		-27,46		-28,40		-2,20		4,04	
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	
Comparação de assimetria	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0	
Comparação de Curtose	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0	

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 5.2. Estatísticas de número de dias de precipitação mensal observados e simulados pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.
Média (mm)	15,06	14,86	12,78	8,48	8,89	8,09	12,17	8,52	11,39	10,19	4,61	4,99	1,61	2,62	1,67	2,47	7,17	2,78	14,06	11,19	13,78	14,01	16,67	18,40
Desvio Padrão	6,90	2,97	4,35	2,17	6,13	2,47	5,72	2,29	5,19	2,56	4,68	1,96	1,65	1,59	1,57	1,57	4,55	1,62	6,52	2,76	6,94	2,73	7,24	2,69
Coefficiente de assimetria	0,32	0,38	-0,25	0,38	0,93	0,06	1,01	0,24	-0,80	0,04	1,51	0,19	0,62	0,42	0,73	0,19	0,80	0,73	-0,03	0,07	0,14	-0,07	-0,31	-0,05
Coefficiente de Curtose	-0,41	-0,26	-0,27	-0,36	0,12	-0,30	2,59	0,26	0,16	-0,27	1,76	0,00	-0,76	-0,15	-0,47	-0,64	0,19	0,72	-0,65	0,05	-1,12	-0,46	-1,04	0,62
Percentis 25	11,25	13,00	9,25	7,00	6,00	6,00	10,00	7,00	10,00	8,00	2,00	4,00	0,00	1,00	0,25	1,00	4,00	2,00	9,00	9,00	9,25	12,00	11,50	17,00
50	15,00	14,00	13,50	8,00	6,50	8,00	13,00	8,00	13,00	10,00	2,00	5,00	1,50	3,00	1,00	2,00	6,00	3,00	14,00	11,00	12,00	14,00	16,50	18,00
75	17,00	17,00	15,75	10,00	13,00	9,00	14,00	10,00	15,00	12,00	6,00	6,00	2,75	4,00	2,75	4,00	9,75	4,00	20,50	13,00	20,50	16,00	22,75	20,00
95	25,45	20,00	18,45	12,00	19,60	12,00	21,20	12,05	18,15	14,00	13,60	8,00	4,15	6,00	4,15	5,00	13,75	6,00	23,30	16,00	24,15	18,05	25,30	23,00
Máximo	28,00	23,00	21,00	14,00	23,00	14,00	28,00	15,00	19,00	17,00	17,00	11,00	5,00	7,00	5,00	6,00	18,00	8,00	25,00	18,00	25,00	21,00	27,00	25,00
Mínimo	4,00	8,00	4,00	4,00	2,00	2,00	3,00	3,00	0,00	4,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	3,00	3,00	8,00	3,00	10,00
Diferença entre médias	-0,20		-4,30		-0,80		-3,65		-1,20		0,38		1,01		0,80		-4,39		-2,87		0,23		1,73	
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0	
Comparação de desvio padrão	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0	

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 5.3. Estatísticas de precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.
Média (mm)	31,64	34,00	20,96	19,94	17,43	20,92	21,46	18,08	22,70	22,90	8,02	6,76	5,47	4,90	4,59	6,22	17,44	8,15	35,88	37,46	36,33	56,75	29,22	45,01
Desvio Padrão	13,45	40,93	15,28	21,33	12,81	25,34	12,10	17,63	18,16	23,02	7,63	7,09	10,59	8,18	7,08	9,48	12,76	10,21	21,76	39,63	30,27	82,45	21,53	39,48
Coefficiente de assimetria	0,17	4,56	1,27	2,91	0,36	3,93	1,06	1,63	1,05	2,60	0,75	4,45	2,44	3,21	1,56	3,32	0,94	3,11	0,74	3,46	1,21	3,30	0,59	2,04
Coefficiente de Curtose	-0,20	29,14	2,67	12,39	-0,62	19,53	0,47	2,36	0,61	7,80	-0,42	29,04	4,96	13,01	0,93	14,39	1,00	13,31	1,23	18,54	0,76	12,53	-0,70	5,43
Percentis 25	21,95	13,06	9,68	7,14	5,68	7,37	15,98	5,75	8,20	8,49	1,03	2,87	0,00	0,70	0,00	0,87	9,53	2,33	24,05	12,72	10,68	13,85	11,53	18,91
50	34,45	21,35	19,75	12,97	17,75	13,04	18,30	11,03	19,75	18,01	6,40	4,63	1,25	1,60	0,90	2,60	14,35	4,68	34,20	25,60	27,85	27,35	26,55	34,82
75	37,40	42,47	28,30	24,39	25,40	27,10	21,83	24,67	28,15	26,19	12,38	8,80	4,00	5,12	4,80	8,76	24,73	10,39	42,35	48,98	44,20	66,39	45,53	51,62
95	55,36	82,88	44,91	66,67	36,15	50,83	43,75	58,94	59,30	67,54	20,85	16,41	33,72	21,19	18,97	18,96	37,07	24,68	69,13	104,97	91,46	174,52	66,59	112,96
Máximo	57,40	333,65	64,20	146,77	43,80	164,49	49,10	80,57	64,40	124,48	24,50	58,72	33,80	52,62	19,90	61,74	49,90	67,94	90,80	298,53	108,20	504,91	72,20	229,59
Mínimo	6,60	4,68	1,00	1,64	0,20	0,20	4,40	0,79	2,30	2,04	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	1,90	5,34	6,00	3,08	2,10	4,04
Diferença entre médias	2,36		-1,01		3,49		-3,38		0,20		-1,27		-0,57		1,63		-9,29		1,59		20,42		15,79	
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	
Comparação de desvio padrão	Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0	

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 5.4. Estatísticas de precipitação média e dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN com eliminação de controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de parâmetros de anos secos e chuvosos

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.
Média (mm)	7,49	6,62	4,40	4,45	5,71	4,82	4,80	4,76	5,59	5,39	1,68	2,62	2,37	2,17	2,39	3,08	5,43	4,13	9,35	7,30	7,89	8,30	6,15	7,34
Desvio Padrão	3,76	3,92	3,29	3,25	5,47	3,72	2,67	3,38	3,60	3,67	2,02	2,35	4,39	3,23	3,06	4,45	2,79	4,19	6,62	5,05	5,98	7,38	4,27	4,74
Coefficiente de assimetria	0,89	1,22	0,32	2,12	2,11	2,26	1,27	1,99	0,51	1,88	1,20	4,79	2,77	3,23	1,33	3,43	-0,21	2,24	1,41	1,79	0,94	2,82	0,60	0,95
Coefficiente de Curtose	0,18	1,67	-1,16	6,60	6,09	6,84	1,68	5,44	-0,36	3,99	0,57	32,50	8,14	12,79	0,63	16,65	-0,18	6,77	1,77	4,30	0,27	11,08	-0,38	0,10
Percentis 25	4,97	3,75	1,42	2,21	2,23	2,41	3,01	2,57	3,04	3,10	0,03	1,44	0,00	0,46	0,00	0,59	3,83	1,33	5,16	3,68	3,22	3,83	2,80	3,41
50	6,62	5,76	4,61	3,53	4,84	4,05	3,86	3,86	5,81	4,29	0,89	1,98	0,65	0,96	0,90	1,43	5,23	3,20	7,25	6,27	6,12	5,97	5,93	6,40
75	8,32	8,78	7,00	5,88	7,09	5,57	6,21	6,17	6,80	6,49	2,99	2,89	2,33	2,64	3,56	3,90	7,49	5,23	12,00	8,82	10,92	10,14	8,10	9,48
95	14,54	13,45	9,86	11,42	13,17	11,98	9,35	10,50	11,62	14,51	5,96	5,77	10,54	8,91	8,60	10,92	9,30	12,09	21,20	17,73	19,07	22,39	13,09	17,22
Máximo	15,71	20,14	10,24	21,01	23,47	21,70	11,93	20,16	12,85	20,37	6,23	20,31	17,30	20,61	9,35	31,28	10,12	23,96	27,00	30,85	21,73	50,48	15,20	19,84
Mínimo	2,57	1,73	0,16	0,65	0,00	0,20	1,18	0,46	0,60	1,12	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,78	1,55	0,55	1,86	0,63	1,45
Diferença entre médias	-0,88		0,05		-0,89		-0,04		-0,20		0,94		-0,20		0,69		-1,29		-2,05		0,41		1,19	
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	

C: CLIGEN

Obs.: Observado

5.3. Discussão dos resultados obtidos com as alterações

Verifica-se que com estas alterações, não se rejeita a hipótese de igualdade das populações entre os valores observados e gerados em 65 casos, o que representa uma melhoria em relação à simulação original, mas ainda está longe dos valores que se obtêm quando se consideram os anos secos e chuvosos separadamente ou mesmo quando se juntam os valores de duas simulações feitas uma com anos secos e outra com anos chuvosos. A melhoria mais evidente encontra-se na comparação de médias e desvio padrão na precipitação média em dia chuvoso em que não se rejeita a hipótese de igualdade de médias em nenhum dos meses considerados.

Segundo Zhang e Garbrecht (2003) a subprevisão da variabilidade interanual e entre meses homólogos de cada ano observada no modelo original, resulta da assumption simplificadora feita pelo CLIGEN que o clima, ou mais especificamente a ocorrência de precipitação diária, é um acontecimento estático. O facto de o clima não ser estático dá origem a uma variabilidade de baixa frequência que não é simulada explicitamente pelo modelo. Segundo Wilks (1999) os modelos estacionários simples, isto é, aqueles em que os parâmetros estatísticos não variam de ano para ano, não podem reproduzir adequadamente a variabilidade de um clima que não é estático e que é necessário introduzir um qualquer grau de não estaticidade condicionando certos parâmetros específicos em co-variações ou escolhendo a variabilidade aleatoriamente. Uma vez que a probabilidade de ocorrência de precipitação em cada mês varia de ano para ano, e que essa variação causa em grande medida flutuações na precipitação mensal e anual, deve ser utilizada uma função de probabilidade e não um valor constante para cada mês como é utilizado no CLIGEN. Numa primeira abordagem pode ser utilizado um esquema aleatório para atribuição de valores (Zhang e Garbrecht, 2003).

Em termos de comparação entre o modelo original e o modelo por nós proposto, podemos verificar o seguinte:

5.3.1. Precipitação média mensal

O modelo original preserva melhor os valores da precipitação média mensal (rejeição de hipótese de igualdade de médias em um mês) do que o modelo por nós proposto (rejeição de hipótese de igualdade de médias em quatro meses). No entanto, o modelo por nós proposto preserva melhor a variabilidade da precipitação média mensal, o que se pode ver

em termos de comparação de diferenças de desvio padrão (dois meses em que não se rejeita a hipótese de igualdade de desvio padrão no modelo original contra oito meses no modelo por nós proposto).

5.3.2. Número de dias de precipitação mensal

O modelo original preserva melhor os valores de número de dias de precipitação mensal (rejeição de hipótese de igualdade de médias em um mês) do que o modelo por nós proposto (rejeição de hipótese de igualdade de médias em sete meses). Também preserva melhor o desvio padrão (rejeição de hipótese de igualdade de desvio padrão em sete meses no modelo original contra nove meses no modelo por nós proposto).

5.3.3. Precipitação diária máxima mensal

O modelo original preserva melhor os valores da precipitação diária máxima mensal (sem rejeição de hipótese de igualdade de médias em qualquer mês) do que o modelo por nós proposto (rejeição de hipótese de igualdade de médias em um mês). No entanto, o modelo por nós proposto preserva melhor a variabilidade da precipitação diária máxima mensal, o que se pode ver em termos de comparação de diferenças de desvio padrão (cinco meses em que não se rejeita a hipótese de igualdade de desvio padrão no modelo por nós proposto contra dez meses no modelo original).

5.3.4. Precipitação média em dia chuvoso

É neste critério que o modelo por nós proposto melhora significativamente as prestações da simulação. De facto, enquanto no modelo original se rejeita a hipótese de igualdade de médias de precipitação em dia chuvoso em dois meses e do desvio padrão em sete meses, no modelo por nós proposto, não se rejeita a hipótese de igualdade das médias em nenhum mês. Sendo o valor da precipitação em dia chuvoso um dos factores determinantes da intensidade de precipitação (o outro é a duração da chuvada), parece-nos que este factor será bastante importante na previsão que o modelo WEPP fará da perda de solo.

5.4. Resumo de resultados

Relativamente aos resultados apresentados no **Tabela 4.22** relativamente ao Número de vezes em que as combinações meses/variáveis gerados não diferem significativamente dos

observados por tipo de simulação podemos agora acrescentar que neste modelo o número de combinações meses/variáveis é de 65.

6. Validação do modelo por nós proposto com outro conjunto de dados climáticos

Para a validação da metodologia por nós proposta, utilizámos um conjunto de dados diferentes dos anteriormente utilizados. Utilizámos para isso os dados de precipitação fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, referentes à estação meteorológica de Castelo Branco, no período de 1999 a 2003. Para simplicidade, referir-nos-emos a estes dados como “Castelo Branco INMG”.

A estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica fica situada a cerca de 3 km dos campos de erosão, numa região plana, sem grandes obstáculos entre estes dois pontos, pelo que se presume que as condições climáticas não serão muito diferentes. No entanto, é provável que se verifiquem diferenças entre a precipitação observada, devido à variabilidade espacial da precipitação.

Na **Tabela 6.1** indicam-se os principais valores estatísticos da precipitação Castelo Branco INMG.

Tabela 6.1 Valores estatísticos da precipitação Castelo Branco INMG

	<i>Jan.</i>	<i>Fev.</i>	<i>Mar.</i>	<i>Abr.</i>	<i>Mai.</i>	<i>Jun.</i>	<i>Jul.</i>	<i>Ago.</i>	<i>Set.</i>	<i>Out.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dez.</i>
Média	110,7	45,1	101,6	68,4	51,3	4,1	8,1	10,3	61,1	136,3	83,6	129,1
Desvio padrão	75,6	45,7	63,9	61,1	44,1	2,9	8,1	12,5	45,7	68,6	59,3	129,7
Assimetria	0,1	1,0	0,8	1,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,5	-0,4	-0,5	1,0
Nº dias de precipit.	11,6	6,0	13,4	12,6	8,8	2,0	2,2	3,0	7,0	14,4	11,8	14,0
Assimetria	0,58	1,27	1,30	0,54	-1,73	1,36	-0,55	0,52	1,27	-1,86	-0,39	0,28
PWW	0,28	0,14	0,34	0,31	0,19	0,01	0,01	0,03	0,15	0,31	0,26	0,34
PWD	0,10	0,08	0,09	0,11	0,10	0,06	0,06	0,06	0,09	0,15	0,13	0,12

Fizemos correr o modelo CLIGEN com as alterações anteriormente descritas (introdução de dados de anos secos e chuvosos separadamente, probabilidade de ocorrência de ano seco e anos chuvosos de 50%, e sem controlo de qualidade de números aleatórios).

Os resultados obtidos com esta simulação encontram-se nas tabelas Tabela 6.2 a 6.6.

Verifica-se que não se rejeita a hipótese de igualdade de médias entre os valores observados e simulados em 76 combinações meses/variáveis gerados e observados. Este valor é

praticamente idêntico ao obtido com os dados originais quando se faz a junção de anos secos e anos chuvosos (Ponto 4.5).

Podemos pois concluir que o modelo CLIGEN com as alterações por nós propostas, simula adequadamente as principais variáveis estatísticas da precipitação na região de Castelo Branco, podendo ser utilizado em conjunto com o modelo WEPP de previsão de erosão hídrica.

Tabela 6.3 Estatísticas da precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG

	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		
	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	
Média (mm)	96,12	110,66	36,50	45,26	80,39	101,60	48,87	68,44	34,78	51,28	2,15	4,06	7,78	8,10	3,30	10,26	50,97	61,06	127,79	136,28	70,21	83,56	81,77	129,10	
Desvio Padrão	27,27	75,58	25,81	45,53	36,32	63,95	17,25	61,12	16,43	44,07	2,35	2,86	7,81	8,12	3,07	12,52	21,60	45,69	24,47	68,64	21,89	59,30	53,17	129,68	
Coefficiente de assimetria	0,99	0,13	0,68	1,02	0,46	0,81	0,31	1,16	0,84	0,31	0,81	0,37	1,84	0,49	0,91	0,66	1,06	1,50	0,10	-0,38	0,46	-0,48	0,48	0,96	
Coefficiente de Curtose	1,85	1,75	-0,76	-0,16	-0,75	-0,46	-0,23	1,53	0,45	-0,79	-0,71	-2,97	3,94	-2,72	0,31	-2,93	2,11	3,08	-0,63	-2,39	-0,66	-3,09	-1,04	0,44	
Percentis	25	78,19	95,10	14,43	13,50	51,02	53,30	33,99	26,70	23,13	18,90	0,00	2,00	2,71	2,40	0,64	1,00	35,05	44,60	111,24	75,90	52,95	21,90	34,19	22,20
	50	91,59	116,00	27,78	27,00	72,06	86,50	48,11	64,60	30,41	54,40	1,35	3,00	5,43	4,60	2,84	2,30	49,20	49,80	126,45	169,80	66,18	114,20	61,62	115,20
	75	110,81	116,70	55,71	67,40	108,17	133,20	61,89	76,70	44,52	71,10	3,46	7,00	10,37	15,40	4,66	21,70	60,49	58,20	148,14	171,10	85,90	122,70	123,84	170,40
	95	141,90	198,46	83,90	104,92	143,68	183,36	74,88	148,06	63,88	103,82	6,65	7,16	21,95	17,56	9,34	25,14	86,92	121,64	163,74	204,14	110,98	137,98	172,08	296,64
Máximo	205,83	218,90	95,94	114,30	169,34	195,90	100,61	165,90	87,67	112,00	7,39	7,20	37,83	18,10	11,30	26,00	138,29	137,50	186,39	212,40	124,13	141,80	203,77	328,20	
Mínimo	52,40	6,60	4,24	4,10	18,69	39,10	13,60	8,30	9,10	0,00	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	0,30	15,32	15,20	74,48	52,20	32,93	17,20	10,24	9,50	
Diferença entre médias	-14,54		-8,76		-21,21		-19,57		-16,50		-1,91		-0,32		-6,96		-10,09		-8,49		-13,35		-47,33		
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de assimetria	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		
Comparação de curtose	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 6.4 Estatísticas do número de dias de precipitação mensal observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.
Média (nº dias)	11,97	12,40	6,54	6,80	13,84	13,40	12,91	12,60	7,79	8,80	0,80	2,00	1,93	2,00	1,18	3,00	6,26	7,00	13,73	14,40	13,05	11,80	14,66	15,00
Desvio Padrão	2,67	7,33	2,00	4,21	2,81	7,09	2,62	7,02	2,45	5,17	1,04	1,22	1,28	1,22	1,60	2,12	1,78	4,36	2,50	4,28	2,47	6,87	2,71	8,57
Coefficiente de assimetria	0,35	0,38	0,45	0,60	0,10	1,30	0,00	0,54	0,40	-1,73	1,17	1,36	0,43	1,36	1,00	0,52	0,36	1,27	0,09	-1,86	-0,40	-0,39	0,27	0,28
Coefficiente de Curtose	-0,05	0,86	0,17	0,27	0,06	2,49	-0,21	0,92	0,29	3,25	0,56	2,00	0,12	2,00	-0,48	-0,96	-0,16	1,49	0,07	3,87	-0,63	-3,05	0,23	0,27
Percentis																								
25	10,00	10,00	5,00	4,00	12,00	10,00	11,00	9,00	6,00	9,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	5,00	4,00	12,00	15,00	11,00	5,00	13,00	12,00
50	12,00	11,00	6,00	7,00	14,00	13,00	13,00	13,00	8,00	10,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	6,00	6,00	14,00	16,00	13,00	14,00	14,50	13,00
75	14,00	15,00	8,00	8,00	16,00	13,00	15,00	14,00	10,00	12,00	1,00	2,00	3,00	2,00	2,00	4,00	7,25	8,00	15,00	16,00	15,00	18,00	16,00	19,00
95	17,00	21,40	11,00	12,00	19,00	22,60	17,05	21,20	12,00	12,80	3,00	3,60	4,00	3,60	4,00	5,60	9,00	12,80	18,00	17,60	16,05	18,00	20,00	25,40
Máximo	19,00	23,00	12,00	13,00	20,00	25,00	19,00	23,00	16,00	13,00	4,00	4,00	6,00	4,00	5,00	6,00	11,00	14,00	20,00	18,00	18,00	18,00	22,00	27,00
Mínimo	6,00	3,00	2,00	2,00	6,00	6,00	6,00	4,00	3,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	3,00	3,00	7,00	7,00	8,00	4,00	9,00	4,00
Diferença entre médias	-0,43		-0,26		0,44		0,31		-1,01		-1,20		-0,07		-1,82		-0,74		-0,67		1,25		-0,34	
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0	

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 6.5 Estatísticas da precipitação diária máxima mensal observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.
Média (mm)	15,77	28,8	9,98	18,80	11,02	28,4	8,65	19,00	10,83	14,00	1,58	3,18	4,36	3,18	1,76	5,06	13,68	26,80	18,47	31,60	10,34	25,60	18,00	28,60
Desvio Padrão	9,52	15,4	6,50	15,09	6,74	10,09	4,84	11,51	6,15	12,02	1,67	2,41	3,68	2,41	1,82	5,50	7,14	12,93	7,29	11,04	5,05	13,37	12,53	26,23
Coefficiente de assimetria	3,25	-0,4	1,69	0,02	3,08	0,51	3,51	0,69	1,67	0,22	0,93	1,22	1,79	1,22	2,27	0,63	3,25	0,82	1,67	-0,57	2,11	-0,03	2,53	1,29
Coefficiente de Curtose	14,26	1,71	3,60	-1,86	13,83	-0,11	21,40	-0,09	3,48	-2,36	0,01	1,04	5,15	1,04	8,24	-2,83	16,39	2,23	3,68	-2,07	5,82	-2,67	9,47	1,71
Percentis																								
25	10,14	27,0	5,46	5,00	7,05	21,00	5,46	10,00	6,48	7,00	0,00	2,00	1,83	2,00	0,59	1,00	9,42	24,00	13,18	23,00	7,05	15,00	10,32	8,00
50	12,90	29,0	7,22	23,00	9,71	30,00	8,12	19,00	9,14	10,00	1,32	2,00	4,62	2,00	1,42	2,00	12,15	25,00	16,45	37,00	9,19	25,00	14,83	26,00
75	18,61	33,0	13,03	26,00	12,69	31,00	10,32	23,00	12,98	25,00	2,65	4,00	5,59	4,00	2,36	10,00	15,97	27,00	21,43	38,00	11,45	39,00	20,06	32,00
95	30,85	45,8	22,37	35,60	22,38	40,60	15,73	33,40	23,13	27,40	5,07	6,40	10,12	6,40	4,66	11,60	22,79	43,00	32,12	42,00	17,96	39,00	38,75	63,20
Máximo	72,86	49,0	36,86	38,00	50,75	43,00	41,77	36,00	36,35	28,00	5,79	7,00	19,66	7,00	10,14	12,00	57,52	47,00	50,75	43,00	32,09	39,00	83,26	71,00
Mínimo	8,12	6,0	2,75	2,00	3,87	17,00	2,69	7,00	3,14	0,00	0,00	0,90	0,00	0,90	0,00	0,30	5,76	11,00	9,80	17,00	4,29	10,00	3,16	6,00
Diferença entre médias	-13,03		-8,82		-17,38		-10,35		-3,17		-1,60		1,18		-3,30		-13,12		-13,13		-15,26		-10,60	
Teste de comparação de médias	Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0		Rejeitar H0	
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	

C: CLIGEN

Obs.: Observado

Tabela 6.6 Estatísticas da precipitação média em dia chuvoso observada e simulada pelo CLIGEN para os dados Castelo Branco INMG

Médias	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Mai.		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.	C.	Obs.
Média (mm)	8,02	7,95	5,48	6,73	5,79	7,47	3,78	4,54	4,46	4,68	0,82	2,57	3,41	2,57	0,56	2,44	8,12	8,81	9,33	9,30	5,41	6,33	5,65	6,96
Desvio Padrão	1,26	3,51	3,35	5,21	2,40	2,32	1,07	2,05	1,58	4,27	1,27	2,54	2,42	2,54	0,91	2,61	2,29	4,04	1,04	3,53	1,37	2,02	3,44	4,65
Coefficiente de assimetria	1,19	-1,32	0,54	0,08	0,23	-0,54	0,02	0,05	1,23	0,85	1,85	1,96	0,45	1,96	2,39	1,20	1,23	0,59	0,73	0,16	0,12	0,11	0,16	-0,31
Coefficiente de Curtose	3,35	2,48	-1,06	-1,69	-1,77	0,27	-1,28	-1,24	2,21	0,79	3,56	4,16	-0,06	4,16	8,73	0,24	2,67	1,26	0,30	0,12	-1,25	-2,52	-1,59	-2,68
Percentis																								
25	7,28	7,78	2,52	1,93	3,59	6,52	2,73	2,97	3,39	2,10	0,00	1,50	1,42	1,50	0,00	0,77	6,53	7,28	8,62	7,46	4,16	4,38	2,31	2,38
50	7,85	8,65	3,74	8,43	4,45	7,84	3,98	4,97	4,25	4,18	0,00	1,80	3,73	1,80	0,00	1,00	7,80	8,30	9,25	9,43	5,50	6,34	4,76	8,97
75	8,62	9,52	8,11	8,79	8,27	8,65	4,65	5,48	5,08	5,93	1,43	2,00	5,10	2,00	1,06	3,62	9,23	9,82	9,89	10,69	6,62	7,88	8,83	9,60
95	9,91	11,18	11,20	12,56	8,84	9,93	5,35	6,87	7,40	10,15	3,36	6,00	7,10	6,00	2,13	5,92	11,37	13,86	11,51	13,47	7,14	8,59	10,91	11,64
Máximo	13,46	11,60	14,03	13,50	10,40	10,25	5,85	7,21	10,28	11,20	5,79	7,00	10,90	7,00	5,58	6,50	17,29	14,87	12,18	14,16	8,87	8,76	11,88	12,16
Mínimo	5,46	2,20	0,98	1,03	2,75	4,10	2,16	2,08	1,96	0,00	0,00	0,55	0,00	0,55	0,00	0,30	4,21	3,80	7,53	4,74	3,20	4,30	0,68	1,71
Diferença entre médias	0,07		-1,26		-1,68		-0,76		-0,22		-1,75		0,84		-1,88		-0,69		0,04		-0,92		-1,31	
Teste de comparação de médias	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	
Comparação de desvio padrão	Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0		Rejeitar H0		Não rejeitar H0		Não rejeitar H0	

C: CLIGEN

Obs.: Observado

7. Conclusões

O CLIGEN é sem dúvida um bom modelo de simulação climática como entrada de dados para o modelo de previsão de perda de solo WEPP. No entanto, para utilização em regiões com um clima tipo mediterrâneo, com um período seco e um período chuvoso bastante marcados e sobretudo, com alternância de sequências de um ou vários anos secos com um ou vários anos chuvosos, não reproduz bem a variabilidade interanual verificada em termos dos quatro parâmetros estudados.

As alterações por nós formuladas, com a introdução separada de parâmetros de anos secos e de anos chuvosos, tiveram um bom desempenho quando se consideram os anos secos e chuvosos separadamente. Quando se juntam os resultados de uma simulação com anos secos e uma simulação com anos chuvosos, os resultados, não sendo tão bons como as duas simulações separadas, são melhores que o CLIGEN original.

Com a alteração por nós proposta de eliminar o controlo de qualidade de números aleatórios e introdução de uma rotina de modo a introduzir separadamente os parâmetros de anos secos e de anos chuvosos, verificou-se uma melhoria no desempenho em relação ao CLIGEN, mas que não chega a igualar o modelo em que se juntam duas simulações uma de anos secos e outra de anos chuvosos.

Podemos pois afirmar que, para a utilização deste simulador climático como entrada de dados para o modelo WEPP, é necessário ter em atenção esta característica, uma vez que tal pode afectar os resultados finais em termos de escoamento e perda de solo previstos pelo WEPP. Não tendo a nossa simulação sido inteiramente bem sucedida, parece-nos dar indicações para um futuro desenvolvimento a seguir no sentido de melhorar o modelo de simulação climática CLIGEN.

8. Bibliografia

- Aitken, A. P. 1973. Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. *J. Hydrol.* 20:121-136.
- Al-Durrah, M. M., e J. M. Bradford. 1982. The Mechanism of Raindrop Splash on Soil Surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1086-1090.
- Arnold, J. G., e J. R. Williams. 1989. Stochastic Generation of Internal Storm Structure at a Point. *Trans. ASAE* 32:161-167.
- Baffaut, C., M. A. Nearing, e G. Govers. 1998. Statistical Distributions of Soil loss from Runoff Plots and WEPP Model Simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:756-763.
- Batchelor, B. 1994. Models as metaphors: The role of modeling in pollution prevention. *Waste Management* 14:243-251.
- Beck, M. B. 1987. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. *Water Resour. Res.* 23:1393-1442.
- Beldring, S. 2002. Multi-criteria validation of a precipitation-runoff model. *Journal of Hydrology* 257:189-211.
- Beven, K. 1989. Changing ideas in hydrology -- The case of physically-based models. *Journal of Hydrology* 105:157-172.
- Boardman, J e Favis-Mortlock, D. T. How will future climate change and land-use change affect rates of erosion on agricultural land? 498-501. 2001. Honolulu. *Soil Erosion Research for the 21st Century*.
- Buishand, T. A. 1978. Some remarks on the use of daily rainfall models. *Journal of Hydrology* 36:295-308.
- CCE. 2002 Comunicação da Comissão ao Conselho, ao Parlamento Europeu, ao Comité Económico e Social e ao Comité das Regiões - Para uma estratégia temática de protecção do solo. 1-38. 16-4-2002.
- Chapman, T. 1998. Stochastic modeling of daily rainfall: the impact of adjoining wet days on the distribution of rainfall amounts. *Environmental Modeling and Software* 13:317-324.
- Chapman, T. G. 1997. Stochastic models for daily rainfall in the Western Pacific. *Mathematics and Computers in Simulation* 43:351-358.
- Clarke, R. T. 1973. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology* 19:1-20.
- Cortez, N. R. S. 1987. *Erosão Hídrica do Solo: A Equação Universal de Perda de Solo e Outros Modelos de Previsão*. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- Cox, D. R., e V. Isham. 1994. Stochastic models of precipitation. p. 3-18. *In* V. Barnett, and K. F. Turkman (ed.) *Statistics for the environment 2, Water issues*. Wiley, Wiley.
- Donigian, A. S. e Rao, P. S. C. Selection, application and validation of environmental models. 577-601. 2004. Utah State University. D. G .DeCoursey.

-
- Dubrovsky, M. 1977. Creating Daily Weather Series with the use of the Weather Generator. *Environmetrics* 8:409-424.
- Dubrovsky, M. 1997. Creating Daily Weather Series with the use of the Weather Generator. *Environmetrics* 8:409-424.
- Dubrovsky, M., J. Buchtele, e Z. Zalud. 2004. High-Frequency and Low-Frequency Variability in Stochastic Daily Weather Generator and Its Effect on Agricultural and Hydrologic Modeling. *Climatic Change* 63:145-179.
- Duley, F. L. 1987 Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc* 12, 179..
- EEA. Assessment and reporting on soil erosion - Background and workshop report. http://reports.eea.eu.int/technical_report_2003_94/en/tech_94.pdf, 1-101. 2003. 13-7-2005.
- Elliot, W. J., e C. D. Arnold. 2001. Validation of the Weather Generator CLIGEN with Precipitation Data from Uganda. *Trans. ASAE* 44:53-58.
- Ellison, W. D. 1947. Soil Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J* 12:479-484.
- FAO. 2004 Erosion de suelos en America Latina. <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S00.htm#Contents> . 1993. 9-1-2004.
- FAO/UNESCO. 1994 FAO/UNESCO Soil Map of the World, Revised Legend, with corrections. *World Resources Report* [60]. 1988. Rome, FAO. (Reprinted as Technical Paper 20, ISRIC, Wageningen).
- Favis-Mortlock, D. T., e A. J. T. Guerra. 1999. The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil. *CATENA* 37:329-354.
- Ferreira, A. G., B. E. Larock, e M. J. Singer. 1985. Computer Simulation of Water Drop Impact in a 9.6-mm Deep Pool. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1502-1507.
- Ferreira, A. G., e M. J. Singer. 1985. Energy Dissipation for Water Drop Impact into Shallow Pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1537-1542.
- Figueiredo, T., Poesen, J., e Ferreira, A. G. The relative importance of low frequency erosion events: results from erosion plots under vineyards in the douro region, northeast Portugal. 1998. Montpellier.
- Flanagan, D. C. Format of CLIGEN weather station statistics input files. <http://hydrolab.arsusda.gov/nicks/parameters.htm> . 2001.
- Flanagan, D. C. e Livingston, S. J. USDA Water Erosion Prediction Project. WEPP User Summary. 1995. West Lafayette, Indiana, National Soil Erosion Laboratory. NSERL Report n° 11.
- Flanagan, D. C., Meyer, C. R., Yu, B., e Scheele, D. L. Evaluation and Enhancement of the CLIGEN Weather Generator. *J. C. Ascough II and D. C. Flanagan., St. Joseph, MI ASAE.* 701P0007. 107-110. 2001.
- Flanagan, D. C., e M. A. Nearing. 1995. *Water Erosion Prediction Project – Hillslope - Profile and Watershed Model Documentation*. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Gabele, T. (2001) Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. http://www.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/creams.html . 1997. 23-5-2001.
-

-
- Ghadiri, H., e D. Payne. 1986. The risk of leaving the soil surface unprotected against falling rain. *Soil and Tillage Research* 8:119-130.
- Grayson, R. B., I. D. Moore, e T. A. McMahon. 1992. Physically-based hydrologic modeling: II. Is the concept realistic? *Water Resour. Res.* 26:2659-2666.
- Gregory, J. M., T. M. L. Wigley, e P. D. Jones. 1993. Application of Markov models to area-average daily precipitation series and interannual variability in seasonal totals. *Climate Dynamics* 8:299-310.
- Guttorp, P. 1995. Stochastic modeling of scientific data.
- Haan, C. T. 1988. Parametric uncertainty in hydrologic modeling. *Trans. ASAE* 32:137-146.
- Hairsine, P. B., e C. W. Rose. 1992. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 2 rill Flow. *Water Resources Research* 28:245-250.
- Harmel, R. D., Richardson, C. W., Hanson, C. L., e Johnson, G. L. Simulating maximum and minimum daily temperature with the normal distribution. 2001. 1-8-2001.
- Hudson, N. 1995. Soil conservation; Fully revised and updated, 3rd ed. Ames, IA.
- INMG. Normais climatológicas da região de "Trás-os-Montes e Alto Douro e Beira Interior", correspondentes a 1951 - 1980. O Clima de Portugal, Fascículo XLIX, Volume 3 - 3ª Região. 1991. Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.
- James, L. D., e S. J. Burges. 1982. Selection, calibration and testing of hydrologic models. p. 437-474. *In* C. T. Hann (ed.) *Hydrologic Modeling of small Watersheds*. Asae monograph, Asae monograph.
- Jones, P. G., e P. K. Thornton. 1997. Spatial and temporal variability of rainfall related to a third-order Markov model. *Agricultural and Forest Meteorology* 86:127-138.
- Julien, P. Y., e D. B. Simons. 1985. Sediment Transport Capacity of Overland Flow. *Transactions of the ASAE* 28:755-762.
- Katz, R. W., e M. B. Parlange. 1993. Effects of an index of atmospheric circulation on stochastic properties of precipitation. *Water Resour. Res.* 29:2335-2344.
- Katz, R. W. e M. B. Parlange. 1998. Overdispersion Phenomenon in Stochastic Modeling of Precipitation. *Journal of Climate* 11:591-601.
- Lal, R. 1994. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. p. 1-10. *In* R. Lal (ed.) *Soil Erosion Research Methods*.
- Lane, L. J., E. D. Shirley, e Singh V.P. 1988. Modeling erosion on hillslopes. p. 287-308. *In* M. G. Anderson (ed.) *Modeling Geomorphological Systems*. John Wiley and Sons, John Wiley and Sons.
- Lei, T. W., Q. Zhang, J. Zhao, e Z. Tang. 2004. A Laboratory Study of Sediment Transport Capacity in the Dynamic Process of Rill Erosion. *Transactions of the ASAE* 44:1537-1542.
- Machado, R. E. 2002. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Universidade de São Paulo.
- Mason, S. J. 2004. Simulating Climate over Western North America Using Stochastic Weather Generators. *Climatic Change* 62:155-187.

-
- Meyer, C. R. CLIGEN weather generator, expanded and improved. <http://horizon.nserl.purdue.edu/Cligen/> Cligen 5.2254. 4-12-2004a. 18-5-2004a.
- Meyer, C. R. Index of <http://horizon.nserl.purdue.edu//Cligen/CligenSource/> . 15-10-2004b. 15-10-2004b.
- Meyer, C. R., C. Renschler, e R. C. Vining. 2002. Implementing quality control techniques for random number generators to improve stochastic weather generators: the Cligen experience. *Journal of Applied Meteorology* No prelo.
- Meyer, L. D. Soil erosion concepts and misconceptions. [Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference. Denver]. 1976.
- Moore, I. D., e J. C. Gallant. 1991. Overview of hydrologic and water quality modeling. p. 1-9. *In* I. E. Moore (ed.) *Modeling the fate of chemicals in the environment*. Australian National University, Australian National University.
- Morgan, R. P. C. 1995. *Soil erosion and conservation*. Longman.
- Murteira, B., C. S. Ribeiro, J. A. Silva, e C. Pimenta. 2001. *Introdução à Estatística*. Alfragide.
- Nash, J. E. e Sutcliffe, J. E. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10[3], 282-290. 2004.
- Nash, J. E., e J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models I: A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10:282-290.
- Nearing, M. A., e D. B. Beasley. 1995. *Modeling soil erosion by water and wind - Introduction*. Nomograph on Soil Erosion.
- Nearing, M. A., L. J. Lane, e V. L. Lopes. 1994. Modeling Soil Erosion. p. 127-156. *In* R. Lal (ed.) *Soil erosion: research methods*. Soil and Water Conservation Society, Soil and Water Conservation Society.
- Nearing, M. N., L. Deer-Ascough, e J. Laflen. 1990. Sensivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Trans. ASAE* 33:839-849.
- Nicks, A. D. Generation of climate data. D. G. DeCoursey. [Natural Resources Modeling Symp.]. 1985. Pingree Park, CO. USDA-ARS, ARS-30. 21-10-1983.
- Nicks, A. D., L. J. Lane, e G. A. Gander. 1995. CH. 2 - Weather Generator. p. 2.1-2.22. *In* D. C. Flanagan and M. A. Nearing (ed.) (ed.) *USDA - Water Erosion Prediction Project (WEPP) Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. National Soil Erosion Research Laboratory, National Soil Erosion Research Laboratory.
- NSERL. WEPP. [version 2002.700, WEPP Windows interface (March 2004),]. 31-3-2004.
- O'Neal, M. R., Flanagan, D., e Meyer, C. R. Evaluation of the WEPP Model in Response to Changes in the CLIGEN Stochastic Weather Generator . [Asae Meeting paper 02-2225]. 2002. St. Joseph, Mich.
- Oliva, R. 2003. Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. *European Journal of Operational Research* 151:552-568.
- Oliveira, V. P. S. 2003. Modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação. PhD thesis, Universidade Federal de Viçosa.
- Ott, L. 1988. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*. Boston.
-

-
- Parsons, J. E., Thomas, D. L., e Huffman, R. L. Agricultural on-point source water quality models: their use and application . <http://www3.bae.ncsu.edu/Regional-Bulletins/Modeling-Bulletin/> . 2001. 13-5-2004.
- Pimentel, D., Terhune, R., Dyson-Hudson, e Rocherau, S. Land degradation: effect on food and energy resources. *Science* 94, 149-155. 1976.
- Pinheiro, M. G. Carta de Solos da Quinta Senhora de Mércules. 1990. Castelo Branco, Centro de Estudos de Pedologia do IICT e Escola Superior Agrária de Castelo Branco.
- Refsgaard, J., e J. Knudsen. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resour. Res.* 32:2189-2202.
- Renard, K. G, Foster, G., Weesies, G. A., McCool, D. K, e Yoder, S. C. Guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture[Agricultural Handbook, N° 703], -404. 1996.
- Risse, L. M., e M. A. Nearing. 1995. Modeling soil erosion by water and wind - Evaluation of soil erosion models.
- Risse, L. M., M. A. Nearing, e X. C. Zhang. 1995. Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions. *Journal of Hydrology* 169:1-24.
- Scheele, D. L., Elliot, W. J., e Hall, D. e. Enhancements to the CLIGEN Weather Generator for Mountainous or Custom Applications. 392-395. 2001. J. C. Ascough II and D. C. Flanagan., St.Joseph. 5-1-2001.
- Semenov, M. A., e J. R. Porter. 1995. Climatic variability and the modeling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology* 73:265-283.
- Sorooshian, S., e V. K. Gupta. 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resour. Res.* 19:260-268.
- Srikanthan, R., e T. A. McMahon. 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. *Hydrology and Earth System Sciences* 5:653-670.
- Stone, J. J., L. J. Lane, E. D. Shirley, e M. Hernandez. 1995. Hillslope surface hydrology. p. 4.1-4.20. *In* D. C. Flanagan and M. A. Nearing (ed.) (ed.) USDA - Water Erosion Prediction Project (WEPP) Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. National Soil Erosion Research Laboratory, National Soil Erosion Research Laboratory.
- Tomás, P. M. P. P. 1992. Estudo da erosão hídrica em solos agrícolas. Aplicação à região sul de Portugal. Master thesis, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Tomás, P. M. P. P. 1997. Modelos de previsão da erosão hídrica em solos agrícolas. PhD thesis, Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico.
- Troutman, B. M. 1985. Errors and parameter estimation in precipitation-runoff modeling. *Water Resour. Res.* 28:1214-1222.
- UNEP. 1991. Status of desertification and implementation of UN plan of action to combat desertification. Nairobi.
- UNEP. 1992. World Atlas of Desertification. Nairobi.
- UNEP. 2002. Global Environment Outlook 3 *Past, present and future perspectives*. Earthscan Publications Ltd, London.

-
- United States Department of Transportation. 2001 Model Validation and Reasonableness Checking Manual. United States Department of Transportation . 28-7-2001.
- Wilks, D. S. 1989. Conditioning stochastic daily precipitation models on total monthly precipitation. *Water Resour. Res.* 25:1429-1439.
- Wilks, D. S. 1999. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. *Agricultural and Forest Meteorology* 93:153-169.
- Wilks, D. S. 1995. *Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction*. New York.
- Williams, J. R., A. D. Nicks, e J. G. Arnold. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129-144.
- Williams, J. R., A. D. Nicks, e J. G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *ASCE Hydraulics J.* 111:970-986.
- Williams, J. R. *The EPIC model*. <http://www.brc.tamus.edu/epic/> [U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service]. 1998. 13-1-2004.
- Wischmeier, W. H. e Smith, D. D. *Predicting Rainfall Erosion East of the Rocky Mountains - A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*. USDA-ARS. *Agricultural Handbook* 282, 1-49. 1965.
- Wischmeier, W. H. e Smith, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. *Agricultural Handbook*, 537, 1-78. 1978. Washington. USDA.
- Woolhiser, D. A., T. O. Keefer, e K. T. Redmond. 1993. Southern oscillation effects on daily precipitation in the southwestern United States. *Water Resour. Res.* 29:1287-1295.
- Yapo, P. O., H. V. Gupta, e S. Sorooshian. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology* 181:23-48.
- Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, e W. P. Anderson. 1989. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Jour. of Soil and Water Conservation* 44.
- Yu, B. Improvement and evaluation of CLIGEN for storm generation. *Trans. ASAE* 46, 301-307. 2000.
- Yu, B. 2002. Using CLIGEN to Generate RUSLE Climate Inputs. *Trans. ASAE* 45:993-1001.
- Yu, B. 2003. An assessment of uncalibrated CLIGEN in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* 119:131-148.
- Zeleeke, G., Winter, T., e Flanagan, D. BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP Using Observed Standard Weather Data Sets. *WEPP* . 1995. 13-6-2002.
- Zhang, X. C. *Assessing Impact of Interannual Climate Variations on Water Resources and Crop Productivity Using CLIGEN and WEPP Models*. [American Meteorological Society]. 2003.
- Zhang, X. C., e J. D. Garbrecht. 2003. Evaluation of CLIGEN Precipitation Parameters and Their Implication on WEPP Runoff and Erosion Prediction. *Trans. ASAE* 42:311-320.

9. Anexo I

O significado de cada linha de informação no programa CLIGEN é o seguinte

Linha 1: Nome da estação

Linha 2: Latitude, longitude, número de anos de registo

Linha 3: Altitude acima do nível do mar; TP5 – precipitação máxima de 30 minutos; TP6 – precipitação máxima de 6 horas

Linha 4: Precipitação média equivalente em dias chuvosos (polegadas) por mês. Para obter este valor calcula-se a precipitação média mensal e divide-se pelo número de dias chuvosos.

Linha 5: Desvio padrão da precipitação diária (polegadas) (mensal).

Linha 6: Coeficiente de assimetria da precipitação diária (mensal).

Linha 7: Probabilidade de dia chuvoso a seguir a dia chuvoso (mensal)

Linha 8: Probabilidade de dia chuvoso a seguir a dia seco (mensal)

Define-se dia chuvoso como um dia que tem precipitação diferente de zero. Os valores de probabilidade variam de 0.0 a 1.0, inclusive.

Linha 9: Temperatura do ar máxima média diária (graus Fahrenheit) (mensal)

Linha 10: Temperatura do ar mínima média diária (graus Fahrenheit) (mensal)

Linha 11: Desvio padrão de temperatura máxima média diária (graus Fahrenheit) (mensal)

Linha 13: Radiação solar média diária (Langleys) (mensal)

Linha 14: Desvio padrão de radiação solar média diária (Langleys) (mensal)

Linha 15: Intensidade máxima média de 30 minutos (polegada/h) (mensal)

Linha 16: Temperatura média do ponto de orvalho (graus Fahrenheit) (mensal)

Linha 17: Distribuição acumulada calculada de tempo para atingir a intensidade máxima de precipitação em cada chuvada. Estes 12 valores representam respectivamente a fracção de tempo para a intensidade máxima entre 0.0-0.0833, 0.0833-0.1667, 0.1667-0.25, 0.25-0.3333, 0.3333-0.4167, 0.4167-0.5, 0.5-0.5833, 0.5833-0.6667, 0.6667-0.75, 0.75-0.8333, 0.8333-0.9167, e 0.9167-1.0. Para obter estes valores são retirados do interior de chuvada

todos os intervalos com precipitação zero e o tempo para a intensidade máxima é calculado como a relação

Tempo decorrido desde o início da chuvada até ao ponto médio do intervalo que contém a intensidade máxima / tempo total desde o início ao fim da chuvada.

As linhas 18 a 81 contêm a informação relativa à direcção e velocidade do vento. Concretamente:

Linhas 18-21: Informação relativa ao vento que sopra de Norte

Linha 18 - Percentagem de tempo que o vento sopra de Norte (mensal)

Linha 19 – Velocidade média do vento que sopra de Norte (mph) (mensal)

Linha 20 – Desvio padrão da velocidade do vento que sopra de Norte (mph) (mensal)

Linha 21 - Coeficiente de assimetria de da velocidade do vento que sopra de Norte (mensal)

Linhas 22-25: Informação relativa ao vento que sopra de Nor-Nordeste.

Linhas 26-29: Informação relativa ao vento que sopra de Nordeste.

Linhas 30-33: Informação relativa ao vento que sopra de Este-Nordeste.

Linhas 34-37: Informação relativa ao vento que sopra de Este.

Linhas 38-41: Informação relativa ao vento que sopra de Este-Sudeste.

Linhas 42-45: Informação relativa ao vento que sopra de Sudeste.

Linhas 46-49: Informação relativa ao vento que sopra de Sul-Sudeste.

Linhas 50-53: Informação relativa ao vento que sopra de Sul.

Linhas 54-57: Informação relativa ao vento que sopra de Sul-Sudoeste.

Linhas 58-61: Informação relativa ao vento que sopra de Sudoeste.

Linhas 62-65: Informação relativa ao vento que sopra de Oeste-Sudoeste.

Linhas 66-69: Informação relativa ao vento que sopra de Oeste.

Linhas 70-73: Informação relativa ao vento que sopra de Oeste-Noroeste.

Linhas 74-77: Informação relativa ao vento que sopra de Noroeste.

Linhas 78-81: Informação relativa ao vento que sopra de Nor-Noroeste.

Linha 82: Percentagem de tempo calmo (sem vento) (mensal).

10. Anexo II

Aspecto do ficheiro de parâmetros todos os anos

LATT= 39.49 LONG= -7.29 YEARS= 18. TYPE= 2

ELEVATION = 341. TP5 =13.72 TP6= 3.94

MEAN P 0.29 0.19 0.18 0.21 0.20 0.12 0.16 0.14 0.21 0.28 0.32 0.26

S DEV P 0.36 0.24 0.21 0.24 0.24 0.11 0.15 0.10 0.23 0.38 0.38 0.31

SKEW P 1.91 1.74 1.58 1.78 1.94 1.71 1.43 0.34 1.43 2.04 1.74 1.83

P(W/W) 0.65 0.63 0.48 0.61 0.59 0.32 0.23 0.19 0.45 0.62 0.60 0.68

P(W/D) 0.33 0.35 0.22 0.31 0.24 0.12 0.04 0.05 0.16 0.30 0.45 0.39

Aspecto do ficheiro de parâmetros anos secos

LATT= 39.49 LONG= -7.29 YEARS= 10. TYPE= 2

ELEVATION = 341. TP5 =13.72 TP6= 3.94

MEAN P 0.22 0.20 0.22 0.21 0.17 0.10 0.10 0.15 0.24 0.28 0.25 0.15

S DEV P 0.39 0.34 0.31 0.31 0.23 0.15 0.10 0.16 0.40 0.43 0.52 0.24

SKEW P 2.75 3.50 1.87 2.53 2.04 2.16 1.42 2.96 2.45 2.32 4.95 2.69

P(W/W) 0.65 0.47 0.40 0.50 0.40 0.20 0.05 0.10 0.20 0.50 0.40 0.40

P(W/D) 0.24 0.40 0.25 0.35 0.30 0.15 0.05 0.07 0.20 0.40 0.35 0.35

Aspecto do ficheiro de parâmetros anos chuvosos

LATT= 39.49 LONG= -7.29 YEARS= 8. TYPE= 2

ELEVATION = 341. TP5 =13.72 TP6= 3.94

MEAN P 0.36 0.15 0.23 0.15 0.30 0.18 0.30 0.21 0.23 0.36 0.41 0.45

S DEV P 0.43 0.32 0.33 0.29 0.36 0.20 0.35 0.22 0.33 0.48 0.54 0.46

SKEW P 1.97 3.10 2.31 2.90 3.17 2.10 3.02 2.11 2.48 2.89 3.66 2.39

P(W/W) 0.67 0.63 0.48 0.60 0.60 0.40 0.23 0.19 0.45 0.62 0.65 0.80

P(W/D) 0.55 0.35 0.22 0.30 0.35 0.15 0.04 0.05 0.20 0.35 0.50 0.45