

2. Bases teóricas e metodologia

2.1. Introdução

No presente capítulo, apresentam-se os diferentes métodos e modelos bem como as respectivas bases teóricas, visando a modelação hidrológica da rega para a melhoria de gestão da água na agricultura na Ilha de Santiago. A metodologia aplicada visa uma análise criteriosa das necessidades de água e das disponibilidades de recursos hídricos procurando a satisfação das necessidades hidroagrícolas nas bacias casos de estudo.

Pesquisas mais recentes sobre o tema dos recursos hídricos defendem a adoção de posturas que valorizem a criação de modelos de gestão e que promovam a interação entre as diversas áreas do saber agronómico, ambiental e socioeconómico. Nesta perspetiva, os conceitos e modelos relacionados com as necessidades de água e a gestão da rega, as disponibilidades hídricas e a sua modelação baseada em relações precipitação-escoamento, as propriedades hidráulicas do solo, a poupança e conservação da água e análises de risco das diferentes estratégias de gestão hidroagrícola, consubstanciam os principais aspetos da pesquisa no âmbito da conceptualização do modelo de gestão de água nas bacias de São Domingos e Ribeira Seca, que constituem os casos de estudo. Assim sendo, foi usado um conjunto de métodos e modelos que incluíram a análise da qualidade dos dados hidroclimáticos, o estabelecimento de funções de pedo-transferência, o cálculo da evapotranspiração de referência, a aplicação de modelos para determinação das necessidades hídricas das culturas, balanço hídrico e necessidades de rega, o balanço hídrico para avaliação das disponibilidades das bacias hidrográficas, a avaliação dos sistemas de rega instalados, as estratégias de rega deficitária, a produtividade da água bem como a análise económica e de risco das estratégias simuladas.

Segundo Pereira *et al.* (2009b), encontrar soluções apropriadas para a conservação e para a poupança de água não é apenas responder às solicitações correntes de gestão mas também responder aos desafios concretos da sustentabilidade do uso da água em situações concretas de carência, isto é, saber conviver com a escassez de água. Porém, como são os problemas que determinam a escolha das soluções, é necessário identificar as causas naturais ou antropogénicas da escassez da água, de forma a adequar as medidas e práticas de conservação e poupança às situações que as determinam.

A conservação dos recursos hídricos, nomeadamente com sistemas de coleta de água, tem sido largamente estudada e aplicada em várias regiões do mundo (Oweis *et al.*, 2004), com ênfase para as regiões áridas e semiáridas (Goosen & Shayya, 2000), com resultados significativos do ponto de vista do incremento dos recursos hídricos utilizáveis ou disponíveis (Cordery, 2003).

Gestores, pesquisadores e utilizadores da água reconhecem como essencial a necessidade de definir, usar e validar indicadores de referência para a gestão eficaz desse bem. Para apoio à decisão, é necessário utilizar indicadores, tanto de produtividade da água, como relacionados com o seu uso eficiente (Molden, 2007; Pereira *et al.*, 2009b, 2012). Estes indicadores deverão permitir a avaliação permanente de cenários dinâmicos, além de contribuir para otimizar modelos de gestão dos recursos hídricos, tendo em conta a disponibilidade e a procura.

Para modelar as necessidades de água e para a gestão da rega o modelo WINISAREG (Teixeira & Pereira, 1990; Pereira *et al.*, 2003b) tem dado bons resultados em várias regiões

do mundo, inclusive em Cabo Verde (Moreno *et al.*, 2003). O modelo WINISAREG permite obter os fatores de resposta da cultura à água (Pereira *et al.*, 2009a). O controlo da salinidade da água deve ser também considerado na gestão da rega (Hoffman & Shalhevet, 2007); a correspondente solução adotada no WINISAREG (Pereira *et al.*, 2007a) foi entretanto comprovada (Domínguez *et al.*, 2011).

A rega deficitária tem mostrado impactos económicos consideráveis, tanto a nível da produtividade, como do custo da água (Rodrigues & Pereira, 2009). Esta forma de rega foi tida em conta, tanto mais que o controlo da procura de água é essencial em Cabo Verde, devendo ser realizado considerando a economia da água de forma integrada (Ward, 2009).

Um outro modelo de rega semelhante ao modelo WINISAREG, também considerado no estudo que se apresenta, é o modelo SIMDualKc (Rosa *et al.*, 2012a, b), o qual foi desenvolvido com o intuito de determinar as necessidades hídricas das culturas e a calendarização de rega usando a metodologia dos coeficientes culturais duais ($K_{cb} + K_e$), proposta por Allen *et al.* (1998, 2005a). A divisão do coeficiente cultural (K_c) nas componentes de evaporação do solo (K_e) e de coeficiente cultural basal (K_{cb}) visa melhorar a perceção das frações de água, provenientes da precipitação ou da rega, utilizadas pela cultura e permite avaliar as vantagens de manter uma fração do solo seca ou de utilizar mulches para controlar a evaporação do solo. Essas características tornam o modelo adequado para determinar as necessidades hídricas das culturas e o balanço hídrico a nível das parcelas de microrrega nas regiões áridas e semiáridas das bacias em estudo e da Ilha de Santiago. Para avaliar a evapotranspiração, utilizaram-se, tanto dados meteorológicos completos, como insuficientes (Popova *et al.*, 2006; Allen *et al.*, 2007) e para estimar escoamentos aplicaram-se modelos de balanço precipitação-evapotranspiração-escoamento adaptados à informação de base escassa (Portela & Quintela, 2006; Portela & Santos, 2007).

Para avaliar os sistemas de microrrega instalados nas bacias casos de estudo, recorreu-se ao modelo MIRRIG (Pedras, 2003; Pedras *et al.*, 2009b). O modelo dispõe de um módulo de avaliação dos sistemas de rega em funcionamento que permite determinar os indicadores de desempenho, servindo como meio para melhor aconselhar os agricultores.

Procedeu-se, inicialmente, à quantificação das disponibilidades hídricas (Figura 2.1) Para tal, optou-se por modelos que atendem aos elementos considerados relevantes, tais como a caracterização física e ambiental das regiões onde se inserem os casos de estudo, assim como à obtenção e ao tratamento das informações climáticas, pedológicas, hidrológicas e ambientais.

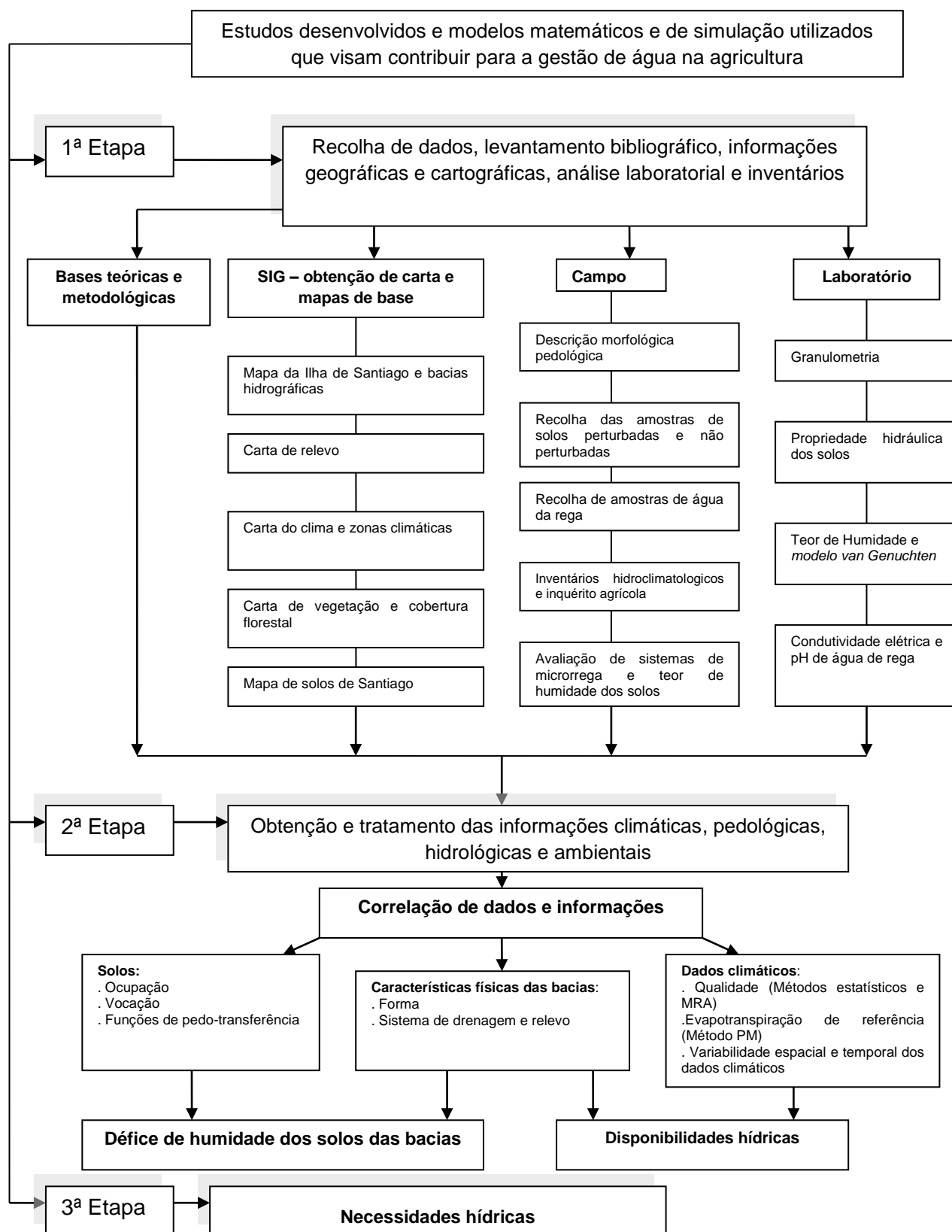


Figura 2.1: Diagrama lógico de estudos desenvolvidos para gestão da água na agricultura, i).

Essas informações são fundamentais para o balanço hídrico a nível das parcelas agrícolas e das bacias hidrográficas, para análise da produtividade física e económica da água e para

equacionar a possibilidade de coleta/conservação e poupança da água, suscetível de ser implementada na beneficiação hidroagrícola nas bacias que constituem os casos de estudo.

Para quantificar as necessidades hídricas, recorreu-se a modelos que caracterizam os elementos chave, como sejam as necessidades hídricas das culturas e as disponibilidades para satisfação de tais necessidades (Figura 2.2).

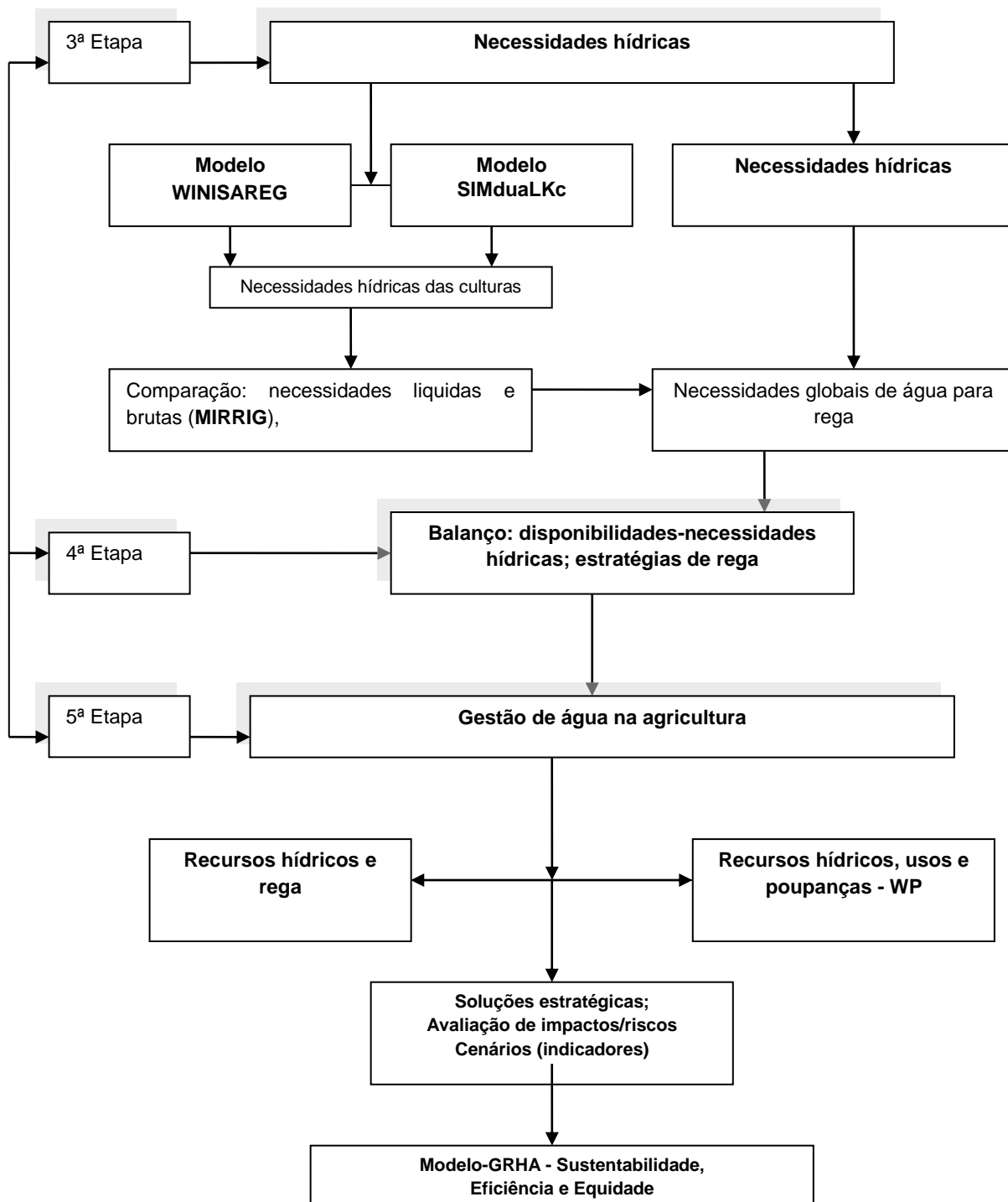


Figura 2.2: Diagrama lógico de estudos desenvolvidos para gestão da água na agricultura,ii).

2.2. Dados de base

2.2.1. Análise da qualidade e preenchimento das séries de dados climáticos

Apresentam-se, de forma resumida, os estudos desenvolvidos e modelos matemáticos e de simulação utilizados e o modo como contribuíram para modelação hidrológica e da rega nas bacias hidrográficas de São Domingos e Ribeira Seca. Após a recolha de dados e de informações de base necessários para iniciar a investigação, procedeu-se à análise cuidada dos mesmos em termos da respetiva qualidade. Os testes de apreciação da aleatoriedade e da homogeneidade das séries de registos de variáveis hidrológicas e climatológicas, bem como o preenchimento de falhas dessas séries foram os primeiros procedimentos a serem implementados, a fim de assegurar a qualidade da informação de base e a permitir a sua posterior reconstituição para um período comum. Para verificar a aleatoriedade e a homogeneidade de séries existem vários testes que podem ser aplicados. Neste estudo recorreu-se a testes frequentemente utilizados (Henriques, 1981, 1990; Helsel & Hirsch, 1992; Santos, 1996; Rosa *et al.*, 2010a), concretamente, ao teste de τ -Kendall para analisar a ausência de autocorrelação, ao teste de Mann-Kendall para testar a ausência de tendência e ao teste de Mann-Whitney para concluir sobre a homogeneidade da média e da variância. Aplicou-se, ainda, o método dos resíduos acumulados (Allen *et al.*, 1998).

Para os casos de estudo, os valores diários e mensais das variáveis climatológicas foram, numa primeira fase, submetidos a uma apreciação geral da qualidade recorrendo aos três testes acima referidos para averiguar, respetivamente, a homogeneidade da média e da variância, a ausência de tendência e a ausência de autocorrelação. Para o efeito utilizou-se o *software* desenvolvido por Matias (2000) no CEER/ISA (Centro de Estudos dos Biosistemas – Instituto Superior de Agronomia) tendo por base o nível de significância $\alpha=0.05$ (Rosa *et al.*, 2010a). Numa segunda fase, às séries cuja homogeneidade não foi comprovada nos testes acima referidos, procedeu-se à homogeneização das mesmas recorrendo ao método dos resíduos acumulados (*MRA*), descrito em Allen *et al.*, 1998. O esquema de cálculo do método dos resíduos acumulados apresenta-se na Figura 2.3.

As falhas de valores numa dada série de dados são normalmente colmatadas por transferência de informação de séries medida em estações vizinhas daquela. Uma vez que os dados fornecidos pelo INMG (Instituto Nacional de Meteorologia) apresentaram muitas faltas, utilizaram-se dois tipos de modelos lineares mais comuns para preencher falhas de dados: i) a regressão linear simples relacionando os dados da série a completar com outra série completa, sempre que os dados em falta correspondiam a menos do que 5%; ii) e o método MOVE de extensão com manutenção da variância (Vogel & Stedinger, 1985; Matias, 2000), quando os dados em falta eram em percentagem superior. Este modelo, assim como outros mais complexos baseados na regressão linear (e.g., Matalas & Jacobs (1964), assumem que as séries x e y são estacionárias no tempo, não apresentam autocorrelação e possuem uma distribuição normal bivariada.

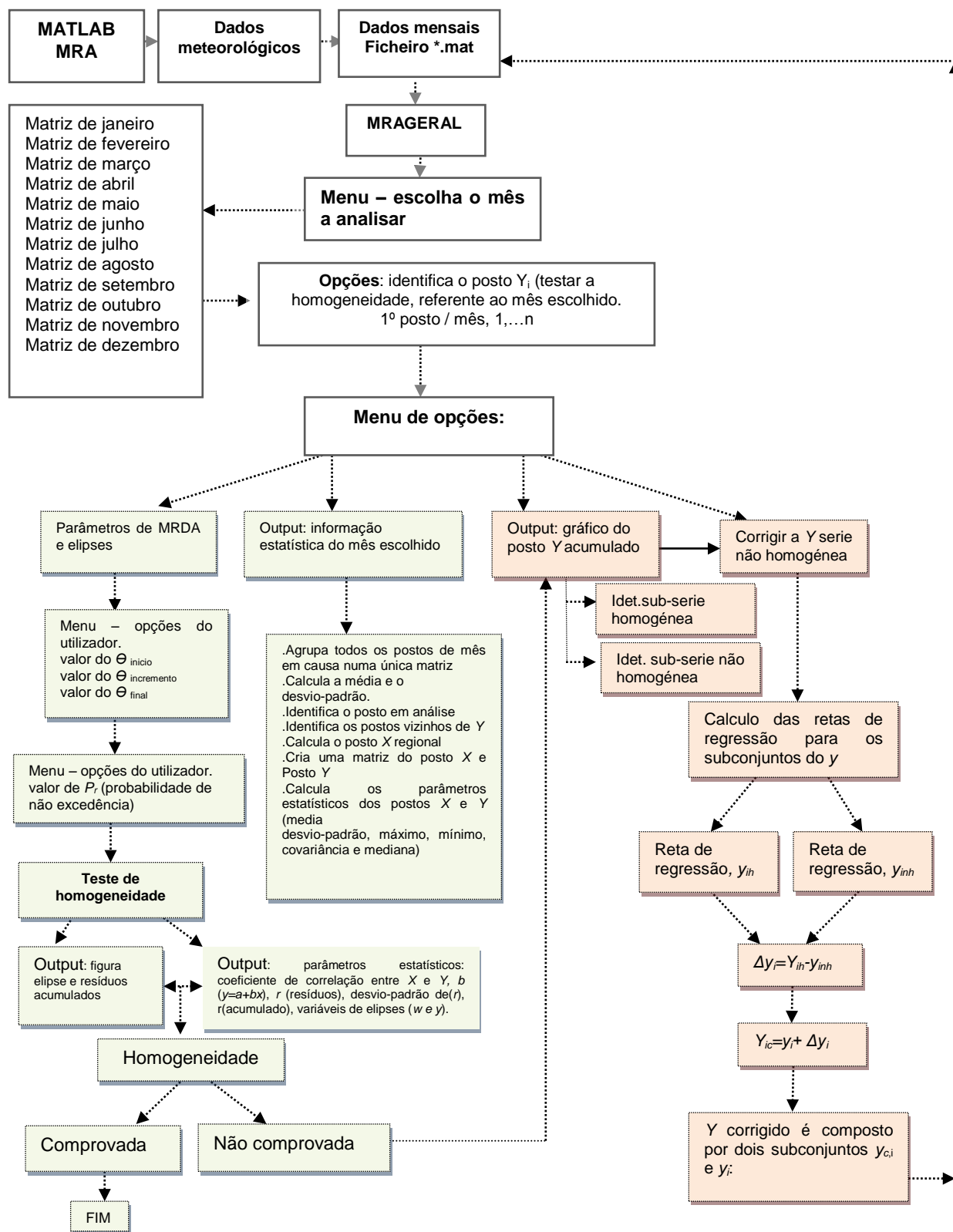


Figura 2.3: Esquema do método dos resíduos acumulados para homogeneização dos dados hidroclimatológicos mensais.

A regressão linear simples de Y (série a completar) sobre X (série de referência) origina uma série completa, \tilde{Y}_i , com uma variância inferior à da série inicial visto que as estimativas dos dados em falta coincidem com a reta de regressão, desprezando, portanto, a estrutura de

resíduos. Para além disso, a equação de regressão não explica toda a variância da série mais curta mas apenas uma proporção desta, correspondente ao coeficiente de determinação, R^2 .

As técnicas MOVE foram desenvolvidas para serem utilizadas em situações em que as duas populações X e Y não diferem substancialmente em termos da forma das suas funções de distribuição de probabilidade e dos coeficientes de autocorrelação ou sazonalidade (Vogel & Stedinger, 1985). Hirsch (1982) sugeriu estas técnicas de extensão para melhorar os modelos de regressão linear. Nas j técnicas designadas genericamente de MOVE $_j$ as estimativas de y são efetuadas através de equações lineares com a forma $y_j = a_j + b_j x_i$ em que os valores de a_j e b_j são escolhidos de modo que se consiga gerar um registo único e plausível, \tilde{y}_i , com $i = 1, \dots, N_1 + N_2$. Os vários níveis existentes para o método (MOVE.1, MOVE.2, MOVE.3 e MOVE.4) variam de acordo com a forma como a e b são obtidos. Uma vez que a eficiência dos estimadores aumenta com a ordem do procedimento MOVE, neste estudo optou-se pela utilização do método MOVE.4, que calcula a e b de modo a que a média e a variância na série estendida \tilde{Y}_i igualem os estimadores não enviesado μ_y^* e $\hat{\sigma}_y^{2*}$ propostos por Vogel e Stedinger (1985).

A grande importância de trabalhar com séries climatológicas com qualidade comprovada, reside na possibilidade de reduzir, de algum modo, as incertezas inerentes à avaliação da necessidade global da rega e da disponibilidade de água nas bacias hidrográficas.

2.2.2. Propriedades hidráulicas do solo e funções de pedo-transferência

2.2.2.1. Propriedades hidráulicas do solo

Em países em regiões semiáridas, como Cabo Verde, onde a taxa de evaporação anual é elevada, a manutenção de teores de água no solo dentro dos valores indicados para cada tipo de cultura exige regas frequentes e quantidades de água importantes. Para que se faça a avaliação e condução corretas da rega é fundamental conhecer quanto e quando regar, as disponibilidades de água para a planta, o padrão de extração de água do solo pela planta e as transferências de água no solo por percolação e por ascensão capilar. Nas áreas regadas como as que constituem os casos de estudo, onde os problemas ambientais associados à salinização dos solos são relevantes, o conhecimento da circulação de água no solo é indispensável. Porém, em Cabo Verde, a falta de conhecimento das propriedades hidráulicas dos diferentes tipos de solos tem sido um entrave à aplicação de modelos de balanço e/ou de fluxo da água no solo. Daí a necessidade de considerar, na modelação hidrológica e da rega nas bacias casos de estudo, uma caracterização hidrodinâmica dos solos, de modo a conhecer o solo enquanto reservatório dinâmico, o que requer a determinação da curva de retenção de água no solo e o desenvolvimento de funções de pedo-transferência para pontos específicos da curva de retenção de água.

Na verdade, os modelos hidrológicos, nomeadamente os intervenientes no âmbito da gestão da água, integram importantes processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na zona não saturada do solo, pelo que a sua conceção faz intervir, por norma, vários parâmetros, entre eles parâmetros relacionados com as propriedades hidráulicas do solo. As propriedades hidráulicas do solo, ou seja, a curva de condutividade hidráulica do solo $K(h)$ e a curva característica de humidade do solo (curva dos pF), não são fáceis de medir. A condutividade hidráulica de um solo é uma propriedade que não depende apenas do solo – isto é, das características intrínsecas ao próprio solo (e.g., porosidade total e geometria do

espaço poral) – mas também das características do fluido, nomeadamente, a sua densidade e viscosidade. A curva característica de humidade de um solo relaciona o potencial mátrico, ou pressão efetiva da água no solo, com a humidade ou teor de água volúmico (θ) da fase líquida do solo (Gonçalves *et al.*, 1997).

Os métodos de campo para determinar as propriedades hidráulicas do solo são muito trabalhosos e a sua aplicação não é fácil nem fiável em determinados tipos de solos (Fernando, 1993). No entanto, tais propriedades são fundamentais para quantificar as transferências hídricas na zona não saturada, respeitando nomeadamente à infiltração, à evaporação e à percolação (Gonçalves *et al.*, 1997, 1999). Dada a importância das propriedades hidráulicas do solo, tem sido proposto um grande número de técnicas ou métodos para as determinar a partir de ensaios de laboratório e/ou de campo. Hoje existem alguns modelos para avaliar, simular e controlar os fluxos de água e de solutos no solo. Porém, a qualidade dos resultados obtidos com esses modelos depende em grande escala da precisão com que se conhecem os valores dos parâmetros que caracterizam o solo.

Para tal determinação, em duas campanhas (Julho a Setembro de 2010 e Julho e Agosto de 2011) nas bacias hidrográficas de São Domingos e Ribeira Seca respetivamente procedeu-se à recolha de 72 amostras de solos não perturbadas, de 100 cm³ cada, sendo duas em cada horizonte dos 31 perfis identificados. Ainda em cada horizonte, precedeu-se à recolha de 500 g de amostras perturbadas. As amostras não perturbadas foram colhidas segundo o processo descrito por Gomes (1978), na orientação vertical, em patamares de covas abertas para o efeito, em níveis representativos das camadas do perfil de solo. Utilizaram-se amostras não perturbadas visto que a capacidade de retenção de água de um solo é fortemente influenciada pela estrutura e pela distribuição do tamanho dos poros (Martins, 1989). Esta influência é tanto mais importante quanto menor for a pressão efetiva considerada. Além disso, a medição feita com amostras perturbadas não representaria as condições de campo.

Neste estudo, a curva característica de humidade do solo foi determinada utilizando caixas de areia para valores de $pF \leq 2$, panela de pressão para $2.0 < pF \leq 3.0$ e a placa de pressão para $3.0 < pF \leq 4.2$, como se resume o esquema da Figura 2.4. O conjunto destes três métodos possibilitou a determinação dos valores de pF de 0 a 4.2, ou seja, teores de água no solo retidos às sucções de -0.25 ($\theta_{0.4}$), -1 ($\theta_{1.0}$), -3 ($\theta_{1.5}$), -10 ($\theta_{2.0}$), -33 ($\theta_{2.5}$), -100 ($\theta_{3.0}$) e -1500 ($\theta_{4.2}$) kPa. Através do dispositivo de caixa de areia fez-se a determinação dos teores de água retidos no solo a valores de pF de 0.4, 1.0, 1.5, 1.8 a 2.0 aplicando sucções de respetivamente 2.5, 10.0, 31.6, 63.1, e 100.0 cm de água até se atingir o teor de água de equilíbrio das amostras de solo colocadas na superfície da areia para cada uma daquelas sucções (Romano *et al.*, 2002). O teor de equilíbrio foi detetado quando se registou o mesmo peso da amostra em dias consecutivos. A quantidade de água gravimétrica retida no solo para cada um dos valores de pF calculou-se subtraindo ao peso da amostra de solo húmido (após atingir um teor de água de equilíbrio em cada pF), o peso seco da amostra a 105° C, a massa do pesa filtro, a massa do cilindro e ainda de outros utensílios (pano, borracha) utilizados para evitar a perda de solo durante o processo.

Os dispositivos da panela e da placa de pressão estão equipados com uma placa de cerâmica porosa, colocada no interior de uma panela de pressão onde, por meio de ar comprimido, se aplicam as pressões que possibilitam obter pontos da curva característica da humidade de solo (Dane & Hopmans, 2002).

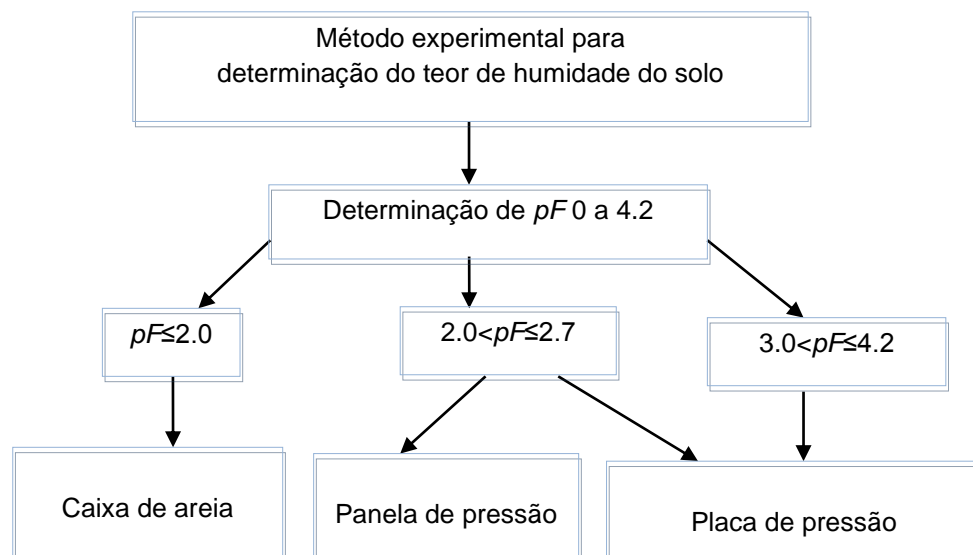


Figura 2.4: Conjunto dos três métodos usados na determinação dos valores de pF.

As curvas de retenção de água no solo foram descritas através do modelo de van Genuchten (1980):

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left(1 + |\alpha h|^\eta\right)^{1-1/\eta}} \quad (2-1)$$

onde S_e é a saturação efetiva (-), h é a pressão efetiva (cm de água); θ_r e θ_s são os teores de água residual e na saturação ($L^3 L^{-3}$), respetivamente; e α (cm^{-1}) e η (-) são parâmetros empíricos. Este modelo foi ajustado aos dados laboratoriais pelo método dos mínimos quadrados para o que se recorreu ao programa computacional, RETC (van Genuchten *et al.*, 1991).

A densidade aparente foi obtida por secagem de amostras de 100 cm^3 de solo à temperatura de 105° C . A porosidade total (φ) foi determinada a partir do máximo teor de água gravimétrico das amostras de solo e da densidade aparente. A textura dos solos foi determinada pelo método clássico da pipeta, para partículas com diâmetros $<20\ \mu\text{m}$ (fração de argila, A, e limo, L), e crivagem para partículas com diâmetros entre 20 e $200\ \mu\text{m}$ (fração de areia fina, AF) e entre 200 e $2000\ \mu\text{m}$ (fração de areia grossa, AG). Essas classes de texturas seguem o sistema de classificação portuguesa (Gomes & Silva, 1962) e são baseadas nos limites da escala de Atterberg, recomendada pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo.

A determinação do teor de matéria orgânica (MO) foi efetuada através do método de Walkley-Black, usando a relação $MO = 1.724 \times CO$ (Nelson & Sommers, 1982). Neste método para avaliar a matéria orgânica total do solo, determina-se o carbono orgânico total (CO) e multiplica-se o valor que lhe corresponde pelo fator de 1.724 estabelecido admitindo que a matéria orgânica tem 58% de carbono (valor médio). Em resumo, a determinação dos parâmetros físicos dos solos foi efetuada segundo as definições de Botelho da Costa (1975), Silva & Santos (1976) e Hillel (1984).

2.2.2.2. Funções de pedo-transferência

O termo funções de pedo-transferência (*PTFs*) foi introduzido por Bouma (1989) para definir todos os modelos preditivos usados para obter propriedades hidráulicas do solo (e.g., curva de condutividade hidráulica do solo $K(h)$ e curva característica de humidade do solo) a partir das propriedades básicas do solo (e.g., a textura, a massa volúmica aparente, o teor em matéria orgânica e o pH). As técnicas de desenvolvimento de *PTFs* têm evoluído consideravelmente nos últimos anos e vão desde a análise de regressão linear simples (Gupta e Larson, 1979) e não linear (Rawls & Brakensiek, 1985) às mais complexas técnicas matemáticas, tais como, redes neurais (Pachepsky *et al.*, 1996; Schaap & Bouten, 1996; Tamari *et al.*, 1996), diagramas de árvore (McKenzie & Jacquier, 1997), método grupo de manipulação de dados (Pachepsky *et al.*, 1998), a técnica de vizinhança mais próxima (Nemes *et al.*, 2006a; 2006b), e a técnica vetor suporte de máquinas (Lamorski *et al.*, 2008; Twarakavi *et al.*, 2009). Apesar da grande variedade de métodos matemáticos mais ou menos sofisticados, as *PTFs* geralmente geram resultados comparáveis em termos de propriedades hidráulicas de solos (Wösten *et al.*, 2001; Pachepsky & Rawls, 2004).

As funções de pedo-transferência para determinação das características hidrodinâmicas de um solo podem obter-se por duas vias: a técnica de estimação por pontos e a técnica de estimação por parâmetros. A técnica de estimação por pontos permite relacionar pontos da curva característica de humidade do solo ou da curva de condutividade hidráulica com as propriedades básicas do solo. A técnica de estimação por parâmetros permite obter parâmetros de modelos que descrevem as características hidrodinâmicas. Esta última técnica pressupõe a existência de uma descrição matemática do comportamento da curva característica de humidade do solo.

O modelo de van Genuchten com quatro parâmetros é exemplo de um modelo que assegura frequentemente um bom ajustamento aos dados experimentais e cujos parâmetros se podem estimar através da construção de funções de pedo-transferência (Gonçalves, 1994). Exemplos de *PTFs* obtidas pela técnica de estimação por parâmetros são as *PTFs* desenvolvidas por Vereecken (1988), Wösten *et al.* (2001) e Gonçalves *et al.* (1997). No caso da utilização da técnica de estimação por pontos são exemplos as funções de Gupta & Larson (1979), e Pinto *et al.* (2003).

Neste trabalho, para estimar pontos específicos da curva de retenção de água no solo, utilizou-se a técnica de estimação por pontos. Para o efeito, obtiveram-se oito pontos específicos da curva de retenção da água no solo correspondentes à porosidade total (φ), e ao teor de água no solo retido às succões de -0.25 ($\theta_{0.4}$), -1 ($\theta_{1.0}$), -3 ($\theta_{1.5}$), -10 ($\theta_{2.0}$), -33 ($\theta_{2.5}$), -100 ($\theta_{3.0}$) e -1500 ($\theta_{4.2}$).

Sem desprezar a condutividade hidráulica, optou-se neste trabalho por tratar apenas da determinação das curvas de retenção de água no solo dada a suficiente informação que disponibilizam para a modelação da rega e para a conseqüente gestão da água a nível da parcela. Os valores de teor de água no solo a $\theta_{2.0}$ ou $\theta_{2.5}$ e $\theta_{4.2}$ correspondem à capacidade de campo e ao coeficiente de emurchecimento (Romano & Santini, 2002), pelo que constituem informações fundamentais para parametrizar os modelos de balanço de água no solo utilizados na gestão de rega (Pereira *et al.*, 1995).

Neste estudo utilizou-se uma análise de regressão múltipla para o desenvolvimento das *PTFs* dos solos da Ilha de Santiago. Esta técnica é normalmente mencionada na literatura (Oyonarte *et al.*, 1998; Nourbakhsh *et al.*, 2004). As *PTFs* têm a seguinte forma geral:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (2-2)$$

onde y é a porosidade total ou ponto de retenção de água no solo ($\theta_{0.4}$, $\theta_{2.0}$, e $\theta_{4.2}$), a ser calculado; a_0 , a_1 , a_2 , ..., a_n são coeficientes de regressão; x_1 , x_2 , ..., x_n são os argumentos da *PTFs*. As propriedades hidráulicas do solo foram investigadas considerando os seguintes argumentos: i) textura do solo - as quatro frações granulométricas consideradas pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo - areia grossa (AG), areia fina (AF), limo (L) e argila (A); ii) média geométrica do diâmetro das partículas (*GPD*) desvio-padrão geométrico do diâmetro das partículas (*GSD*) definidos por Shirazi & Boersma (1984); iii) densidade aparente (ρ_b); iv) o teor em matéria orgânica (*MO*); v) *pH*; e vi) profundidade média da camada (*Z*).

O *GPD* e *GSD* são propriedades estatísticas obtidas através dos valores dos diferentes lotes de texturas. Estas propriedades foram apresentadas por Shirazi & Boersma (1984) e permitem obter uma boa descrição da textura do solo para estimar as características hidrodinâmicas (Campbell, 1985). O seu cálculo efetuou-se recorrendo às definições de Shirazi & Boersma (1984):

$$GPD = EXP \left[0.01 \left(\sum_{i=1}^n m_i \ln d_i \right) \right] \quad (2-3)$$

$$GSD = \exp \left[0.01 \left(\sum_{i=1}^n m_i (\ln d_i)^2 \right) - \left[0.01 \left(\sum_{i=1}^n m_i \ln d_i \right) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (2-4)$$

onde m_i é a percentagem do lote i , d_i é a média aritmética dos diâmetros do lote i e n é o número de lotes granulométricos.

No desenvolvimento das *PTFs* para Cabo Verde encontraram-se alguns obstáculos. O primeiro foi a falta de informação sobre as propriedades hidráulicas do solo, ou seja, sobre as características de retenção de água nos solos da Ilha de Santiago e noutras ilhas de Cabo Verde. Esta falta de informação é, em parte, justificada pela inexistência de equipamentos e laboratórios adequados, pelos elevados custos de análise de solos e pela falta de técnicos capacitados na área da pedologia. As únicas informações sobre propriedades hidráulicas dos solos da Ilha de Santiago, consistentes e disponíveis, encontram-se nos estudos realizados por Faria (1970), que determinou o teor de água no solo para sucções de 100.0, 501.2 e 15848.9 cm em amostras perturbadas colhidas em diferentes perfis de solos da ilha. No entanto, essas informações, por serem muito limitadas e realizadas em amostras perturbadas, não foram consideradas nos casos de estudo.

O segundo obstáculo encontrado no estabelecimento de *PTFs* para Cabo Verde foi o facto de que as *PTFs* não devem ser usadas para solos que não estejam dentro das mesmas condições dos solos que foram utilizados no seu desenvolvimento (Wosten *et al.*, 2001). De facto, a maioria das *PTFs* disponíveis na literatura foi desenvolvida utilizando bancos de dados com informações sobre solos de regiões temperadas (Wosten *et al.*, 2001). Tomasella & Hodnett (1998; 2004), Tomasella *et al.* (2003) e van den Berg *et al.* (1997), não existindo *PTFs* especificamente desenvolvidas para estimar as características de retenção de água em solos tropicais. Assim, neste estudo, recorreu-se ao banco de dados português, PROPSOLO (Ramos *et al.*, 2007; 2011), no qual foi selecionado um conjunto de solos similares aos dos casos de estudo para obter *PTFs* para a Ilha de Santiago. O uso direto do

banco de dados PROPSOLO para Cabo Verde poderia levar a erros significativos. No entanto, as informações de solos disponíveis em PROPSOLO abrangem desde regiões secas a regiões temperadas húmidas do continente e ilhas atlânticas da Madeira e Açores pelo que contém também solos com características próximas dos solos de Santiago.

A base de dados PROPSOLO tem atualmente 733 curvas de retenção de água no solo e 306 curvas de condutividade hidráulica. Gonçalves *et al.* (1997; 1999) determinaram *PTFs* para prever parâmetros do modelo usado para descrever as propriedades hidráulicas dos solos de Portugal, enquanto Paz *et al.* (2009) criaram *PTFs* para pontos de valores específicos das características de retenção de água no solo. PROPSOLO contribuiu também para o banco de dados HYPRES - *Hydraulic Properties of European Soils* (Wosten *et al.*, 1999).

Visando minimizar possíveis erros, foram selecionadas apenas as informações dos horizontes pertencentes à gama de textura e a curvas de retenção de água similares às obtidas nos horizontes dos perfis de solo da Ilha de Santiago. Assim, foi selecionado um conjunto de 85 horizontes de solos dos 733 disponíveis em PROPSOLO. Posteriormente foram determinados os parâmetros estatísticos (médias, limites mínimos e máximos, e coeficientes de variação) das propriedades básicas desses 85 horizontes de solos. O conjunto de teste foi composto por φ , $\theta_{0.4}$, $\theta_{1.0}$, $\theta_{1.5}$, $\theta_{2.0}$, $\theta_{2.5}$, $\theta_{3.0}$ e $\theta_{4.2}$, determinados nos 72 horizontes dos solos estudados na ilha, garantindo a independência dos dois conjuntos de dados (portugueses e cabo-verdianos).

O desempenho das *PTFs* desenvolvidas para Santiago foi avaliado usando alguns critérios padrão para a avaliação da qualidade e consistência daquelas funções (Wösten *et al.*, 2001; Schaap, 2004). Assim, foram calculados os seguintes indicadores estatísticos: o coeficiente de correlação linear, r ; o coeficiente de determinação, R^2 ; o erro médio absoluto, *MAE*; o erro médio relativo, *MRE*; o desvio quadrático médio, *RMSE*; o erro médio, *ME*, obtidos pelas seguintes equações:

$$R^2 = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right]^2}{1} \quad (2-5)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i) \quad (2-6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (2-7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N - 1}} \quad (2-8)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{O_i - P_i}{O_i} \quad (2-9)$$

em que N é o número de observações; O_i são os valores observados; P_i são os valores preditos pelas *PTFs*; \bar{O} é a média dos valores O_i ; e \bar{P} é a média dos P_i .

A capacidade de previsão das *PTFs* foi posteriormente validada através da comparação dos indicadores (R^2 , ME , MAE , $RMSE$, e MRE) obtidos ao estimar φ , $\theta_{0.4}$, $\theta_{2.0}$, e $\theta_{4.2}$ com *PTFs* da Ilha de Santiago e com as *PTFs* desenvolvidas por Paz *et al.* (2009), Batjes (1996), e Schaap *et al.* (2001). A fim de aplicar as *PTFs* de Batjes (1996) e Schaap *et al.* (2001) a distribuição do tamanho das partículas de solos da Ilha de Santiago, inicialmente determinada com base na escala de Atterberg, foi convertida para os limites de partículas de solo da USDA¹ segundo o método de conversão de Gomes & Silva (1962).

Como anteriormente referido, Paz *et al.* (2009) desenvolveram *PTFs* (*PTFs* Portugal) para pontos específicos da curva de retenção de água dos solos portugueses usando o conjunto total de dados da base de dados PROPSOLO. Assim, a comparação dos erros de previsão das *PTFs* de Portugal e de Cabo Verde serviu para avaliar se os novos modelos contribuíram de facto para melhorar as estimativas de teor de água nos solos de Santiago.

Batjes (1996) desenvolveu *PTFs* para pontos específicos das curvas características de retenção de água para as unidades de solo do mundo apresentadas no mapa da FAO (2006). Também usou a referência dos solos do Centro Internacional de Informação e Banco de Dados (ISRIC²), que reúne informações para os solos de diferentes regiões do mundo, incluindo 1799 perfis de solo da África. Assim, teoricamente, as *PTFs* desenvolvidas por Batjes (1996) poderiam fornecer melhores estimativas do teor de água no solo para Cabo Verde que as *PTFs* desenvolvidas a partir da informação retirada da PROPSOLO, uma vez que contêm uma quantidade de informação sobre os solos de África verdadeiramente excepcional. Schaap *et al.* (2001) desenvolveram um conjunto de *PTFs* (ROSETTA³) para estimar os parâmetros do modelo nas relações funcionais de van Genuchten, 1980. ROSETTA é provavelmente um dos modelos *PTF* mais utilizado para determinar as propriedades hidráulicas do solo. Portanto, a precisão das suas estimativas para os solos de Santiago também foi avaliada.

Como se estão a comparar valores para pontos específicos das curvas características de retenção de água, e não parâmetros do modelo, as previsões de φ e $\theta_{0.4}$, $\theta_{1.0}$, $\theta_{1.5}$, $\theta_{2.0}$, $\theta_{2.5}$, $\theta_{3.0}$ e $\theta_{4.2}$ foram calculadas após as primeiras estimativas dos parâmetros de teor de água no solo para os casos de estudo. Assim, os principais procedimentos seguidos durante os estudos de solos foram: (i) recolha de amostras de solos nas bacias hidrográficas casos de estudo na Ilha de Santiago; ii) determinação laboratorial das propriedades hidráulicas de várias famílias desses solos; (iii) análise ou ajustamento dos resultados obtidos ao modelo de van Genuchten; e (iv) determinação das funções de pedo-transferência para aqueles solos, a partir de uma base de dados dos solos de Portugal continental (PROPSOLO).

As equações de pedo-transferência obtidas servem para estimar as propriedades hidráulicas dos solos das bacias hidrográficas da Ilha de Santiago, sendo que, posteriormente, podem ser usadas noutras bacias cujos solos apresentem texturas não muito diferentes.

¹ United States Department of Agriculture

² International soil reference and information center

³ Computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions)

2.2.3. Evapotranspiração das culturas

2.2.3.1. Evapotranspiração de referência

Os valores da evapotranspiração de referência, ET_o , são indispensáveis como dados de entrada, seja para os modelos WINISAREG e SIMDualKc, seja para o modelo balanço de precipitação-escoamento (modelo Temez).

Para estimar ET_o , utilizou-se o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM) (Allen *et al.*, 1998). O método FAO-PM é de utilização generalizada, sobretudo para o cálculo das necessidades de água das culturas. É recomendado como método padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência, visto que fornece a evapotranspiração de uma superfície de referência, sendo conhecido como método de FAO Penman-Monteith. Segundo Allen *et al.* (1998) a evapotranspiração de referência, ET_o , corresponde à evapotranspiração que ocorre numa superfície vegetal de referência, relativa a uma hipotética cobertura de relva com a altura uniforme de 0.12 m, com a resistência superficial fixa em 70 sm^{-1} e com o albedo de 0.23 assumindo-se que a cultura se encontra bem regada, crescendo de forma ativa e cobrindo total e uniformemente toda uma área.

O método FAO-PM é aplicado com base em variáveis climatológicas: radiação ou insolação, temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do vento. A evapotranspiração da superfície de referência é calculada pela seguinte equação:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G_c) + \gamma \frac{900}{T^* + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2-10)$$

onde as variáveis intervenientes possuem os seguintes significados:

- ET_o evapotranspiração de referência (mmd^{-1});
- Δ declive da curva de tensão de vapor ($\text{k Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
- R_n radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);
- G_c fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);
- γ constante psicométrica ($\text{k Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
- T^* temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$);
- U_2 velocidade média do vento a 2m do solo (ms^{-1});
- $(e_s - e_a)$ deficit de tensão de vapor (k Pa);
- e_s tensão de saturação do vapor média (k Pa);
- e_a tensão real do vapor (k Pa).

Pereira (2004) contém a descrição completa da anterior equação e dos seus parâmetros.

A utilização de uma superfície cultural de referência no cálculo da evapotranspiração permite incorporar os processos biológicos e físicos envolvidos na sua estimativa relativa a outras superfícies culturais (Allen *et al.*, 1998). Foram, assim, disponibilizados parâmetros de referência para diferentes culturas e para diferentes estágios de desenvolvimento das mesmas, designados por coeficientes culturais, os quais permitem relacionar a evapotranspiração potencial de qualquer cultura, ET_c , com a evapotranspiração de referência, ET_o .

Nas aplicações efetuadas, recorreu-se ao modelo WINISAREG (vd. 2.3.2.1) que determina a evapotranspiração de referência através do modelo de Penman-Monteith, e que permite o cálculo de ET_o mesmo quando não estão disponíveis os valores de algumas variáveis

meteorológicas, com exceção das temperaturas máxima e mínima que são sempre necessárias (Pereira, 2004). Os procedimentos para estimar ET_o quando algumas variáveis climáticas estão em falta são descritos detalhadamente por Allen *et al.* (1998) e por Popova *et al.* (2006).

2.2.3.2. Coeficientes culturais e evapotranspiração cultural

O coeficiente cultural, conforme bases teóricas analisadas por Pereira *et al.* (1999a), representa a integração dos efeitos de três características, que distinguem a cultura da considerada na evapotranspiração de referência: i) a altura da cultura (h), que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; ii) a resistência de superfície relativa ao par cultura - solo, que é afetada pela área foliar (determinando o número de estomas), pela fração de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas, e pelo teor de humidade à superfície do solo; iii) o albedo da superfície cultura-solo, que é influenciado pela fração de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de humidade à superfície do solo e influencia a radiação líquida disponível à superfície, R_n , que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

A evapotranspiração cultural, ET_c , descreve as necessidades hídricas das culturas e corresponde ao uso consumptivo da água quando não ocorre qualquer stress. Em condições padrão, a evapotranspiração cultural é definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura crescendo numa área de solo extensa, com um teor de humidade ótimo, com uma gestão excelente e em condições ambientais adequadas para que a produção potencial seja atingida. Os valores de K_c representam a evapotranspiração (ET) para condições de cultivo ótimas para que as culturas atinjam o seu potencial produtivo, ou seja, para culturas submetidas a uma gestão agronómica adequada às condições do meio e a uma gestão da água que evite stress hídrico.

Segundo Allen *et al.*, (1998; 2006) e Pereira (2008), o método prático de cálculo da evapotranspiração cultural (ET_c) recorre, por um lado, a observações climáticas padrão (que utiliza parâmetro calculado pela procura climática) que representa as condições ambientais através da evapotranspiração de referência (ET_o) e por outro lado, a especificidade da cultura através do cálculo do coeficiente cultural (K_c). Para o efeito, recorre-se a uma dupla padronização: a da cultura de referência para o cálculo da ET_o , e a da cultura em causa, de forma a considerar que a mesma é cultivada em condições favoráveis à obtenção da produção máxima, condições para as quais se define K_c . Se tais condições ótimas não se verificarem, como é corrente na prática de campo, dever-se-á recorrer a um terceiro passo de estima, quer pelo cálculo do coeficiente de stress (K_s), quer pelo ajuste do K_c às condições reais (K_{cadj}).

A evapotranspiração cultural, ET_c (mm d^{-1}), é calculada multiplicando a evapotranspiração de referência, ET_o (mm d^{-1}), pelo coeficiente cultural, K_c (adimensional), como preconizado por Doorenbos & Pruitt (1975) e adotado posteriormente (Allen *et al.*, 1998 e 2006; Pereira, 2004; Pereira & Allen, 1999a); Pereira & Alves, 2005). Portanto, existem duas possíveis aproximações para calcular a evapotranspiração cultural (ET_c) a partir da evapotranspiração de referência (ET_o):

- a primeira usa o coeficiente cultural simples, K_c , que combina os efeitos de evaporação do solo e da transpiração, através de:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (2-11)$$

- a segunda adota o coeficiente cultural dual, para determinar separadamente os efeitos da evaporação do solo e da transpiração da cultura ou vegetação. Assim são considerados dois coeficientes, o coeficiente cultural basal (K_{cb}) que descreve a transpiração da cultura e o coeficiente de evaporação do solo (K_e) que descreve evaporação a partir da superfície do solo, através da seguinte equação, em que $K_{cb} + K_e$ recebe a designação de coeficiente cultural dual:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (2-12)$$

O coeficiente cultural, K_c , é um parâmetro de referência para diferentes culturas e para diferentes estágios de desenvolvimento das mesmas que permite relacionar a evapotranspiração cultural de qualquer cultura, ET_c , com a evapotranspiração de referência, ET_o , conforme exprimem as equações (2-11 e 2-12). O coeficiente cultural, K_c , varia essencialmente com as características da cultura, traduzindo em menor escala a variação dos fatores climáticos. Este facto torna possível a transferência de valores de referência de K_c de um local para outro e de um clima para outro (Pereira & Allen, 1999b). Os valores de K_c ao longo do ciclo de uma cultura são indicados na Figura 2.5. O ciclo de desenvolvimento vegetativo de uma cultura caracteriza-se de seguinte forma:

Período inicial – Nas culturas anuais, esta fase vai da sementeira ou plantação até ao início do crescimento rápido. Nas culturas perenes, o período inicial começa com o aparecimento de novas folhas. Nesta altura a área folhar das culturas é pequena, o que implica que a evapotranspiração seja predominantemente originada pela evaporação do solo pelo que o coeficiente cultural correspondente ($K_{c\ ini}$) é considerado constante.

Período de crescimento rápido – ao longo deste período a cultura aumenta a área folhar ensombrando cada vez mais o solo, diminuindo, assim, a influência do processo de evaporação do solo e aumentando a importância da transpiração cultural (Allen *et al.*, 1998). O coeficiente cultural neste período varia linearmente entre $K_{c\ ini}$ e $K_{c\ mid}$.

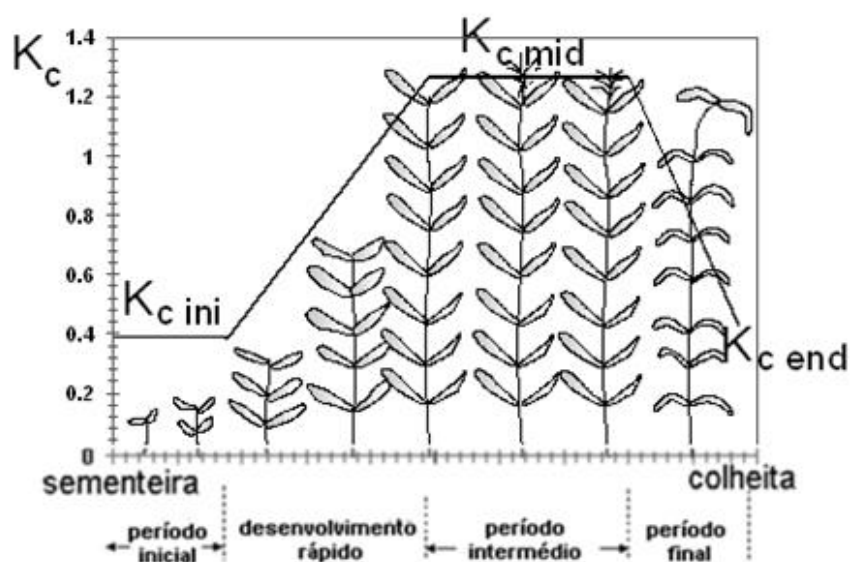


Figura 2.5: Esquema evolução de K_c ao longo do ciclo da cultura (fonte: Pereira, 2004).

Período intermédio – inicia-se com o estabelecimento da máxima cobertura do solo e termina com o início do período final ou de senescência. O início da senescência é geralmente identificado com a maturação da cultura e é caracterizado pelo amarelecimento e queda das folhas e/ou pela maturação dos frutos (Allen *et al.*, 1998). Durante este período o coeficiente cultural $K_{c\ mid}$ é considerado constante.

Período final à colheita – tem lugar entre o início da senescência, $K_{c\ mid}$ e a senescência completa, isto é, até à colheita ($K_{c\ end}$) nas culturas anuais, e no caso das culturas perenes, até ao início da dormência.

Os valores de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$ para as principais culturas encontram-se tabelados em Allen *et al.*, (1998) e Pereira (2004a) e estão incorporados no modelo WINISAREG. Contudo, é necessário proceder à correção climática dos coeficientes culturais tabelados em função da humidade relativa mínima e da velocidade do vento, de forma a permitir a transferência dos K_c de um local para outro (Allen *et al.* 1998; Pereira *et al.* 1999b), sendo que tais correções atendem à altura da cultura através de:

$$K_{c\ mid} = K_{c\ mid\ tab} + 0.04(U_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (2-13)$$

em que:

$K_{c\ mid}$	coeficiente cultural para o período intermédio;
$K_{c\ mid\ tab}$	valor tabelado do coeficiente cultural no período intermédio;
μ_2	valor médio da velocidade do vento ($m\ s^{-1}$) no período intermédio;
HR_{min}	valor médio da humidade relativa mínima (%) no período intermédio;
H	altura média da cultura (m) quando o seu desenvolvimento vegetativo é máximo.

Da mesma forma, para o coeficiente cultural final, $K_{c\ end}$, relativo à colheita ou à entrada em dormência, aplica-se a mesma correção, desde que se verifique $K_{c\ end} > 0.45$.

No que respeita ao coeficiente cultural dual, $K_{cb} + K_e$, proposto por Allen *et al.* (1998, 2005a), menciona-se o seguinte:

a) O coeficiente cultural de base (K_{cb}) é a razão entre a evapotranspiração cultural e de referência, ou seja, ET_c / ET_o , quando a camada superficial do solo se encontra seca, mas sendo o teor em água do solo na zona radicular adequada para manter a cultura em conforto hídrico (Allen *et al.*, 2007; Allen & Pereira, 2009); é usado para o cálculo da transpiração diária;

b) O coeficiente de evaporação do solo (K_e) representa a evaporação do solo húmido, à qual se adiciona à transpiração representada no K_{cb} .

As primeiras aplicações da metodologia dos coeficientes culturais duais proposta por Allen *et al.* (1998) são relatadas por Allen (2000) e referem-se à cultura do algodão e a um estudo desenvolvido na Turquia com o objetivo de comparar diversas metodologias de cálculo da evapotranspiração cultural, sendo que Liu & Pereira, (2000a), as aplicaram às culturas de trigo e de milho na China. Uma aplicação de sucesso à cultura de algodão, cultura de cobertura parcial do solo, é relatada por Howell *et al.* (2004), que não só confirmaram a exatidão do método, mas também o consideraram vantajoso na comparação da evapotranspiração cultural entre rega deficitária, rega para a produção máxima e sem rega, ao permitir dividir a evapotranspiração cultural em evaporação do solo e transpiração da

cultura. A exatidão das estimativas para culturas com cobertura total do solo foi relatada por Er-Raki *et al.* (2007) para a cultura do trigo, e para pomares e culturas com cobertura parcial do solo por Goodwin *et al.* (2006) e Paço *et al.* (2006), este último relativo a pomares no Oeste de Portugal. De salientar os bons resultados obtidos com o modelo SIMDualKc (Rosa *et al.*, 2012a, b; Paço *et al.* 2012) e que confirmam a importância desta ferramenta. Ambas as aproximações ao coeficiente cultural, quer simples, K_c , quer dual, K_c dual, recorrem às mesmas fases do desenvolvimento vegetativo da cultura, esquematizadas na Figura 2.6.

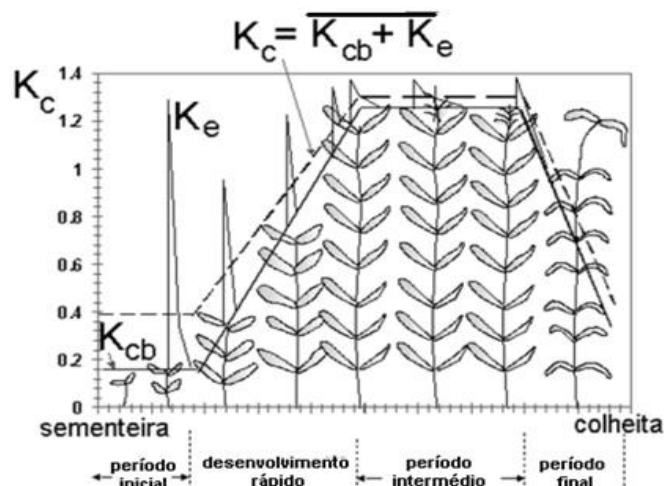


Figura 2.6: Curvas do coeficiente cultural basal K_{cb} (linha contínua), coeficiente de evaporação do solo K_e (linha mais fina com picos irregulares) e o correspondente coeficiente cultural $K_c = K_{cb} + K_e$ (linha tracejada) (fonte: Pereira, 2004).

Na prática, a evapotranspiração real das culturas (ET_r) ou a ET_a é frequentemente inferior à ET_c potencial (ou ET_m), desde que as condições culturais ou a gestão hídrica sejam menos boas, ou devido à salinidade do solo ou da água. Por conseguinte, a diferença clara estabelecida entre a ET_m , que representa condições potenciais de produção, e a ET_a , relativa a condições não ótimas, define-se da seguinte forma:

$$ET_a = K_{c\ adj} ET_o. \quad (2-14)$$

onde $K_{c\ adj}$ é o coeficiente cultural “real” que integra um conjunto de impactes de stress ambiental e cultural. $K_{c\ adj}$ é obtido a partir de K_c através de vários processos referidos por Allen *et al.* (1998, 2006), nomeadamente por simples comparação entre as densidades de copado ou os LAI (índice de área foliar) da cultura com os esperados para uma cultura saudável e sem stress.

Na maioria da bibliografia consultada, os valores de K_c observados são os valores médios (simples), em que o efeito de transpiração da cultura e de evaporação do solo são combinados num único coeficiente K_c . Raramente são utilizados o K_c dual, onde os dois efeitos referidos são determinados de forma independente. No entanto, Silva *et al.*, 2012; Lopez *et al.*, 2009; Rosa *et al.*, 2012a; Bryla *et al.*, 2010; Casa *et al.*, 2000; Martins *et al.*, 2012 e Allen & Pereira (2009) obtiveram bons resultados, usando a metodologia do K_c dual.

Da revisão bibliográfica efetuada conclui-se que muitos países ainda não dispõem de estudos de K_c , e que o K_c médio é muito difundido relativamente ao K_c dual. Apesar da variabilidade dos valores de K_c encontrados na literatura em relação aos padronizados (tabelados), esses não devem ser negligenciados uma vez que K_c “real” varia com os períodos de desenvolvimento vegetativo da cultura, sendo específico para cada região

climática e dependente das práticas agronômicas e da gestão de rega. Nos estudos efetuados com uso de mulch (cobertura de solos para redução de evaporação), verificou-se uma redução significativa dos valores de K_c . Contudo, são em pequeno número os estudos encontrados que referenciam a determinação experimental dos K_c em áreas com mulch. Constatou-se também que as variabilidades sazonais de K_c estão relacionadas sobretudo com as variações climáticas ao longo do ano e com a taxa de crescimento da cultura durante o seu ciclo vegetativo. Melhores estimativas de K_c podem ser alcançadas recorrendo ao procedimento do K_{cb} dual, considerando a fração de cobertura do solo pela vegetação, a densidade da plantação (Allen & Pereira, 2009) e o uso de mulch (Martins *et al.*, 2012; Amayreh & Al-Abed, 2005; Lovelli, 2005).

2.3. Modelação em rega

2.3.1. Balanço hídrico para determinação das necessidades hídricas das culturas

Tanto o WINSAREG, como o SIMDualKc são modelos simplificados uma vez que apenas consideram fluxos verticais. O solo é entendido como um reservatório que cede ou recebe água conforme as “entradas” de água (precipitação, rega e ascensão capilar) são maiores ou menores do que as “saídas” de água (evapotranspiração, drenagem profunda e escoamento superficial), conforme se esquematiza na Figura 2.7.

O volume máximo de água que em determinado instante está armazenado no solo e, como tal, disponível para as culturas é designado por TAW , podendo ser calculado em função dos parâmetros característicos do solo e da profundidade do sistema radicular. Neste tipo de modelos, só se considera a variação dos parâmetros com o tempo. Quanto às condições iniciais, apenas se exige o conhecimento do teor de humidade do solo no instante inicial.

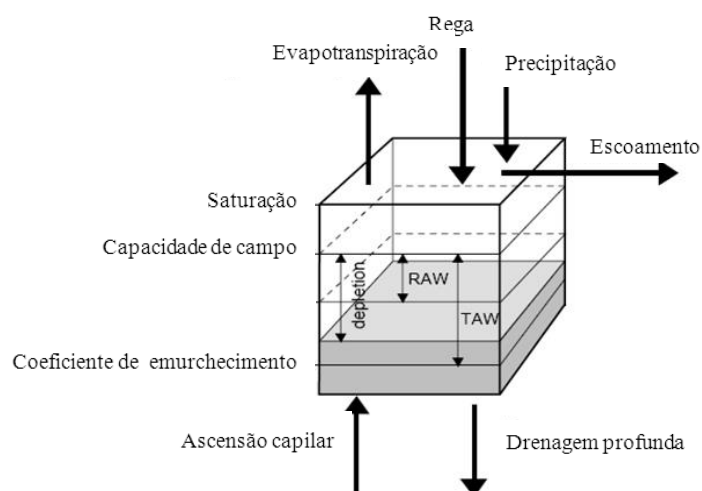


Figura 2.7: Apresentação esquemática dos termos do balanço hídrico da zona de enraizamento recorrendo à caracterização da água do solo (fonte: Allen *et al.*, 1998).

O modelo WINISAREG divide o solo em três zonas quanto à água armazenada, de acordo com o seguinte, em que ET_a e ET_m se referem à evapotranspiração atual e máxima, antes definidas:

- i) Zona com excesso de água (saturação), $ET_m \geq ET_a$ - quando o teor de água no solo é superior à capacidade de campo (θ_{FC});

- ii) Zona de rendimento ótimo ou potencial, $ET_a = ET_m$, - quando o teor de água no solo está compreendido entre a capacidade de campo e o teor de água no solo abaixo do qual a planta entra em stress, provocando, assim, a diminuição da produção. Tal teor, ou seja, a fração da água utilizável no solo que a planta pode extrair sem sofrer stress hídrico, corresponde à fração de extração p ;
- iii) Zona de stress hídrico, $ET_a < ET_m$ - quando o teor de humidade do solo se mantém abaixo de θp (limite inferior do teor de água no solo em que a água ainda pode ser facilmente extraída pelas raízes das plantas sem stress).

As zonas referidas variam com a cultura e com o solo em questão. Ao longo do tempo, variam também com a fase do ciclo vegetativo da cultura, com a desenvolvimento e profundidade do sistema radicular e com a sensibilidade hídrica da cultura.

A quantidade de água retida no solo à capacidade de campo, θ_{FC} , até à profundidade radicular, Z_r , expressa em altura de água armazenada é definida como a água disponível no solo (Pereira 2004) e calcula-se pela seguinte equação:

$$W_{r,FC} = 1000 \theta_{FC} Z_r \quad (2-15)$$

sendo $W_{r,FC}$ (mm) o armazenamento na zona radicular à capacidade de campo; θ_{FC} (m^3m^{-3}) e à profundidade Z_r (m). A quantidade de água retida no solo para o coeficiente de emurchecimento, $W_{r,WP}$ (mm), é dada pela seguinte equação:

$$W_{r,WP} = 1000 \theta_{WP} Z_r \quad (2-16)$$

na qual θ_{WP} (m^3m^{-3}), representa o teor de água do solo para o coeficiente de emurchecimento.

A água disponível total no solo, TAW (mm), é expressa pela seguinte equação:

$$TAW = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (2-17)$$

Por fim, a água facilmente disponível, RAW (mm), é dada por:

$$RAW = p TAW = p 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (2-18)$$

A Figura 2.7 contém o esquema do reservatório da água do solo considerado no WINISAREG. Esse reservatório representa a porção do solo na zona radicular onde a quantidade de água varia. A precipitação, a rega e a ascensão capilar proporcionam água na zona radicular, enquanto a evaporação, a transpiração e as perdas por percolação ou drenagem profunda, retiram água dessa zona.

A equação geral do balanço hídrico na zona de enraizamento para um intervalo de tempo Δt (dias) e para uma camada de solo de espessura Δz (m), correspondente à zona de enraizamento, é dada pela seguinte equação (Pereira 2004):

$$(\Delta S + \Delta V) = (P + I + GW) - (Q_{sr} + DP + E + T) \quad (2-19)$$

onde:

- ΔV aumento de água incorporada nas plantas;
- ΔS variação do armazenamento de água no solo;
- P precipitação;
- I dotação de rega;

GW	fluxo acumulado de ascensão capilar no período Δt ;
Q_{st}	escoamento superficial nesse período;
DP	fluxo acumulado de drenagem profunda ou percolação;
E	evaporação a partir do solo;
T	transpiração.

A equação anterior aplica-se entre a superfície do solo e uma profundidade Z_r abaixo da zona de enraizamento, para qualquer intervalo de tempo Δt . Todas as variáveis referidas na equação anterior podem ser expressas em milímetros ou em volume por unidade de área. A determinação dos termos do balanço hídrico está descrita em Pereira (2004). Segundo o mesmo autor, uma aproximação aplicável essencialmente a regimes de sequeiro (regadio para períodos entre regas de baixas dotações) considera que $\Delta V = 0$; $GW = 0$; $Q_{st} = 0$; $DP = 0$, resultando:

$$(\Delta S) = P + I - ET_r \quad (2-20)$$

A aplicação da aproximação anterior está, no entanto, sujeita às seguintes restrições (Figura 2.8): i) não ocorrer variação significativa do teor de humidade nas camadas mais profundas do solo, i.e., à profundidade z_f não ocorrer variação do teor de humidade entre os instantes t_1 e t_2 entre os quais se realiza o balanço; (ii) baixo valor do teor de humidade nas camadas mais profundas (corresponde a ter um baixo valor da condutividade hidráulica e, portanto, uma drenagem insignificante); e (iii) terrenos com pouco declive e precipitações de baixa intensidade, Pereira (2004a).

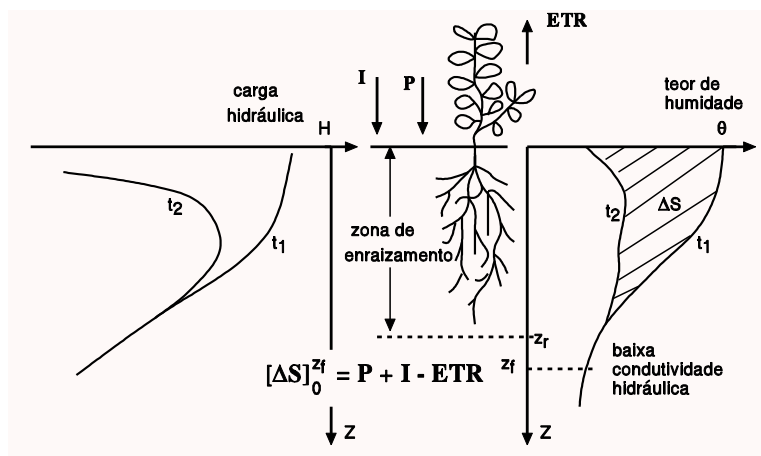


Figura:2.8: Esquema do balanço hídrico quando se podem desprezar os fluxos de água no exterior e interior do solo no intervalo T_2-T_1 (fonte: Fernando, 1998).

A quantidade de água a aplicar na rega depende do método de rega utilizado, do calendário de rega e da eficiência de rega, do intervalo entre regas e da extração da água pelas raízes e da evaporação do solo, do teor de água armazenado no solo e eventualmente da ascensão capilar, ou seja, da ocorrência das contribuições de água provenientes de camadas mais profundas do solo ou a partir da toalha freática. A diminuição da taxa de evapotranspiração e a conseqüente redução das principais funções fisiológicas, nomeadamente, da transpiração, da fotossíntese e da assimilação de uma dada cultura, traduzem-se em stress hídrico que afeta fortemente a produção.

Quanto maior for o grau de stress a que a cultura está sujeita, maiores são as perdas de produção. Nestes casos, para a realização do balanço hídrico, a fração p permite calcular a

água facilmente disponível, *RAW*. Os valores da fração p e da profundidade explorada pelas raízes, Z_r , encontram-se tabelados em Allen *et al.* (1998) e Pereira (2004) para algumas culturas. Os maiores valores de Z_r correspondem às culturas em condições de sequeiro enquanto os menores, a culturas de regadio. A profundidade efetiva da zona radicular no dia i pode estimar-se através de:

$$Z_{ri} = Z_{r\min} + \left(Z_{r\max} - Z_{r\min} \right) \frac{J_i - J_{ini}}{L_{rd}} \quad (2-21)$$

em que as variáveis têm os significados seguintes:

- Z_{ri} profundidade efetiva da zona radicular no dia i (m);
- $Z_{r\min}$ profundidade efetiva inicial (ou mínima) da zona radicular (m) (quando $J=J_{ini}$);
- $Z_{r\max}$ profundidade efetiva máxima da zona radicular (m);
- J_i dia juliano correspondente ao dia;
- J_{ini} dia juliano correspondente ao dia de sementeira ou plantação, ou ao dia em que se inicia o crescimento vegetativo, ou o dia 1 de janeiro para cultura perene em crescimento contínuo;
- L_{rd} duração do período de crescimento das raízes (dias).

Os valores da fração p referem-se a valores médios para o perfil do solo e a dadas condições de procura climática correspondendo, aproximadamente, a um valor de ET_c de cerca de 5 mm dia⁻¹. Daí que p deva ser ajustado às condições de procura climática, devendo ser diminuído para condições de procura climática maior e aumentado quando a procura for inferior àquela ET_c , porém não ultrapassando os limites extremos entre 0.1 e 0.8, ou seja, em que p_{Table} respeita ao valor de p tabelado:

$$0.1 \leq p = p_{Table} + 0.04 (5 - ET_c) \leq 0.8 \quad (2-22)$$

Segundo Pereira (2004), quando as necessidades de água para rega são calculadas por balanço hídrico, a equação (2-23), que estima o teor de água no solo, θ_i :

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{st_i}) + I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000 Z_{ri}} \quad (2-23)$$

simplifica-se pois pode assumir-se que $Q=0$, $DP=0$ (ou seja, a precipitação a considerar é a precipitação efetiva, P_e). Resulta assim:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{P_{ei} + I_{ni} - ET_{ci} + GW_i}{1000 Z_{ri}} \quad (2-24)$$

equação que se resolve em ordem a I_n relativamente ao dia em que q_i atinge o limiar

$$\theta_i = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2-25)$$

sendo a dotação dada por

$$I_{ni} = 1000 Z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_i) \quad (2-26)$$

em que:

- q_i teor de água do solo na zona radicular (m³ m⁻³ ou mm mm⁻¹) no dia i ;

q_{i-1}	teor de água do solo na zona radicular no dia i-1;
P_i	precipitação no dia i (mm);
Q_{sti}	escoamento superficial no dia i (mm);
I_{ni}	lâmina líquida de rega no dia i (mm);
ET_{ci}	evapotranspiração cultural no dia i (mm);
DP_i	percolação no dia i (mm);
GW_i	fluxo acumulado de ascensão capilar no dia i (mm).

As necessidades de rega correspondem à fração das necessidades de água das culturas que não são satisfeitas pela precipitação, pela água armazenada no solo e pela ascensão capilar. As necessidades globais de rega incluem também a fração de lavagem que deve ser adicionada cumulativamente com a dotação de rega para lavagem dos sais que se acumulem na zona radicular, bem como a fração de água em excesso devido à não uniformidade e à ineficiência da rega, dependendo do sistema de rega, oportunidade das regas e características das redes de distribuição e transporte (Pereira & Allen, 1999c).

Para uma gestão eficiente é necessário conhecer alguns parâmetros, tais como: i) necessidades líquidas totais de água para rega, IWR ; ii) necessidades brutas ou globais de água de rega, $GIWR$; iii) volume de água de rega consumido, $GIWR_V$; iv) volume de água de rega utilizado, IWR_V (para satisfazer as suas necessidades hídricas reais); e, finalmente, v) volume de água de rega restituído, R_V . A seguir definem-se de uma forma breve os cinco parâmetros acima listados.

i) Necessidades líquidas totais de água para rega, IWR ou NIR - representam a quantidade de água fornecida pela rega em condições reais de desenvolvimento da cultura, traduzida por um determinado nível de produtividade. Este conceito distingue-se da necessidade hídrica da cultura pelo facto de não estar associado a um nível de produtividade máximo. O seu cálculo processa-se acordo com:

$$IWR = \frac{ET_c - P_e - GW - \Delta S}{1 - LR} \quad (2-27)$$

em que ΔS é a variação acumulada do armazenamento na zona radicular durante o ciclo vegetativo, dada pela soma algébrica das sucessivas variações de armazenamento calculadas e representa a diferença entre q_i (teor de água no solo no dia de início do ciclo, por exemplo, à sementeira,) e no dia final, por exemplo, à colheita e LR é a fração de água de rega que deve ser acrescentada às necessidades líquidas devidas à evapotranspiração, de forma a percolar através da zona radicular e ser capaz de arrastar os sais em excesso e, assim, manter a salinidade do solo em níveis compatíveis com as condições de produção e ambientais. O seu cálculo processa-se através de:

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e - EC_{iw}} \quad (2-28)$$

em que EC_w é a condutividade elétrica da água de rega e EC_e , a condutividade elétrica do extrato saturado do solo.

ii) Necessidades brutas ou globais de água de rega, $GIWR$ ou Db para uma dada cultura, dependem da eficiência de aplicação relativa ao sistema de rega utilizado, e das eficiências de distribuição e de transporte relativas à rede de rega, ou seja:

$$GIWR = \frac{IWR}{BWUR} \quad (2-29)$$

em que $BWUR$ representa a razão de uso benéfico da água, entre o uso benéfico BWU e o uso total TWU , expresso em fração (ou em percentagem) conforme terminologia recentemente proposta por Pereira *et al.* (2009b, 2012). Resulta, assim, que $GIWR$ representa as necessidades totais de água que têm de ser satisfeitas na origem e que são tanto menores quanto maior for a proporção de uso benéfico da água.

iii) **Volume de água de rega utilizado** pela rega afeta a uma dada origem de água, $GIWR_V$ - relaciona-se com as necessidades brutas ou globais de água de rega, $GIWR$, através de:

$$GIWR_V = GIWR \times A \quad (2-30)$$

onde A representa a área agrícola regada.

iv) **Volume de água de rega consumido** efetivamente pelas plantas para satisfazer as suas necessidades reais para um determinado nível de produtividade, IWR_V , - é dado pela seguinte expressão em que as variáveis têm os significados antes apresentados:

$$IWR_V = IWR \times A \quad (2-31)$$

v) **Volume de água de rega restituído**, R_V - é a diferença entre os volumes de água derivado na origem e realmente consumido pelas plantas. R_V quantifica os usos não benéficos ($NBWU$) que ocorrem na condução, na distribuição e na aplicação de água às plantas (Pereira *et al.*, 2012) e que podem ser parcialmente restituídas à rede hidrográfica. Define-se, portanto, através de:

$$R_V = GIWR_V - IWR_V \quad (2-32)$$

Teor de água no solo e condução da rega - se a água não for um fator limitante, a condução de rega faz-se de forma a evitar que ocorra défice hídrico e a data limite para realizar a rega será quando o teor de água do solo θ_i ($m^3 m^{-3}$,) atingir o limiar θ_t .

$$\theta_t = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2-33)$$

No entanto este procedimento, tomando como limiar a fração de extração p , é adotado quando se pretende evitar stress hídrico e atingir a produção potencial.

A rega pode ser conduzida para um limiar diferente, o qual traduz a extração desejada em termos de gestão, MAD (*management allowed depletion*), como definido por Martin *et al.* (1990). $MAD < p$ quando, para culturas ricas, se pretende diminuir o risco de ocorrência de stress ou as incertezas ligadas à gestão da rega. $MAD > p$ quando se assume intencionalmente a gestão da rega com stress em determinados períodos, ou quando os recursos hídricos disponíveis são insuficientes. A rega será então efetuada no dia i tal que:

$$\theta_i = \theta_{MAD} = (1-MAD)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2-34)$$

Em ambos os casos, a dotação a aplicar para restabelecer a água do solo à capacidade de campo é dada por:

$$I_{ni} = 1000 z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_i) \quad (2-35)$$

A dotação, I_{ni} , assim calculada, constitui a maior quantidade de água a aplicar para que não ocorra percolação. Podem, portanto, utilizar-se dotações menores, seja definindo um valor

máximo para θ (teor de humidade do solo) inferior à capacidade de campo, seja adotando uma dotação fixa conforme o método de rega utilizado.

2.3.2. Modelação das necessidades hídricas das culturas e gestão de rega

Para o desenvolvimento de uma modelação hidrológica e da rega, além de informações hidroclimatológicas (2.2.1), pedológicas (2.2.2), e sobre evapotranspiração (2.2.3), é necessário conhecer ou estimar as necessidades hídricas das culturas em causa.

A necessidade hídrica da cultura é definida como a quantidade de água, por regra expressa em milímetros, necessária para fazer face, durante um certo período de tempo, à água transferida para a atmosfera através da evapotranspiração dessa cultura, no pressuposto de que a cultura está isenta de doenças, que cresce numa parcela extensa, sem restrições relativas à água e ao solo, incluindo a fertilidade, e que atinge a produção potencial para o ambiente aonde se encontra (Doorenbos & Pruitt 1977; Allen *et al.* 1998; Pereira 2004).

A variação do teor de água disponível no solo depende fortemente da extração pela cultura ao longo do seu ciclo vegetativo. No estudo efetuado, a determinação das necessidades hídricas das culturas recorreu aos modelos WINISAREG e SIMDualKc. Esses modelos permitem estimar a variação do teor de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura, informação essencial para uma gestão eficiente da água de rega.

Optou-se por determinar as necessidades líquidas de rega, *NIR*, obtidas mediante o balanço hídrico do solo para algumas culturas e anos das séries meteorológicas de *P* (precipitação) e *ET_o* disponíveis. Uma vez obtidas as séries de necessidades líquidas de rega para cada cultura, efetuou-se a análise de frequência dessas séries, para o que foi ajustada uma função de distribuição normal. Estimaram-se, assim, as necessidades de rega para os anos de seca severa e de seca extrema. O balanço hídrico foi depois simulado para as condições climáticas desses anos. Anota-se que, na generalidade das aplicações, os anos de seca severa e de seca extrema foram muito simplesmente assimilados aos anos com a procura climática forte corresponde a uma probabilidade de não excedência de 80% (seca severa), e a procura climática muito forte, a uma probabilidade de não excedência de 95% (seca extrema), sendo que somente no Capítulo 7 é conferido ao conceito de seca um enquadramento teórico mais amplo, associado ao conceito de perigo.

2.3.2.1. Modelo WINISAREG

O WINISAREG (Teixeira & Pereira, 1990; Liu *et al.*, 1998, 2006; Pereira *et al.*, 2003b) é um modelo computacional que efetua o balanço hídrico do solo e, determinando as necessidades hídricas das culturas, pode simular condições, tanto de stress hídrico, como de cultivo ótimo. Em presença de salinidade, o modelo permite obter as necessidades globais da rega considerando a fração de lavagem do solo e o impacto da salinidade na produção através do cálculo das perdas potenciais de produção (Pereira *et al.*, 2003a; 2007a). O WINISAREG permite o cálculo de *ET_o*, utiliza vários passos de tempo para o cálculo de balanço hídrico e considera a aproximação do *K_c* simples, ou seja, a metodologia apresentada por Doorenbos & Pruitt (1977) atualizada conforme Allen *et al.* (1998) com a estrutura apresentada na Figura 2.9.

Dados meteorológicos: destinam-se ao cálculo de *ET_o* e ao ajustamento do *K_c* e envolvem temperaturas máxima (*T_{max}*) e mínima (*T_{min}*); humidade relativa (*HR*) média ou máxima e mínima; velocidade do vento e insolação ou radiação. Outro dado de entrada importante para o modelo é a precipitação (*P*).

Dados agronómicos: respeitam a parâmetros pedológicos e culturais. Estão compreendidos nos primeiros o número de camadas de solo; as profundidades inicial e final de cada camada; o teor de água do solo à capacidade de campo (θ_{FC}); o teor de água do solo correspondente ao coeficiente de emurchecimento (θ_{WP}) em mm ou % da volúmica e a densidade aparente.

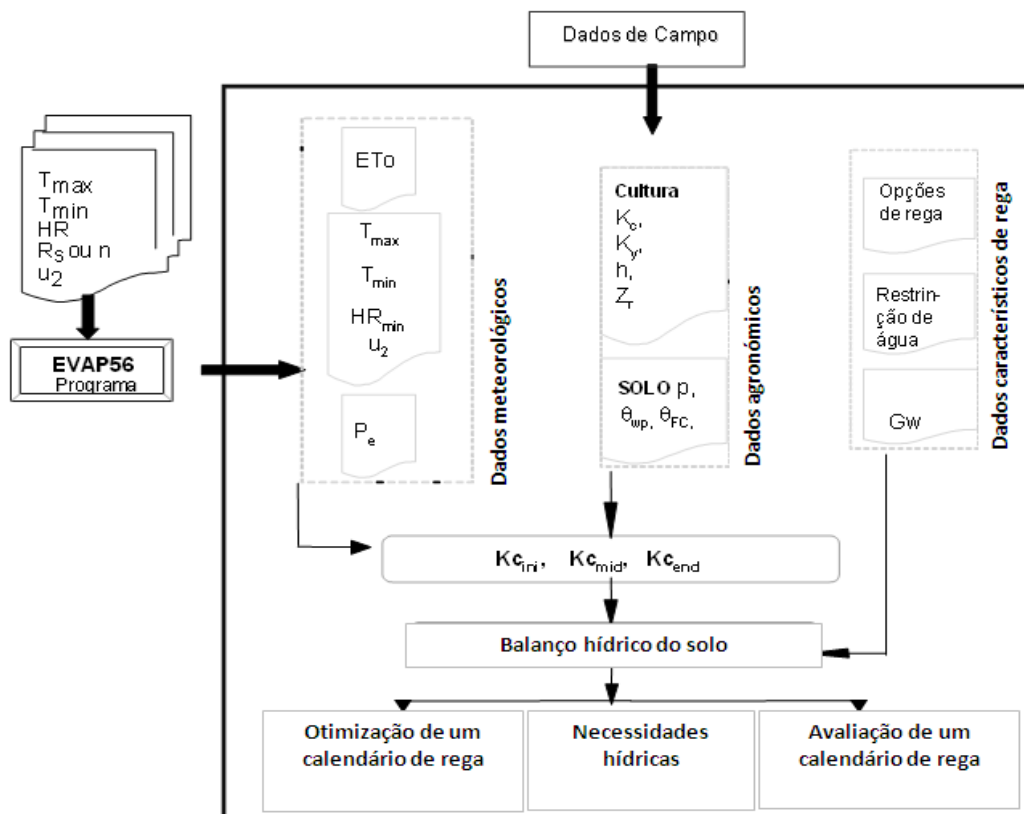


Figura 2.9: Estrutura do modelo WINISAREG (adaptado de Paredes & Pereira, 2010).

O modelo requer dados de entrada meteorológicos, agronómicos e de rega, seguidamente especificados.

Os parâmetros culturais definem o conjunto de características associadas à cultura necessárias para a realização do balanço hídrico do solo e incluem: a fração de água utilizável no solo que a planta pode extrair sem causar stress hídrico (p); os coeficientes culturais, $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$; a profundidade radicular, Z_r ; e o coeficiente de sensibilidade hídrica, K_y (tabelado em Doorenbos & Kassam, 1979).

Dados da rega: na posse das características hidrológicas do solo e da cultura, é necessário definir as várias situações em que se realiza a rega (esquema de rega), isto é, quando e quanto regar, tendo em conta as restrições em água e considerando a hipótese da ascensão capilar, GW . Tais conjuntos de dados são considerados característicos da rega.

2.3.2.2. Modelo SIMDualKc

O principal objetivo deste modelo é o de permitir desenvolver opções para a calendarização da rega, tanto para as culturas com cobertura parcial do solo, como para hortícolas e pomares e para os sistemas com regas de alta-frequência, como é o caso da microrrega. Nessas condições, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais permite produzir estimativas da evapotranspiração cultural, ET_c , mais exatas (Allen *et al.*, 2005b).

Relativamente ao WINSAREG, o SIMDualKc permite atender a opções para mulch, usa o coeficiente cultural dual, faz o cálculo de ET_o , considera a fase de cobertura parcial do solo, determina o número de escoamento (CM) e o escoamento. O modelo trabalha com dados diários.

O modelo SIMDualKc foi desenvolvido em Visual Basic 6.0 com base de dados em Access 2000, proporcionando uma interface gráfica que facilita a análise e a visualização dos resultados. A aplicação foi estruturada segundo uma arquitetura de três camadas, Figura 2.10: a base de dados, o modelo computacional propriamente dito e a interface gráfica (Rosa *et al*, 2012a, b).

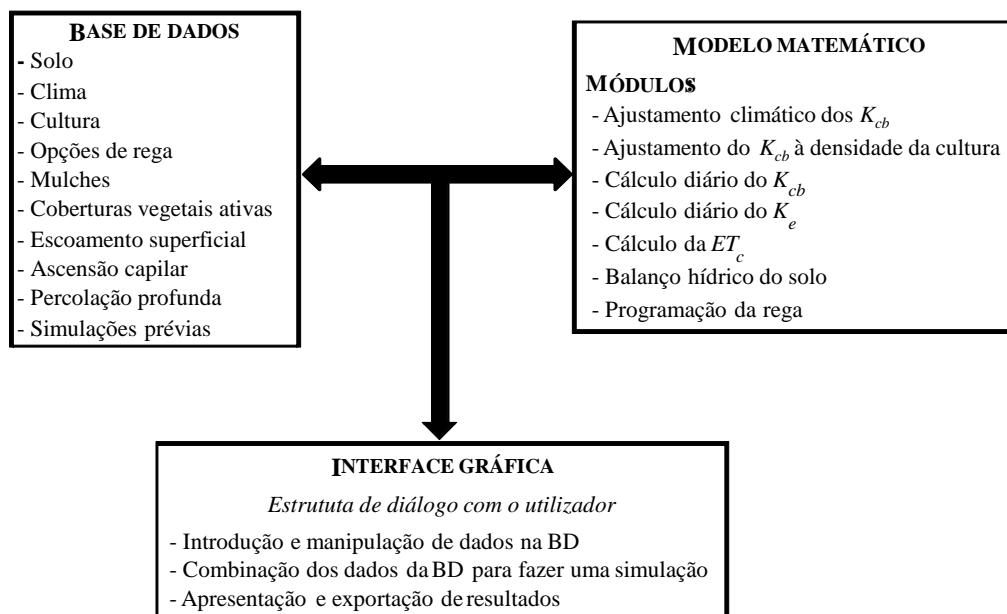


Figura 2.10: Estrutura simplificada do modelo SIMDualKc (fonte: Rosa *et al.*, 2012a).

A base de dados permite guardar a informação relativa ao solo, cultura, clima, sistema de rega e características da simulação, possibilitando a construção do campo da simulação. O modelo SIMDualKc tem a estrutura esquematizada na Figura 2.11. Tal modelo foi desenvolvido de modo a permitir uma fácil integração com o modelo WINISAREG. Os dados de base por ele requeridos incluem os dados meteorológicos, da cultura e do solo, a seguir discriminados:

Dados meteorológicos: temperaturas diárias, mínima e máxima ($^{\circ}C$); velocidade do vento, u_2 ($m s^{-1}$); evapotranspiração de referência, ET_o (mm); precipitação efetiva, P_e (mm);

Dados de cultura: data da plantação; duração dos diferentes estágios culturais (dias); valores tabelados ou observados do coeficiente cultural basal, K_{cb} ; profundidade máxima e mínima da raiz, Z_r (m); altura da cultura, h (m); fração de solo molhada pela rega, f_w ; fração de solo coberta, f_c ; fração de solo molhada que se encontra exposto há radiação solar, f_{ew} ; fração de esgotamento da água do solo em conforto hídrico que corresponde a p .

Dados de solo: profundidade da camada evaporativa, d (mm); água facilmente evaporável, REW (mm); total de água evaporável, TEW (mm); total de água disponível para as culturas, TAW (mm).

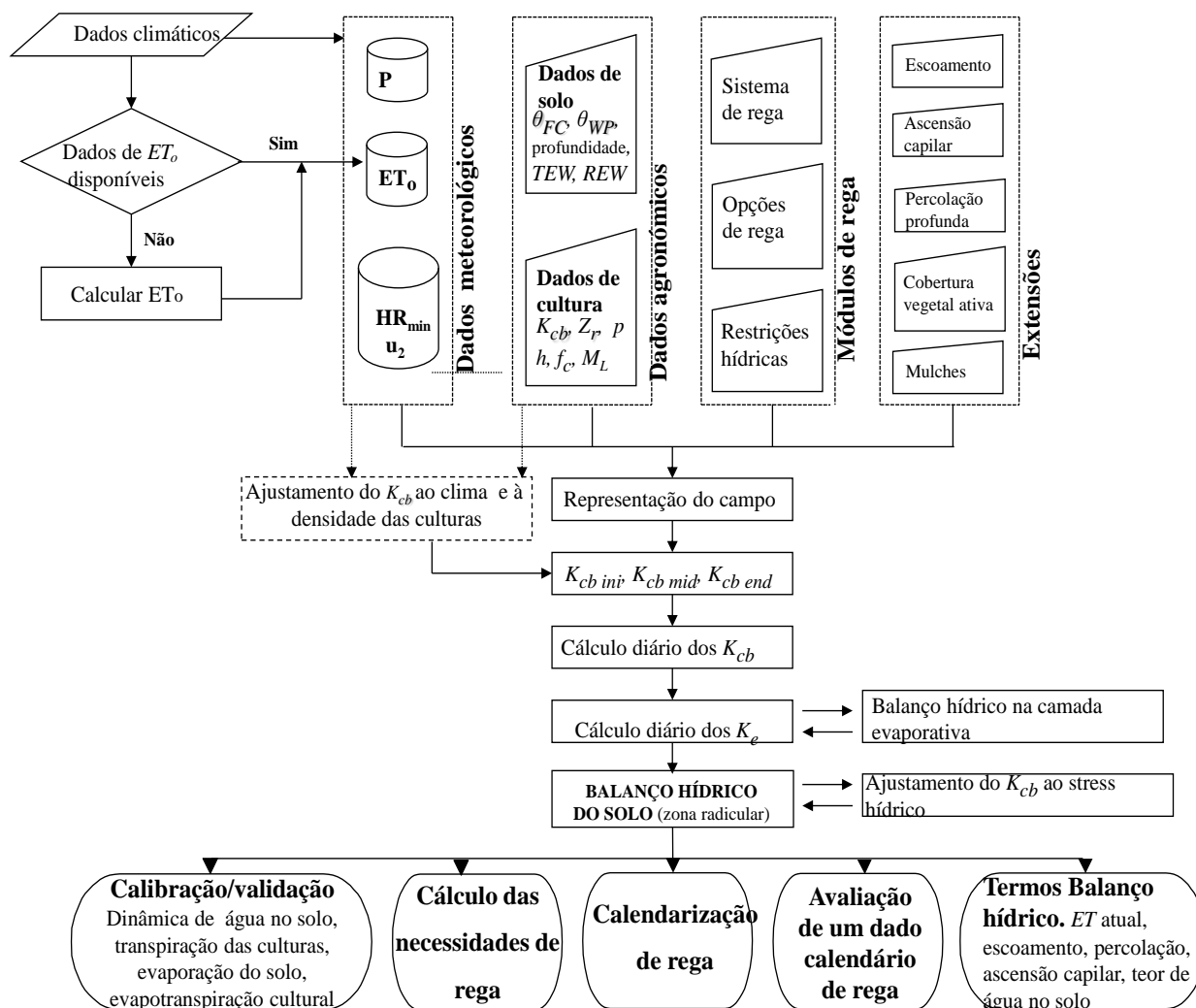


Figura 2.11: Fluxograma do modelo SIMDualKc. (adaptado de Rosa et al., 2012a).

Os dados relativos ao solo e à cultura são introduzidos inicialmente pelo utilizador nas respetivas interfaces. Esses dados ficam armazenados na base de dados e disponíveis para as simulações posteriores. Depois procede-se à importação de dados climáticos diários da região, assim como a uma descrição da estação meteorológica mais próxima do local em estudo. Os valores de evapotranspiração de referência podem ser calculados ou importados (neste caso, tendo sido calculados previamente). Uma vez inseridos os dados referentes ao solo, à cultura, ao clima e ao sistema de rega a ser utilizado, inicia-se a simulação, recorrendo à interface de simulação.

Os resultados dos modelos WINISAREG e SIMDualKc podem ser visualizados sob a forma gráfica ou de tabela, onde é apresentada a variação do teor de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura. Os resultados podem ser ainda exportados na forma de um ficheiro de texto (.txt) e posteriormente utilizados.

2.3.3. Calendários de rega

Segundo Pereira (2004), os fatores que devem ser considerados quando se elabora um calendário de rega são a quantidade de água disponível, as limitações de água, o estado de desenvolvimento da cultura e o rendimento potencial, a precipitação e a evapotranspiração, o método de rega e as limitações do sistema, e o teor de água do solo.

A determinação do balanço hídrico do solo ao nível da zona radicular, com a quantificação dos termos que o constituem e a caracterização dos padrões de ocorrência dos processos de extração radicular e de escoamento de água no solo, é uma atividade determinante para a gestão da rega e para a elaboração e a otimização dos calendários de rega.

A prática mais generalizada na agricultura de regadio é orientada de modo a maximizar o rendimento da cultura por unidade de água, aplicando a quantidade de água necessária para suprir as necessidades da cultura fornecendo-se, por vezes, mais água do que a requerida. No entanto, como acontece no caso dos cereais, a partir de um determinado nível, maximizar a produtividade da água implica menor produtividade da terra e consequentes menores rendimentos (Pereira *et al.* 2007a).

Nas bacias hidrográficas que constituem os casos de estudo, as disponibilidades de água para a rega são muito limitadas, pelo que é necessário proceder a modificações na gestão da rega, concretamente, visando a poupança de água e o aumento da eficiência dos métodos de rega através da implementação de rega deficitária, se tal se revelar economicamente viável. Segundo Johnson e Henderson (2002), a rega deficitária atende à relação entre água de rega e produção, escolhendo o calendário de rega mais apropriado para poupar água.

Em regiões semiáridas, equacionar o uso eficiente de água requer, necessariamente, a avaliação das culturas. Para tais regiões existem várias estratégias de rega deficitária que vão desde a redução da quantidade de água aplicada por rega, preenchendo só parte da capacidade do solo na zona radicular, à redução da frequência de rega, aumentando o intervalo entre regas sucessivas. Na rega por superfície, regar sulcos alternados é um modo de implementar rega de poupança, em muitos casos deficitária (Pereira *et al.*, 2002a; Horst *et al.*, 2007). Segundo Rodrigues & Pereira (2009), analisar a rega deficitária e, consequentemente, definir os aspetos correspondentes a sua adequada viabilidade, requer não apenas o conhecimento da resposta da cultura à água, mas também da estrutura de custos de produção, incluindo os impactos dos custos de rega e a rentabilidade da cultura. É, então, necessária uma modelação apropriada uma vez que os fatores de produção têm um papel muito importante.

O desempenho dos sistemas de rega influencia fortemente a produtividade da água, WP , neste caso definida como a razão entre a produção real da cultura, Y_a , e o total de água utilizado, TWU . É importante considerar as questões económicas relativas à produtividade já que o objetivo do agricultor é alcançar o melhor retorno possível (Rodrigues *et al.*, 2010). Existem, no entanto, casos em que a rega deficitária não é adequada. Com efeito, apesar de tal rega permitir frequentemente bons resultados a nível da produção, não se dispõe de investigação ou de informação suficiente que permitam quantificar os efeitos dessa prática de gestão de água na salinização do solo e na necessidade de lavagem. Existem ainda outros riscos associados à rega deficitária tais como as incertezas associadas à estimativa do uso ótimo da água e aos fatores que afetam a produção (clima, falhas do sistema de rega, taxa de germinação e incidência de pragas e doenças) e a função custo e preço do produto. Estas incertezas tornam igualmente incerta a função água versus produção e, consequentemente, os resultados do uso ótimo da água constituem uma estimativa com algum grau de incerteza. Porém, o facto de existirem riscos não implica o abandono da rega deficitária, tanto mais em zonas áridas em que tal rega pode ser uma opção ditada pela necessidade imposta pelas condições climáticas. De facto, a prioridade é aumentar a razão $BWUR$ e minimizar os $NBWU$ ao mesmo tempo que se aumenta a produtividade física da

água, *WP*, e a produtividade económica da água, *EWP*, como analisado por Rodrigues & Pereira (2009) e Pereira *et al.* (2012).

2.3.4. Modelação e avaliação dos sistemas de microrrega – SAD MIRRIG

Uma vez aplicados os modelos de balanço hídrico do solo a nível da parcela, prosseguiu-se com a avaliação dos sistemas de rega recorrendo ao modelo MIRRIG (Pedras, 2003; Pedras *et al.* 2009b; Pedras & Pereira 2009a). O balanço hídrico do solo foi obtido aplicando os modelos WINISAREG e SIMDualKc após parametrização das culturas e caracterização das propriedades hidráulicas dos solos e dos sistemas de rega localizada existentes. A avaliação dos sistemas de rega seguiu o protocolo proposto por Pereira & Trout (1999c).

O modelo MIRRIG é um sistema de apoio à decisão, SAD, e permite: (i) a criação das bases de dados dos emissores, das tubagens, das culturas e dos solos para posterior construção de alternativas de sistemas de microrrega; (ii) a simulação dessas alternativas com vista à determinação dos critérios técnicos, económicos e ambientais mais favoráveis ao sistema de rega em questão; (iii) e a análise multicritério, com ordenação das anteriores alternativas de acordo com os valores daqueles critérios e por ordem decrescente de preferência.

A estrutura conceptual do modelo MIRRIG é apresentada na Figura 2.12, onde se identificam as duas componentes principais: a base de dados e os modelos que visam o projeto, a análise multicritério e a avaliação de sistemas de rega em funcionamento.

A metodologia aplicada neste estudo baseia-se, essencialmente, na avaliação e recolha de dados dos sistemas de microrrega mais utilizados na Ilha de Santiago. Para o efeito, avaliaram-se os sistemas existentes nos principais perímetros regados nas bacias hidrográficas de São Domingos e de Ribeira. Os sistemas de rega avaliados referem-se principalmente aos perímetros de Achada Baleia e Colonato, na bacia hidrográfica de São Domingos, e ao do INIDA, na bacia hidrográfica de Ribeira Seca.

A avaliação do desempenho incidiu essencialmente sobre sistemas de rega por gotejamento com o objetivo de verificar se um dado volume de água aplicado na rega é necessário e eficiente. Para tal, levaram-se a cabo as seguintes ações: identificação dos perímetros; recolha dos dados dos sectores e subsectores de microrrega no período de análise (dados relativos às disponibilidades de água, sistema de microrrega instalado e grau de assistência técnica); seleção das áreas representativas permitindo evidenciar as tendências eventualmente presentes na gestão dos sistemas de microrrega no contexto local; avaliação do desempenho de sistemas de microrrega baseada na simulação e análise multicritério; determinação dos indicadores de desempenho; e elaboração do melhor conselho aos regantes em termos de modelo de gestão a nível das parcelas de microrrega.

A escolha dessas áreas avaliadas foi feita com base nos seguintes critérios: proximidade a uma estação meteorológica; parcelas que representassem as situações mais generalizadas de microrrega na ilha; parcelas cujos gestores são os próprios agricultores; parcelas com alguma assistência técnica; parcelas cujos tubos e gotejadores fossem os mais comuns nos sistemas de microrrega da Ilha de Santiago; parcelas dedicadas sobretudo a culturas anuais; e parcelas regadas com controlo do volume de água aplicado na rega.

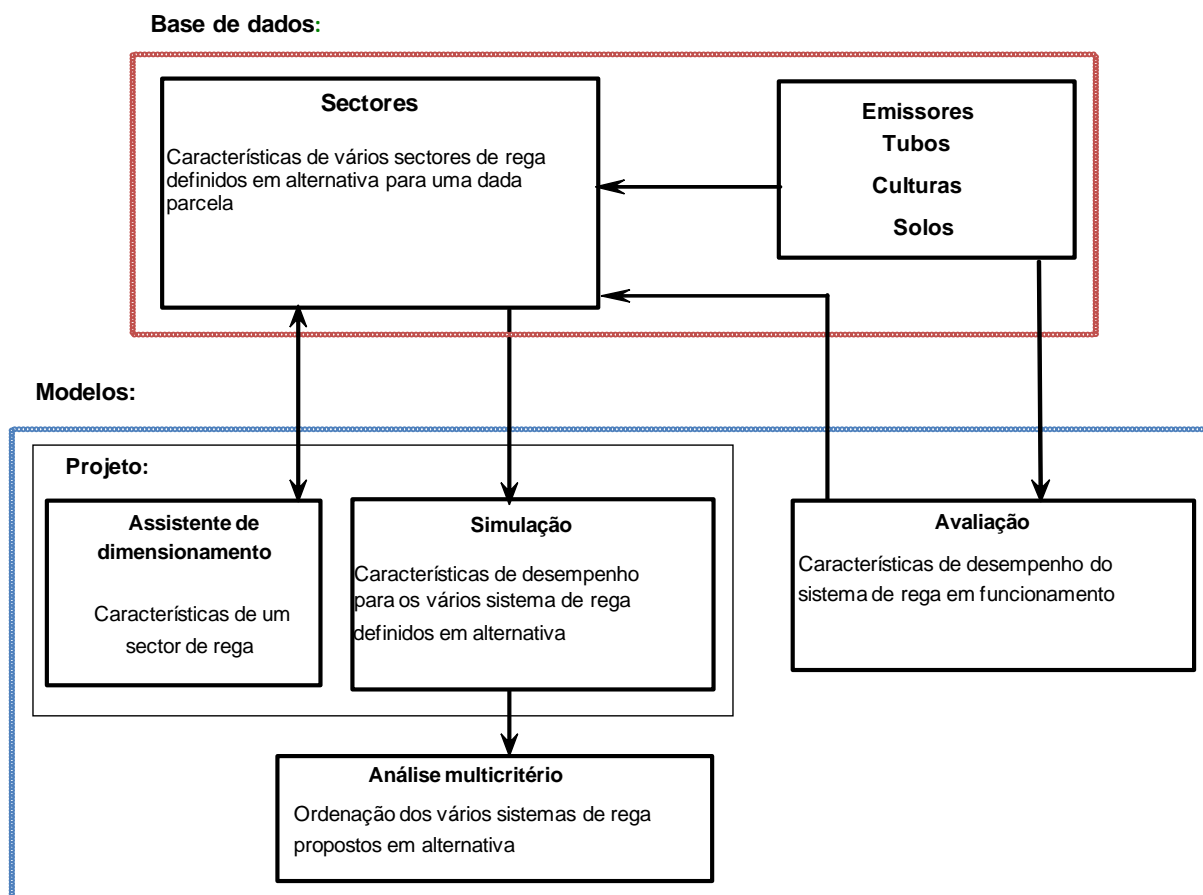


Figura 2.12: Estrutura conceitual do modelo SAD MIRRIG (adaptado de Pedras et al., 2009b).

Para avaliação dos sectores de rega gota-a-gota desenvolveram-se as seguintes ações: identificação dos sectores em cada perímetro regado; caracterização dos solos (textura, propriedades hidráulicas); inquéritos sobre conhecimentos dos agricultores sobre a rega gota-a-gota; caracterização da cultura (data da plantação; compasso de plantação; profundidade radicular; percentagem da área coberta; ciclo vegetativo); caracterização da rega (duração, frequência, sequência de rega e duração de um ciclo normal de rega); caracterização dos filtros de rega (tipos, pressão à entrada e à saída, frequência de limpeza, idade); caracterização dos gotejadores (modelo, caudal/pressão de funcionamento, compasso); caracterização dos equipamentos de rega (comprimento e diâmetro das várias condutas, válvulas, contadores, reguladores de pressão); e topografia geral da parcela (sectores escolhidos). Os dados de campo (dos emissores, dos tubos, dos solos, das culturas, e dos sectores) foram posteriormente processados recorrendo ao modelo MIRRIG.

A aplicação do SAD MIRRIG visa comparar os sistemas de rega atualmente existentes no campo com os sistemas melhorados, simulados pelo modelo, determinando as melhores alternativas de sistemas de rega para os casos de estudo. Por outro lado, conduz a soluções de poupança de água para atividades hidroagrícolas.

2.4. Modelação do escoamento e disponibilidade de água

2.4.1. Modelação do escoamento à escala mensal

Os modelos de balanço hídrico mensais são particularmente pertinentes em aplicações em bacias hidrográficas não monitorizadas onde se pretendem determinar os volumes de escoamento mensais e anuais. Um modelo de gestão de água na agricultura, requer o conhecimento das disponibilidades hídricas para cuja estimação e modelação se utilizou o modelo de Temez (Temez, 1978). Uma alternativa seria aplicar o modelo Wapaba (Wang 2009) tendo em conta os bons resultados obtidos em bacias hidrográficas de regiões áridas e semiáridas de Austrália. Porém, neste estudo optou-se pelo modelo Temez dada, fundamentalmente, a sua simplicidade, uma vez que faz intervir unicamente a precipitação e a evapotranspiração de referência, para além, obviamente, de parâmetros que têm de ser calibrados.

O modelo Temez foi desenvolvido para intervalos de tempo mensais, embora possa ser também aplicado a intervalos de tempo menores (decendiais). Foi concebido para reproduzir os processos essenciais do transporte de água nas diferentes fases do ciclo hidrológico (Temez, 1978), assentando no princípio da continuidade ou da conservação da massa e sendo regulado por leis específicas de repartição e transferência entre as componentes do ciclo hidrológico.

Segundo Monreal (1993), o modelo Temez, é um modelo agregado com reduzido número de parâmetros (quatro), sendo que o seu algoritmo permite constatar, ao contrário da técnica do balanço sequencial, a produção de excedentes de água à superfície mesmo sem o solo se encontrar saturado, pois atende a que, necessariamente, existe escoamento superficial sempre que a intensidade da precipitação for superior à taxa de infiltração da água no solo. Contrariamente à técnica do balanço hídrico sequencial mensal, permite considerar a repartição entre a água que escorre superficialmente e a água que se infiltra no aquífero (Figura 2.13).

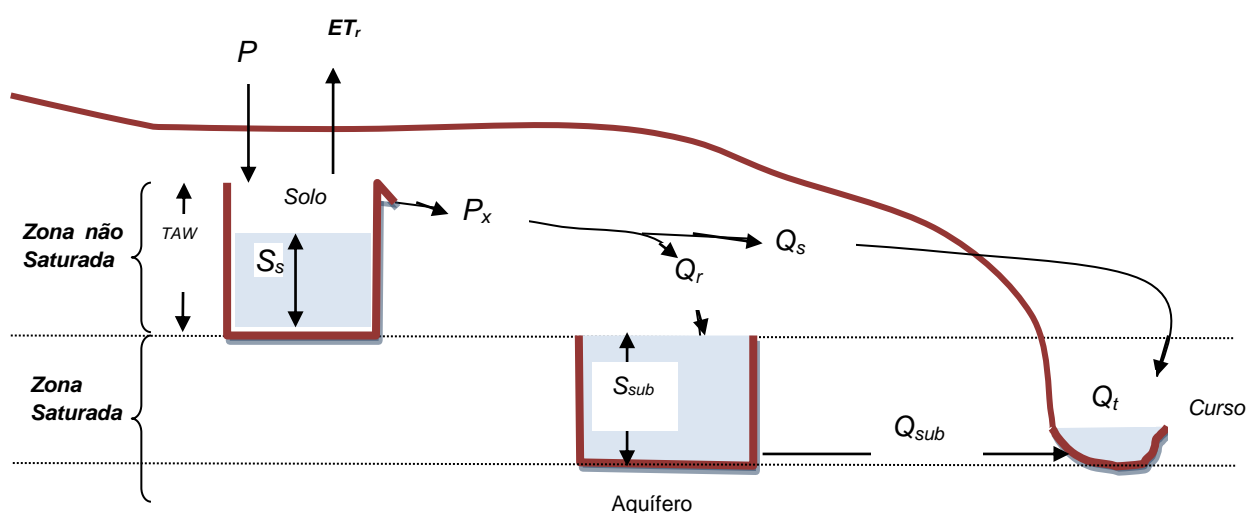


Figura 2.13: Modelo de Temez (adaptado de Matias, 2010).

Nota: na figura P é a precipitação; ET_r a evapotranspiração real; P_x o excesso de precipitação; Q_r , o excedente de precipitação que contribui para a recarga do aquífero; Q_s , o excedente de precipitação que contribui para escoamento superficial, alimentando diretamente os cursos de água.

O modelo considera o solo da bacia dividido em seguintes duas zonas:

a) Uma zona superior não saturada onde os poros do solo contêm volumes de água e ar. Esse solo armazena uma altura de água S_s até atingir uma capacidade máxima, TAW , sujeita a evapotranspiração.

b) Uma zona inferior saturada, na qual os poros se encontram preenchidos somente com água, a qual contribui para o escoamento sub-superficial ou subterrâneo. Constitui o aquífero, armazenando uma altura de água S_{sub} .

Conforme se esquematiza na Figura 2.13, uma parte, P_x , da precipitação ocorrida num dado intervalo de tempo escorre inicialmente à superfície do terreno, encaminhando-se para a linha de água, enquanto que a remanescente, P , contribui para armazenamento na zona não saturada do solo, alimentando a evapotranspiração. Da parte P_x que escorre inicialmente à superfície do terreno, existe uma fração que se infiltra, Q_r , até à zona saturada e outra que permanece à superfície, Q_s , em direção à linha de água. Esta última fração contribui para o escoamento no instante de cálculo, enquanto que a água infiltrada, Q_r , se integra na zona saturada, repartindo-se pelo escoamento, tanto naquele instante de cálculo, como em instantes posteriores.

Segundo Matias (2010) a aplicação do modelo de Temez efetua-se em duas fases. A primeira referente à calibração de parâmetros e, a segunda, à validação do modelo com os parâmetros anteriormente calibrados. A otimização dos parâmetros (fase de calibração) requer a coexistência temporal dos seguintes dados: i) escoamentos mensais na secção da rede hidrográfica (nas aplicações efetuadas, coincidente com estações hidrométricas) objeto de posterior estimativa de escoamento; ii) precipitações mensais ponderadas na bacia hidrográfica definida por essa secção; iii) evapotranspirações potenciais mensais na mesma bacia e iv) conjuntos de valores iniciais dos quatro parâmetros do modelo.

Os parâmetros do modelo são os seguintes:

- TAW capacidade máxima de armazenamento de água no solo; ou capacidade utilizável do solo (L);
- C coeficiente de escoamento ou coeficiente de perdas iniciais, compreendido entre zero e um (adimensional);
- Q_m taxa máxima de infiltração (LT^{-1}) conducente à infiltração máxima num dado intervalo de tempo;
- α coeficiente de descarga ou coeficiente de exaurimento do aquífero (T^{-1}).

A capacidade máxima de armazenamento, TAW , representa a quantidade de água que pode ser armazenada nas camadas superficiais do solo, sendo que valores elevados deste parâmetro tendem a aumentar a água disponível para a evapotranspiração, com consequente diminuição dos escoamentos superficial e total. O reservatório correspondente ao solo (não saturado) é considerado impermeável.

Enquanto houver água disponível, a evapotranspiração real, ET_r , corresponde à evapotranspiração máxima mensal, ET_m , e o armazenamento de água ao fim do mês é:

$$S_{S_i} = S_{S_{i-1}} + P_i - P_{x_i} - ET_{m_i} \quad (2-36)$$

Caso contrário, o armazenamento ao fim do mês é nulo ($S_{S_i}=0$) e a evapotranspiração real é dada por:

$$ET_{r_i} = S_{S_{i-1}} + P_i - P_{x_i} \quad (2-37)$$

O excesso de precipitação é dado pela seguinte expressão:

$$P_{x_i} = \begin{cases} 0, & \text{se } P_i \leq I_{a_i} \\ \frac{(P_i - I_{a_i})^2}{P_i + S_{d_i} - 2I_{a_i}}, & \text{se } P_i > I_{a_i} \end{cases} \quad (2-38)$$

com as perdas iniciais, I_a , dadas por:

$$I_{a_i} = C(TAW - S_{s_{i-1}}) \quad (2-39)$$

em que C tem o significado anteriormente apresentado.

O armazenamento disponível de água no solo no início do mês, S_{d_i} , é calculado por:

$$S_{d_i} = TAW - S_{s_{i-1}} + ET_{m_i} \quad (2-40)$$

O coeficiente de escoamento, C , representa a maior ou a menor contribuição da precipitação para o escoamento superficial direto em função do preenchimento por água da zona não saturada do solo, o qual tem como valor limite máximo de armazenamento, TAW .

Em conformidade com o formalismo adotado no modelo, valores elevados de C conduzem a maiores retenções de água nas camadas superficiais de solo não saturado, sendo que, no limite, C será unitário, o que significa que a precipitação, se suficiente, preencherá toda a zona não saturada, com consequente aumento da evapotranspiração real e diminuição dos escoamentos superficial e total.

A taxa máxima de infiltração, Q_{m_i} , é à máxima quantidade de água infiltrada por unidade de tempo. Valores elevados deste parâmetro conduzem a uma diminuição do escoamento superficial gerado sem que, no entanto, o escoamento total de longo prazo seja afetado pois a parcela infiltrada é restituída em instantes de cálculo posteriores.

O excesso de precipitação, P_{x_i} , tanto pode escoar-se superficialmente, como infiltrar-se no solo. A altura de água infiltrada num dado mês constitui a recarga do aquífero, Q_{r_i} , nesse mês, sendo dada por:

$$Q_{r_i} = Q_{m_i} \frac{P_{x_i}}{P_{x_i} + Q_{m_i}} \quad (2-41)$$

em que Q_{m_i} tem o significado já apresentado.

A componente do excesso de precipitação que não se infiltra constitui o escoamento superficial mensal, dado por:

$$Q_{s_i} = P_{x_i} - Q_{r_i} \quad (2-42)$$

O coeficiente de descarga do aquífero, α , relaciona-se com a taxa com que a água armazenada nos sistemas aquíferos é drenada para a rede hidrográfica, sendo que a variação deste parâmetro não afeta os valores médios do escoamento mas apenas a sua distribuição temporal.

Finalmente, o escoamento total mensal no curso de água corresponde à soma dos escoamentos superficial e subterrâneo, de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{t_i} = Q_{s_i} + S_{sub_i} \quad (2-43)$$

No âmbito da presente dissertação, a aplicação do modelo Temez teve por objetivo uma breve avaliação das disponibilidades hídricas existentes nas bacias hidrográficas que representam os casos de estudo. Para além das aplicações no âmbito da investigação que se apresenta, a estimação dessas disponibilidades é fundamental para equacionar tanto o modo de como “melhorar a contribuição” da albufeira de Poilão para o aumento das disponibilidades hídricas a afetar à rega, como a viabilidade de criar uma nova albufeira em São Domingos, tendo em vista, como objetivo último, a conceção de um modelo de gestão adequado a regiões potencialmente agrícolas, mas com grande escassez de recursos hídricos.

Para tanto, executaram-se as etapas gerais seguidamente apresentadas, sendo que algumas delas foram desenvolvidas com base em procedimentos simplificados:

- a) Identificação dos postos udométricos/estações climatológicas com influência, quer nas bacias hidrográficas objeto de estudo, quer nas sub-bacias correspondentes a estações hidrométricas localizadas nessas bacias e necessariamente dispondo de alguma informação hidrométrica. Anota-se, desde já, que as estações hidrométricas selecionadas foram as de Achada Baleia e Poilão localizadas nas bacias hidrográficas de São Domingos e da Ribeira Seca, respetivamente.
- b) Recolha das amostras de registos disponíveis nas anteriores bacias e sub-bacias hidrográficas, referentes a precipitações e a variáveis climatológicas relevantes para o cálculo da evapotranspiração e para a aplicação do modelo de transformação da precipitação em escoamento.
- c) Recolha de dados de registos de caudais nas anteriores estações hidrométricas tendo em vista a calibração dos parâmetros do modelo de estimação de escoamento e a consequente avaliação desses escoamentos.

Da análise da qualidade e preenchimento de falhas dos dados hidroclimatológicos resultaram amostras de precipitação com dimensão superior a 30 anos, sendo que a dimensão das amostras referentes aos demais dados climáticos e aos dados hidrométricos foi inferior.

A aplicação do modelo de balanço hídrico permitiu a determinação das disponibilidades hídricas passíveis de serem afetadas à beneficiação hidroagrícola das bacias hidrográficas de São Domingos e de Ribeira Seca. Assim e uma vez que as zonas suscetíveis de serem regadas se inserem a jusante das estações hidrométricas optou-se, nesta fase, por proceder à avaliação de escoamentos apenas nas secções daquelas estações, para o que foi adotado um período de tempo muito mais alargado do que aquele em que se dispõe de registos hidrométricos.

O modelo foi aplicado numa base mensal referente ao ano hidrológico que, em Cabo Verde, decorre de junho a maio. Teoricamente, a aplicação do modelo processa-se em conformidade com as duas fases habitualmente adotadas, uma primeira de calibração de parâmetros e uma segunda de validação e otimização. A calibração realiza-se testando, de forma sistemática, conjuntos diferentes de valores dos parâmetros do modelo e comparando os escoamentos que assim se alcançam com os escoamentos observados. Os desvios entre o escoamento observado e o estimado são expressos por meio de uma função objetivo cujo valor tem de ser minimizado (otimização). O modelo com o conjunto de

parâmetros previamente obtido é então validado mediante a sua aplicação aos dados de evapotranspiração e de precipitação no período de validação, seguida da comparação entre os escoamentos estimados e observados nesse mesmo período. O modelo com validade confirmada é finalmente aplicado à estimativa propriamente dita de escoamentos mensais no período objeto de avaliação de escoamento.

No que respeita à aplicação do modelo de Temez, e uma vez que as estações hidrométricas de Achada Baleia e de Poilão apenas possuem registos de caudal médio diário entre julho de 1984 e julho de 1988, utilizou-se tal período para calibrar os parâmetros, a que se seguiu a aplicação do modelo para estimar os escoamentos em falta para o período de 1981/82 a 1983/1984 e de 1988/89 a 2007/08 (anos hidrológicos), com obtenção de uma série contínua de escoamentos mensais entre 1981 e 2008. Face à escassa informação hidrométrica disponível não se procedeu à fase de validação do modelo.

Para averiguar o ajustamento e a adequação do modelo de Temez tendo por base os registos disponíveis utilizaram-se medidas de ajustamento e de erro. Concretamente, com o objetivo de testar a correlação entre escoamentos estimados, \hat{Q}_t , e escoamentos observados, Q_t , recorreu-se ao coeficiente de correlação dado por:

$$r(Q_t, \hat{Q}_t) = \frac{\text{Cov}(Q_t, \hat{Q}_t)}{\sqrt{\text{Var}(Q_t) \text{Var}(\hat{Q}_t)}} \quad (2-44)$$

Este coeficiente, que assim como a covariância, determina a extensão em que a variância dos dados observados pode ser explicada pelo modelo (Pulido–Calvo & Portela, 2007), ou, ainda, a intensidade da relação linear que possa existir entre duas variáveis. Valores do coeficiente próximos da unidade indicam bom ajustamento entre tais variáveis.

Para além do coeficiente de correlação, calcularam-se a raiz quadrada do desvio quadrático médio, *RMSE* (*square root of mean square error*) e o erro absoluto médio *MAE* (*mean absolute error*) de acordo com as equações 2-7 e 2-8 adaptadas às variáveis agora em presença:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{N}} \quad (2-45)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_i - \hat{Q}_i|}{N} \quad (2-46)$$

sendo N o número de valores de Q_t , ou, de modo equivalente, de \hat{Q}_t . O erro absoluto médio é expresso nas mesmas unidades que os dados, sendo semelhante em ordem de grandeza ao *RMSE*, embora ligeiramente inferior.

A medida *BIAS* fornece informação sobre a tendência do modelo para sobrestimar ou subestimar valores de uma variável, consoante o valor de tal indicador é negativo ou positivo, respetivamente sendo dado por (Santos, 2007):

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)}{N} \quad (2-47)$$

O coeficiente de eficiência, E_j , e a variância média relativa, ARV , são utilizados para testar a capacidade de o modelo explicar a variância total dos dados e de representar a 'proporção' da variação dos dados observados considerados pelo modelo (Pulido-Calvo & Portela, 2006) sendo dados por:

$$E_j = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |Q_i - \hat{Q}_i|^j}{\sum_{i=1}^N |Q_i - \bar{Q}|^j} \quad (2-48)$$

$$ARV = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} = 1.0 - E_2 \quad (2-49)$$

onde \bar{Q} representa a média dos valores.

A sensibilidade aos valores discordantes ou *outliers*, devido à consideração do quadrado dos termos da diferença entre valores, encontra-se associada a E_2 , ou, de forma equivalente, a ARV . O coeficiente de eficiência modificado, E_1 , reduz o efeito dos termos ao quadrado. Um valor nulo para E_2 , indica que a média das observações, \bar{Q} , pode ser tão bom estimador como o modelo, enquanto valores negativos indicam que a média das observações é melhor estimador de que o modelo (Legates & McCabe Jr., 1999, *in* Pulido-Calvo & Portela, 2007).

Para um bom ajustamento, os valores de E_j devem ser próximos da unidade e os de ARV , próximos de zero. Uma outra medida de erro ou ajustamento utilizada para analisar o comportamento do modelo foi o índice de ajuste, IOA , (*index of agreement*) que, de acordo com Pielke (1984), se calcula da seguinte forma:

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|\hat{Q}_i - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^2} \quad (2-50)$$

IOA pode ser interpretado como um erro relativo médio: será maior quando o numerador for mais pequeno (previsões próximas dos valores observados), e/ou quando o denominador for grande (elevada variabilidade natural, traduzida pelo desvio-padrão dos valores observados). Na fase de calibração foram consideradas como restrições a não negatividade dos parâmetros e foram impostos limites de variação para os mesmos. Inicialmente foram fixados os intervalos de variação dos valores de dois dos quatro parâmetros do modelo de Temez tendo-se feito variar os valores dos restantes dois.

2.4.2. Coleta e conservação da água

A conservação do solo e da água, nomeadamente com sistemas de *water harvesting* tem sido largamente estudada e aplicada em várias regiões do mundo (Oweis *et al.*, 2004) particularmente nas áridas e semiáridas (Goosen & Shayya, 2000), com resultados significativos do ponto de vista do incremento dos recursos hídricos (Cordery, 2003; Pereira *et al.*, 2009a).

Em situação de escassez, dado a natureza de ocorrência de precipitação, muito aleatória e essencialmente sob a forma de precipitação intensa, a coleta costuma proporcionar uma boa solução de aproveitamento e conservação de água. Há várias formas de coleta de água e Cabo Verde tem a longa tradição nessa prática (Figura 2.14).

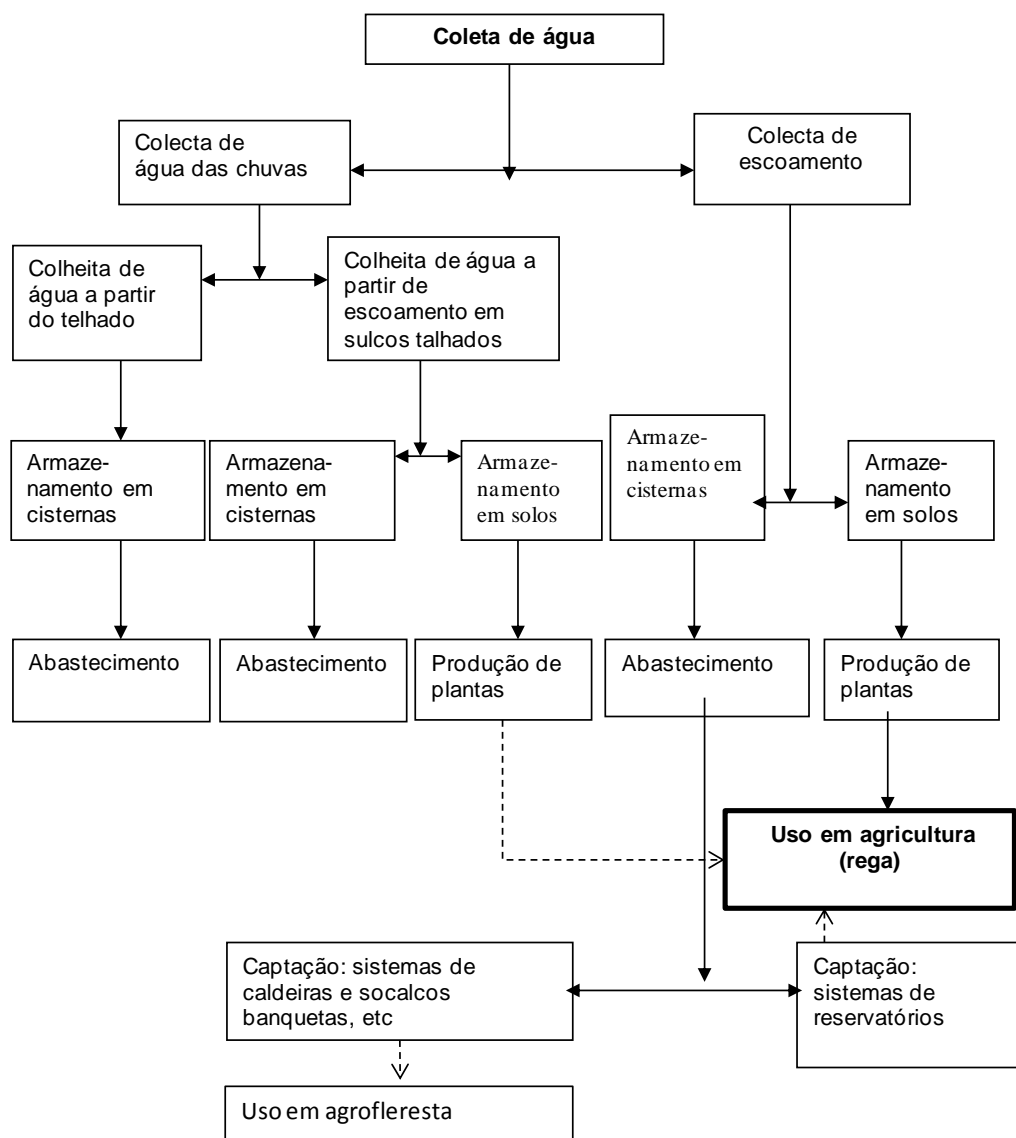


Figura 2.14: Técnicas de coleta de água mais comum em Cabo Verde (adaptado de Gale, 2005).

A coleta de água das chuvas e do escoamento são formas de aproveitamento de precipitação e escoamento. Os sistemas de coleta de água, *water harvesting* ou “agrisystems” são tecnologias desenvolvidas nas regiões áridas e semiáridas destinadas a satisfazer as necessidades em água potável, superar os défices hídricos das culturas e/ou aumentar os rendimentos das culturas existentes ou, ainda, tornar possível a produção onde ela não seria viável sob as condições ambientais prevalecentes. Apesar da aplicação destas tecnologias não ser novidade em Cabo Verde, carece no entanto de estudos que quantifiquem os seus impactos, na recarga dos lençóis subterrâneos (Gale, 2005).

Segundo as técnicas de coleta de água, indicadas em FAO 1991, um sistema de coleta de água é constituído por uma área de captação, geralmente, preparada para aumentar a

eficiência de coleta de escoamento superficial e um reservatório para o armazenamento da água captada (quando esta não for armazenada diretamente no solo) e uma outra área para o crescimento de plantas. Comumente, existem três tipos de sistemas de coleta de água (*water harvesting / runoff farming*): i) derivação da água de uma ribeira para um canal que a introduz nas terras cultivadas nas proximidades - nesse caso podem ser usados terraços, muretes ou outras estruturas para o controle e distribuição posterior da água; ii) espelho de captação, telhado e estradas, entre outras áreas de captação, são preparadas ou tratadas para captar água das chuvas, contribuindo para o alagamento das áreas adjacentes cultivadas ou para armazenamento em reservatórios e posterior uso; e iii) espalhamento (*floodplain* ou *flood water*) de água nas áreas de produção agrícola e respetiva distribuição controlada por um sistema de pequenas barragens, diques e banquetas ou valas (Tadmor *et al*, 1979).

Os resultados de aplicação dos modelos de balanço hídrico e das necessidades hídricas das culturas permitem definir os sistemas de coletas, visando a conservação e poupança de água para produção agrícola.