

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**COMPORTAMENTO DA UMIDADE DO SOLO  
DETERMINADA POR MÉTODOS EXPEDITOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Taise Cristine Buske**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

# **COMPORTAMENTO DA UMIDADE DO SOLO DETERMINADA POR MÉTODOS EXPEDITOS**

**Taise Cristine Buske**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Prof. Adroaldo Dias Robaina**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Buske, Taise Cristine  
Comportamento da umidade do solo determinada por  
métodos expeditos / Taise Cristine Buske.-2013.  
67 f.; 30cm

Orientador: Adroaldo Dias Robaina  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2013

1. Solo 2. Irrigação 3. Conteúdo de água no solo I.  
Robaina, Adroaldo Dias II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Dissertação de Mestrado

**COMPORTAMENTO DA UMIDADE DO SOLO DETERMINADA POR  
MÉTODOS EXPEDITOS**

elaborada por  
**Taise Cristine Buske**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/ Orientador)

**Marcia Xavier Peiter, Dr.<sup>a</sup> (UFSM)**  
(Co-orientador)

**Ana Rita Costenaro Parizi, Dr.<sup>a</sup> (IF Farroupilha)**

**João Fernando Zamberlan, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 18 de fevereiro de 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

A minha família, pelo carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.

A Universidade Federal de Santa Maria, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela possibilidade de realização do Mestrado.

Ao professor e orientador Adroaldo Dias Robaina pela amizade, oportunidade, dedicação e caráter.

A professora Marcia Xavier Peiter pela amizade, ensinamentos e oportunidades oferecidas.

Aos colegas Rogério Torres, Mario Nunes e Fabiano Braga pela ajuda na coleta das amostras de solo e na realização dos procedimentos experimentais.

Ao professor Cícero Nogueira pela disponibilidade em emprestar a estufa.

Ao amigo Geraldo Rodrigues pela ajuda prestada.

As colegas Cibele Soares e Gisele Vivan pela amizade, disponibilidade, e contribuição técnica e pessoal.

Aos colegas Ricardo Rosso e Tonismar Pereira pela amizade e contribuição.

Ao Seu Luis Nunes pela atenção e dedicação com todos.

A todos os colegas e amigos do Laboratório de Hidráulica pelos momentos de descontração e amizade.

A secretária do PPGEA Luciana pela prestatividade e dedicação ao trabalho.

A comissão examinadora pela responsabilidade e empenho na avaliação da Dissertação.

A todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para obtenção do grau de Mestre.

**Muito Obrigada**

“A vida é para quem topa qualquer parada,  
e não para quem para em qualquer topada.”

Bob Marley

# RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

## COMPORTAMENTO DA UMIDADE DO SOLO DETERMINADA POR MÉTODOS EXPEDITOS

AUTORA: TAISE CRISTINE BUSKE  
ORIENTADOR: ADROALDO DIAS ROBAINA  
Santa Maria, 18 de fevereiro de 2013.

O conhecimento da umidade do solo é de fundamental importância, pois indica em que condições hídricas encontra-se o mesmo, podendo auxiliar na redução dos gastos com água e energia elétrica, haja vista que o monitoramento da umidade do solo possibilita aplicações controladas e pontuais de água, respondendo o quanto e quando irrigar em função das necessidades hídricas das culturas. Assim sendo, para a realização da irrigação, a umidade do solo deve ser determinada anteriormente e servirá de parâmetro para a quantidade de água a ser aplicada pelo sistema. Inúmeros são os métodos utilizados para a determinação do conteúdo de água no solo, dessa maneira, o presente trabalho objetivou comparar os resultados de umidade do solo obtidos pelos diferentes métodos expeditos para determinação do conteúdo de água no solo em diferentes classes texturais. O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria. Foram testados quatro métodos (método padrão de estufa, M0; método do forno elétrico, M1, método do forno de micro-ondas, M2; método das pesagens, M3), com três amostras de solo (S1, S2, S3) e três repetições para cada. Foi feita a regressão linear entre os métodos alternativos e o método padrão de estufa, com a finalidade de se obter o coeficiente de correlação ( $r$ ), o coeficiente linear e o coeficiente angular, o índice de concordância de Wilmott ( $I_w$ ) e o índice de desempenho ( $I_d$ ). Através dos resultados obtidos pode-se afirmar que o método do forno elétrico e o método do forno de micro-ondas apresentaram desempenho ótimo quando comparados ao método padrão. O método das pesagens apresentou desempenho bom e muito bom. Também concluiu-se que o tempo de 20 minutos para o método do forno elétrico foi eficiente, significando redução no tempo para determinação da umidade. Para o método do forno de micro-ondas o tempo de 5 minutos de secagem foi suficiente, não diferindo estatisticamente do método padrão. O método das pesagens também se mostrou confiável na determinação da umidade do solo. Portanto, existe a possibilidade de usar os métodos alternativos para a determinação da umidade do solo.

**Palavras-chave:** Solo. Irrigação. Conteúdo de água no solo.

# **ABSTRACT**

Masters Dissertation  
Agricultural Engineering Post Graduation Program  
Santa Maria Federal University, RS, Brazil

## **BEHAVIOR OF SOIL MOISTURE DETERMINED BY RAPID METHODS**

Author: Taise Cristine Buske  
Advisor: Adroaldo Dias Robaina  
Santa Maria, 18 february 2013.

The knowledge of soil moisture is quite important because it indicates soil hydric conditions and it can help on saving water and electric energy, given that monitoring of soil moisture allows controlled and timely applications of water pointing out how much and when to irrigate, according to the crop water requirements. Therefore, soil moisture should be determined before the irrigation and will serve as a parameter for the amount of water to be applied by the system. There are any methods used for determination of soil water content, in this way, the present study aimed to compare the results of soil moisture obtained by different methods for expeditious determination of the water content of the soil in different textural classes. The study was conducted in the "Laboratório de Hidráulica Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria". Four methods were tested (standard method, M0; electric oven method, M1, microwave oven method, M2; weighing method, M3) with three soil samples (S1, S2, S3) and three repetitions for each. The linear regression was made between the standard method and alternative methods, for obtaining the correlation coefficient ( $r$ ), the linear coefficient and the slope, the Wilmott concordance index ( $I_w$ ) and Performance Index ( $I_d$ ). From the results obtained can be stated that the electric oven method and the microwave oven method have excellent performance when compared to the standard method. The method of weighing presented a performance good and very good. In addition, it was concluded that the 20 minutes period for the electric oven method was efficient signifying a time reduction for the moisture content determination. For the microwave oven method the 5 minute drying period was sufficient and did not differ statistically from the standard method. The method of weighing was also reliable in determining soil moisture. Therefore, it is possible to use alternative methods to determine the soil moisture.

**Keywords:** Soil. Irrigation. Soil water content.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do solo como sistema trifásico. ....	17
Figura 2 - Triângulo para determinação das classes texturais de solos, em função das porcentagens de areia, silte e argila. ....	19
Figura 3 - Estufa de secagem de amostras. ....	28
Figura 4 - Esquema de funcionamento do forno de micro-ondas. ....	30
Figura 5 - Limites de disponibilidade de água no solo para as plantas. ....	35
Figura 6 - Variação da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e da água disponível em função da textura do solo. ....	37
Figura 7 - Fluxograma do procedimento experimental. ....	41
Figura 8 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método do forno elétrico para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S1.46	
Figura 9 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método do forno elétrico para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S2.47	
Figura 10 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método do forno elétrico para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S3.47	
Figura 11 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método do forno de micro-ondas para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S1. ....	51
Figura 12 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método do forno de micro-ondas para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S2. ....	52
Figura 13 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método do forno de micro-ondas para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S3. ....	52
Figura 14 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método das pesagens em todos os percentuais de umidade do S1. ....	57
Figura 15 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método das pesagens em todos os percentuais de umidade do S2. ....	57
Figura 16 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtidos através do método da estufa e o método das pesagens em todos os percentuais de umidade do S3. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de densidade do solo considerados restritivos ao crescimento radicular das culturas agrícolas.....	22
Tabela 2 - Localização dos solos estudados.....	38
Tabela 3 - Critério de interpretação dos valores do índice desempenho e as respectivas classes de desempenho.....	43
Tabela 4 - Características físicas dos solos estudados.....	44
Tabela 5 - Valores de umidade gravimétrica (%) obtidos com o método padrão (M0) e o método do forno elétrico (M1) nos tempos de secagem de 20, 25 e 30 minutos para os diferentes percentuais de umidade gravimétrica estabelecidos. ....	49
Tabela 6 - Valores do coeficiente de determinação, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student e a significância do teste, ao nível de 95% de probabilidade, para os solos estudados na comparação entre o método da estufa e o método do forno elétrico. ....	50
Tabela 7 - Valores de umidade gravimétrica (%) obtidos com o método padrão (M0) e o método do forno de micro-ondas (M2) nos tempos de secagem de 5, 10, 15 e 20 minutos para os diferentes percentuais de umidade gravimétrica estabelecidos.....	54
Tabela 8 - Valores do coeficiente de determinação, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student e a significância do teste, ao nível de 95% de probabilidade, para os solos estudados na comparação entre o método da estufa e o método do forno de micro-ondas. ....	55
Tabela 9 - Valores de umidade gravimétrica (%) obtidos com o método padrão e o método das pesagens para os diferentes percentuais de umidade gravimétrica estabelecidos.....	58
Tabela 10 - Valores do coeficiente de determinação, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student e a significância do teste, ao nível de 95% de probabilidade, para os solos estudados na comparação entre o método da estufa e o método das pesagens.....	59
Tabela 11 - Valores do coeficiente de correlação “r”, índice de concordância “lw”, índice de desempenho “ld” e classe de desempenho para os métodos estudados.....	60

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 A água no solo.....	13
2.2 Irrigação e manejo da irrigação .....	14
2.3 Caracterização físico-hídrica do solo.....	16
2.3.1 Textura do solo.....	18
2.3.2 Estrutura do solo .....	20
2.3.3 Densidade do solo.....	21
2.3.4 Densidade dos sólidos do solo.....	22
2.3.5 Conteúdo de água no solo .....	23
2.3.5.1 Umidade do solo a base de massa – Umidade Gravimétrica.....	24
2.3.5.2 Umidade do solo a base de volume – Umidade Volumétrica .....	24
2.4 Determinação do teor de água no solo .....	25
2.5 Métodos para determinação do teor de água no solo.....	26
2.5.1 Métodos gravimétricos .....	26
2.5.1.1 Método padrão de estufa.....	26
2.5.1.2 Método do forno elétrico.....	28
2.5.1.3 Método do forno de micro-ondas.....	29
2.5.1.4 Método das pesagens .....	33
2.6 Disponibilidade de água no solo .....	35
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1 Localização e realização dos experimentos .....	38
3.2 Coleta e preparação do material .....	38
3.3 Análise física dos solos.....	39
3.4 Aparelhagem experimental.....	40
3.5 Procedimento experimental .....	40
3.6 Análise dos dados.....	42
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
4.1 Características físicas dos solos.....	44
4.2 Comparações entre os diferentes métodos.....	45
4.2.1 Método padrão (M0) x Método do forno elétrico (M1) .....	46
4.2.2 Método padrão (M0) x Método do forno de micro-ondas (M2) .....	51
4.2.3 Método padrão (M0) x Método das pesagens (M3).....	56
4.2.4 Avaliação do desempenho dos métodos.....	60
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Na agricultura, a irrigação é fundamental por eliminar o risco de deficiência hídrica nos cultivos, aumentar a produtividade, garantir a produção de alimentos e otimizar o uso da terra. A água é um fator fundamental na produção vegetal, sendo que qualquer cultura durante seu ciclo de desenvolvimento consome grande volume de água. Para uma adequada aplicação de água via irrigação é necessário adotar um adequado manejo, seja ele via solo, clima ou planta. O manejo via solo é bastante preciso, pois permite determinar a percentagem de água no mesmo.

Sendo que o solo comporta-se como reservatório dessa água, armazenando-a temporariamente e fornecendo-a as plantas à medida de suas necessidades. Assim, a produtividade agrícola está intimamente relacionada à dinâmica da água no solo e em especial aos atributos físicos que afetam a relação solo-água.

O conhecimento da água disponível no perfil do solo é um fator de grande relevância nas atividades agrícolas, pois além de manter abastecido o lençol freático é indispensável no desenvolvimento das culturas. Pois a frequência da irrigação vai depender da quantidade de água armazenada no solo.

Sabe-se que a água disponível no perfil do solo é altamente variável no tempo e no espaço, sendo estas variações funções dos diferentes tipos de solos e da consequente diversidade de suas características físico-hídricas. Neste sentido, considerando a influência das características inerentes ao perfil do solo na retenção e disponibilidade de água as plantas faz-se necessário uma busca por informações e técnicas adequadas ao melhor manejo da água no solo, garantindo condições de maximizar a eficiência da atividade agrícola.

O conhecimento da umidade do solo é de fundamental importância, pois indica em que condições hídricas encontram-se o mesmo podendo auxiliar na redução dos gastos com água e energia elétrica, haja vista que o monitoramento da umidade do solo possibilita aplicações controladas e pontuais de água, respondendo o quanto e quando irrigar em função das necessidades hídricas das culturas, sendo cada vez mais fundamental na agricultura. Ao conhecer a quantidade de água disponível no solo, o produtor rural pode irrigar somente quando for necessário. Assim sendo, para a realização da irrigação, a umidade do solo deve ser

determinada anteriormente e servirá de parâmetro para a quantidade de água a ser aplicada pelo sistema.

Inúmeros são os métodos utilizados para a determinação do conteúdo de água no solo, entre os mais utilizados está o método da estufa (padrão) que tem como principal inconveniente a demora no tempo de resposta (24 horas), além da necessidade de utilização de estufa e balança de precisão. Sendo que para o manejo da irrigação é necessário uma determinação rápida do teor de água no solo, portanto, uma desvantagem do método gravimétrico padrão.

Por isso um grande número de métodos foram propostos para uma rápida determinação da umidade, dentre eles destacam-se o método do forno micro-ondas e o método do forno elétrico. Estes métodos alternativos variam entre si em função da fonte de calor utilizada para a eliminação do conteúdo de água da amostra de solo. Outro método expedito para a determinação da umidade do solo a campo é o método das pesagens, também conhecido como método do balão volumétrico. As principais vantagens desses métodos são a significativa redução no tempo de secagem e possibilidade de ser empregado diretamente no campo.

Dessa maneira, o presente trabalho objetiva comparar os resultados de umidade do solo obtidos pelos diferentes métodos expeditos para determinação do conteúdo de água no solo em diferentes classes texturais.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo se dedica a uma revisão sucinta dos principais assuntos que fundamentaram este trabalho, através dos quais, foi possível conhecer as formas com que os parâmetros utilizados nesta pesquisa vêm sendo conduzidos pelos autores.

### **2.1 A água no solo**

Água, líquido incolor, inodoro e insípido, condicionante a presença de vida em qualquer lugar no planeta, quer para o consumo, quer para manter condições ambientais de sobrevivência.

De toda a água existente no mundo apenas em torno de 2,5% é doce, sendo que o homem tem acesso a apenas 0,001% desse total, pois parte está congelada e parte em reservas subterrâneas (ALBUQUERQUE e DURÃES, 2008).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, lei nº 9433 de 8 de janeiro de 1997, prevê que a água é um bem de domínio público, dotado de valor econômico, com uso prioritário para o consumo humano e dessedentação animal, e ainda a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar os usos múltiplos da água.

A água é fator fundamental na produção vegetal, sua falta ou excesso afeta de maneira decisiva o desenvolvimento das plantas e, por isso, seu manejo racional é importante na maximização da produção de alimentos. Além da sua participação na constituição celular e nos diversos processos fisiológicos na planta, ela está diretamente relacionada aos processos de absorção de nutrientes e resfriamento da superfície vegetal.

A crescente demanda de água para os diversos fins, tem tornado o manejo de água um problema complexo em todo o mundo. Sendo de significativa importância obter-se a maior eficiência possível no uso da água pelas culturas. Em regiões onde a chuva é suficiente, geralmente existem problemas de sua distribuição que acarretam a existência de períodos de falta de água (REICHARDT, 1978). Nas

regiões sul e centro-sul, a precipitação pluvial geralmente supre as necessidades da agricultura. Problemas de sua distribuição, porém, podem ser fatais em muitas ocasiões. No Rio Grande do Sul, irrigações suplementares são necessárias no período primavera-verão, devido à alta demanda evaporativa que ocorre nos meses de dezembro a fevereiro, tornando-se insuficiente para atender as exigências hídricas das culturas (BERLATO, 1992), principalmente nos estádios de floração e enchimento de grãos.

O principal reservatório de água é o solo que, temporariamente, armazena água, podendo fornecê-la às plantas à medida de suas necessidades. Como a recarga deste reservatório é inconstante, o volume disponível às plantas é variável (REICHARDT, 1985). O esgotamento deste reservatório por uma cultura exige sua recarga artificial, que se dá através do uso da irrigação.

## **2.2 Irrigação e manejo da irrigação**

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), no Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2012, a irrigação responde por 72% da água consumida no Brasil. A importância do setor no uso da água do País também se reflete no percentual das outorgas de direito de uso de recursos hídricos emitidas pela ANA, totalizando 57,2%.

Desta forma, a definição do manejo racional deve ser imprescindível na prática da irrigação, pois possibilita otimizar as produtividades e a eficiência do uso da água e minimizar os custos de investimentos e manutenção dos sistemas de rega, mantendo o solo e a cultura em condições fitossanitárias desejáveis, diminuindo o impacto ambiental. Visto que, o manejo correto da água é ponto fundamental em uma agricultura sustentável.

A irrigação pode ser realizada por diferentes métodos: aspersão, localizada, superfície e subterrânea. Com relação à escolha do método de irrigação, não existe um melhor que o outro, e sim o que mais se adapta a cada situação em particular. Existem vantagens e limitações no emprego de cada um deles. Para a escolha do método adequado de irrigação, alguns aspectos devem ser considerados, como a

disponibilidade e qualidade da água, energia e mão-de-obra despendida, a topografia e o tipo de solo, o custo de implantação, o clima e a cultura.

Segundo Mantovani et al. (2009), mesmo considerando a melhoria dos sistemas modernos de irrigação, com maior eficiência de distribuição da água nas mais diversas situações, a falta de um programa de manejo pode levar tudo a perder, seja pela aplicação de água em excesso (mais comum) ou pela sua falta, antes ou depois do momento adequado em cada fase da cultura, nas situações vigentes. Peiter et al. (1999) relatam que existem três aspectos que devem ser considerados na programação das estratégias de irrigação: o momento apropriado da aplicação, a quantidade necessária em cada aplicação e o consumo total de água da cultura durante o seu ciclo.

O manejo de irrigação é o processo para decidir quando irrigar as culturas e quanto aplicar de água. Esse é o único meio para otimizar a produção agrícola e conservar a água, além de ser a chave para melhorar o desempenho e a sustentabilidade de sistemas de irrigação (SOARES, 2010).

Sendo que para o manejo de água de irrigação se proceder dentro de um critério racional, é necessário um controle diário de umidade do solo, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (PARIZI, 2007). Para tanto o manejo ou monitoramento da irrigação pode ser realizado via planta, solo, clima, ou pela associação destes, só deste modo pode-se determinar o momento oportuno de promover a irrigação e a quantidade de água a ser aplicada. Conforme James (1988) existem diferentes procedimentos que podem ser adotados como critérios apropriados para realização do manejo da água de irrigação, sendo a maioria baseada em medidas do "status" da água em um ou mais componentes do sistema solo-planta-atmosfera.

O manejo via planta pode ser realizado por meio de avaliações do estado hídrico da cultura, como os métodos que avaliam: temperatura foliar, potencial de água nas folhas, resistência estomática, grau de turgescência das plantas, fluxo de seiva, diâmetro do caule. Estes métodos são promissores, entretanto, devido à complexidade envolvida e também a falta de informações mais específicas, eles ainda não tem sido usados em grande escala (JAMES, 1988; PIRES, et al. 1999).

Segundo os autores citados acima, o manejo da irrigação via clima pode ser realizado pela reposição da água consumida pela cultura desde a última irrigação, ou ainda, por meio do balanço hídrico. O balanço hídrico considera todos os fluxos



de água que entram e saem do volume de solo explorado pelas raízes. A irrigação, a precipitação e a ascensão capilar são as componentes de entrada no balanço hídrico e as perdas por percolação profunda, escoamento superficial e consumo de água pelas plantas são as componentes de saída.

Ainda, segundo James (1988) o manejo de irrigação via solo considera a umidade do solo onde o sistema radicular da cultura está se desenvolvendo, ou seja, na profundidade efetiva do sistema radicular. Existem vários métodos e instrumentos que podem ser utilizados, dentre eles: gravimétrico, sonda de nêutrons, TDR, blocos de gesso, tensiômetros, entre outros (PIRES et al., 1999). Segundo Parizi (2007) o método gravimétrico é um método direto e bastante preciso, mas demanda muita mão-de-obra e necessita de determinações periódicas no campo e equipamentos como, balança de precisão e estufa.

Albuquerque e Durães (2008) relatam que, de uma forma geral, utilizam-se dados de solo-água para indicar o momento de irrigar, e dados de clima e planta para determinar a lâmina de água a aplicar. Novos instrumentos tem permitido mais precisão na quantificação de parâmetros físico-hídricos do solo. Contudo, há ainda a necessidade de desenvolvimento e melhoria de metodologias para a determinação desses parâmetros, sobretudo a campo. Ainda segundo Albuquerque e Durães (2008), no Brasil as irrigações são, geralmente, suplementares às chuvas e a determinação da precipitação efetiva requer o conhecimento de características físico-hídricas dos solos.

### **2.3 Caracterização físico-hídrica do solo**

O solo pode ser definido, fisicamente, como um sistema trifásico (Figura 1), em que a fase sólida é constituída pelas partículas que compõem a matriz do solo, a fase líquida é constituída pela água e a fase gasosa pelo ar e pelo vapor de água. Segundo Bernardo et al. (2006) o volume de sólidos pode ser considerado praticamente fixo, enquanto os gases e a solução (água e nutrientes) dividem o espaço poroso do solo. Se a quantidade de solução ou a umidade do solo aumentarem, diminui a quantidade de gases, e vice-versa.

Na realidade, o solo pode ser considerado um grande reservatório, cuja quantidade de água armazenada varia com a umidade. Segundo Kaiser (2010) o solo é o armazenador de água para as plantas e ajuda a regular o ciclo hidrológico no ambiente. É na água do solo que estão dissolvidos a grande maioria dos nutrientes essenciais as plantas. A capacidade do solo reter e armazenar água está diretamente ligada as suas características pedogenéticas (textura e mineralogia) e estruturais (distribuição de poros).

Para o manejo da irrigação é necessário que sejam conhecidas algumas das propriedades físicas e físico-hídricas do solo, sendo que as principais são a composição textural, a porosidade do solo, a densidade do solo e a densidade de partículas.

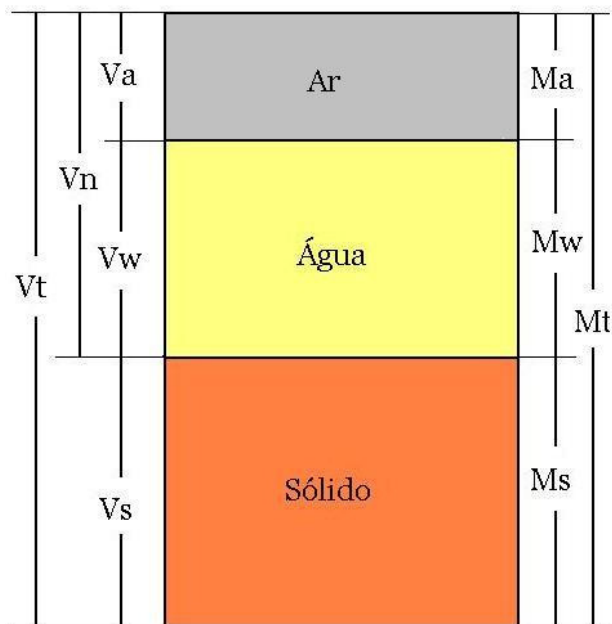


Figura 1 – Esquema do solo como sistema trifásico.

Fonte: [www.fag.edu.br/professores/csordi/IRRIGACÃO PARTE1.ppt](http://www.fag.edu.br/professores/csordi/IRRIGACAO_PARTE1.ppt)

Onde:  $V_t$  é o volume total,  $V_a$  é o volume de ar,  $V_w$  é o volume de água,  $V_s$  é o volume de sólidos,  $V_n$  é a porosidade total,  $M_t$  é a massa total,  $M_a$  é a massa de ar (desprezível),  $M_w$  é a massa de água,  $M_s$  é a massa de sólidos do solo.

Uma vez introduzido o conceito de que o solo é um sistema trifásico, o enfoque agora será à fase sólida, que realmente caracteriza o solo, quando comparada com as demais.

### 2.3.1 Textura do solo

A textura diz respeito à distribuição, por tamanho, das partículas sólidas que compõem o solo. Tradicionalmente, as partículas de solo são divididas em classes texturais, a saber, areia, silte (ou limo) e argila (ALBUQUERQUE e DURÃES, 2008). A conjugação da textura com outras características do solo está intimamente relacionada à estrutura, consistência, permeabilidade, capacidade de troca de cátions, retenção de água e fixação de fosfatos (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2005). Portanto, conferindo à textura grande significância.

Segundo Kaiser (2010) a textura é uma propriedade empregada na classificação dos solos e vem sendo utilizada pelo Ministério da Agricultura na definição do Zoneamento Agrícola de riscos climáticos. As principais propriedades e processos físicos afetados pela textura são: a densidade do solo, a porosidade, aeração, infiltração e retenção de água, consistência, suscetibilidade à compactação, suscetibilidade a erosão.

A textura apresenta uma grande variabilidade espacial e pequena variação temporal, não sendo alterada, considerando curtos espaços de tempo, pois é inerente ao solo e determina, em grande parte, o valor econômico da área. Conforme Schneider et al. (2007) a textura é uma das características mais estáveis do solo, e a maioria das propriedades morfológicas, físicas e químicas do solo estão relacionadas com esta. Segundo Klein (2008) solos com maior teor de argila, em função das suas propriedades químicas e físicas, são melhores para fins agrícolas. Isto porque a tendência é que solos mais argilosos apresentem uma maior quantidade de água disponível, enquanto que os mais arenosos, por serem menos porosos e apresentarem menor área superficial de suas partículas, retêm menor quantidade de água.

A textura é estudada por meio da análise granulométrica do solo, a qual permite classificar os componentes sólidos em classes de acordo com seus

diâmetros. Conforme Reichardt (1985), cada solo recebe uma designação referente à sua textura, designação esta que nos dá uma ideia do tamanho das partículas mais frequentes. A correlação entre tais análises e a denominação das classes é apresentada no triângulo textural (Figura 2).

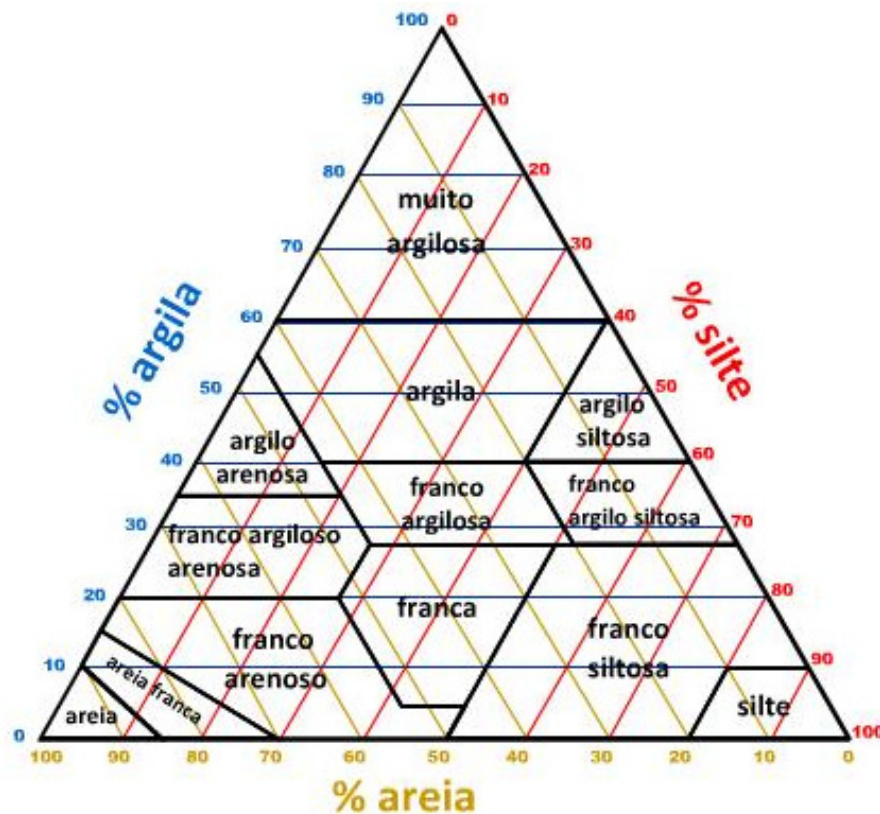


Figura 2 – Triângulo para determinação das classes texturais de solos, em função das porcentagens de areia, silte e argila.

Fonte: <http://w3.ufsm.br/msrs/index.php/triangulo-textural-de-solos>

A análise granulométrica pode ser realizada pelo método da pipeta, em que o princípio do método baseia-se na velocidade de queda das partículas que compõem o solo, e pelo método do densímetro, que se baseia na determinação indireta da velocidade de sedimentação a partir da verificação da densidade das partículas que compõem o solo, ambos procedimentos descritos em EMBRAPA (1997).

Segundo Klein (2008), solos de textura arenosa possuem teores de areia superiores a 70% e de argila inferior a 15%, são permeáveis, leves, de baixa

capacidade de retenção de água e de baixo teor de matéria orgânica. Solos de textura média apresentam certo equilíbrio entre os teores de areia, silte e argila, normalmente apresentam boa drenagem, boa capacidade de retenção de água e índice médio de erodibilidade. Já solos de textura argilosa são solos com teores de argila superiores a 35%, possuem baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água. Embora sejam mais resistentes à erosão, são altamente suscetíveis a compactação, o que exige cuidados especiais no seu preparo, principalmente no que diz respeito ao teor de umidade, visto que o solo deve estar com a consistência friável.

É igualmente importante conhecer a disposição das partículas do solo, ou seja, a estrutura do solo. Pois a textura e a estrutura do solo influenciam na quantidade de ar e de água que as plantas em crescimento podem obter.

Diferentemente da textura, a estrutura é altamente dinâmica, podendo variar muito ao longo do tempo, em virtude das mudanças nas condições naturais ou nas práticas de manejo do solo (ALBUQUERQUE E DURÃES, 2008).

### 2.3.2 Estrutura do solo

Estrutura refere-se ao arranjo das partículas do solo *in situ*, ou seja, como as partículas do solo estão agrupadas em condições de campo. A estrutura define também a geometria do espaço poroso do solo (REICHARDT, 1985). Como não existe um método prático para medir a estrutura empregam-se outros parâmetros do solo, como densidade, porosidade, distribuição de poros e dos agregados e estabilidade dos agregados, entre outros, para então definir sua estrutura (ALBUQUERQUE e DURÃES, 2008).

Do ponto de vista agrícola, a estrutura é uma característica dinâmica de fundamental importância no comportamento do solo. Por ela condicionar a porosidade do solo, influencia fatores de crescimento como suprimento de água, aeração e resistência à penetração de raízes (SCHNEIDER et al., 2007). Sabidamente, solos bem agregados possuem maior porosidade do que solos pobres em agregação, o que resulta numa mais rápida penetração e percolação da água da chuva ou irrigação, além de favorecer a troca gasosa entre o solo e a atmosfera.

A porosidade é a fração volumétrica do solo ocupada com ar e água, representando o local onde circulam a solução e o ar. Normalmente é expressa em percentual (%) e acredita-se que entre os solos ela varie de 30 a 60%, em função da textura e estrutura dos mesmos (KLAR, 1991). Quando todo o espaço é ocupado pela água, o solo é denominado saturado, quando ocupado pelo ar, o solo é denominado seco (REICHARDT, 1978). A porosidade é também uma propriedade física muito alterada pelo manejo do solo, sendo afetada pela compactação do mesmo.

A porosidade total do solo pode ser fragmentada em microporosidade, também denominada porosidade capilar, e macroporosidade, ou porosidade de aeração (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2005). O ideal é que a macroporosidade corresponda a 1/3 do volume dos poros, e a microporosidade aos outros 2/3. A porosidade está diretamente ligada a infiltração de água no solo, retenção de água, drenagem do solo, aeração do solo e crescimento das raízes. Para determinar a porosidade total do solo é necessário que tenham sido determinadas a densidade de partículas e a densidade do solo (KLEIN, 2008).

### 2.3.3 Densidade do solo

A densidade do solo é definida como sendo o quociente da massa de sólidos pelo volume, e é afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume de poros. Essas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água as plantas e a resistência do solo a penetração (KLEIN, 2008).

Dentre os métodos para determinação da densidade do solo tem-se o método do anel volumétrico, que utiliza amostra de solo com estrutura indeformada e o anel de Kopecky. Outros métodos são o da proveta, e o método do torrão, este feito com parafina fundida (EMBRAPA, 1997).

A densidade do solo difere da densidade de sólidos por considerar o arranjo das partículas, isto é, o espaço poroso do solo. Visto que, para um solo com a mesma densidade de sólidos, quanto maior for a porosidade, menor será a

densidade. Segundo Albuquerque e Durães (2008) a compactação do solo, causada pelo uso intensivo de máquinas agrícolas, diminui o espaço poroso, aumentando, portanto, a densidade do solo e assim, afetando a capacidade de retenção e o movimento de água no solo. Além de dificultar o crescimento das raízes das plantas, comprometendo o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas. Segundo Carlesso e Zimmermann (2005), a densidade do solo é importante na irrigação porque possibilita a transformação do conteúdo gravimétrico da água no solo em altura de lâmina de irrigação.

Conforme Kaiser (2010), atualmente a pesquisa tem definido alguns valores de densidade do solo que são considerados restritivos ao crescimento das raízes das culturas agrícolas, variando conforme a classe textural do solo (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores de densidade do solo considerados restritivos ao crescimento radicular das culturas agrícolas.

<b>Classe textural</b>	<b>Densidade do solo (g.cm<sup>-3</sup>)</b>
Argiloso	1,30 – 1,40
Franco argiloso	1,40 – 1,50
Franco arenoso	1,70 – 1,80
Franco siltoso	1,56

#### 2.3.4 Densidade dos sólidos do solo

A densidade dos sólidos, também denominada de “densidade de partículas”, corresponde ao quociente da massa pelo volume seco, considerando-se apenas a matriz do solo, sem considerar o seu arranjo e estrutura. É uma característica específica do solo e varia de acordo com a composição do solo, não podendo ser alterada pelo manejo do solo.

$$Densidade\ de\ sólidos = \frac{massa\ seca\ de\ sólidos}{volume\ de\ sólidos} \quad (1)$$

A densidade de partícula pode ser expressa em  $\text{g cm}^{-3}$ ,  $\text{Kg dm}^{-3}$ ,  $\text{Kg m}^{-3}$ ,  $\text{Mg m}^{-3}$ . Ao contrário da densidade do solo, a amostra utilizada pode ser deformada. Para a determinação do volume de determinada massa de sólidos secos existem vários métodos, sendo um deles o método dos balões volumétricos. Nos balões de 50 mL, é colocado 20 g de solo seco em estufa a  $105^\circ\text{C}$ , sendo o volume preenchido com álcool etílico. Pela diferença entre o volume do balão e o volume de álcool adicionado obtém-se o volume ocupado pelos sólidos (EMBRAPA, 1997).

Nos solos os valores da densidade de partícula variam, em média, entre os valores de 2,3 a  $3,0 \text{ g cm}^{-3}$ , variação essa em função da composição mineralógica do solo (KAISER, 2010). Para as condições de solos tropicais e subtropicais pode-se assumir como densidade média dos sólidos valores próximos de  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$  (megagrama por metro cúbico), em função da composição média (KLEIN, 2008; BRADY, 1989). Os solos com baixos teores de óxidos de ferro apresentam densidade de partículas próximo a  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto que solos altamente intemperizados e ricos em óxidos de ferro apresentam valores de densidade de partículas próximo a  $3 \text{ g cm}^{-3}$ . Os solos orgânicos apresentam densidade de partículas próximo a  $1,92 \text{ g cm}^{-3}$ .

Tendo compreendido acerca da fração sólida, o enfoque agora será para as outras frações que compõem o sistema trifásico do solo.

### 2.3.5 Conteúdo de água no solo

O conteúdo de água no solo é a quantidade de água armazenada até uma dada profundidade do solo, geralmente, a profundidade efetiva do sistema radicular. Pode ser obtido pela relação entre o volume de água e o volume de solo (umidade volumétrica) ou pela relação entre a massa de água e a massa de solo (umidade gravimétrica). Os resultados são comumente mostrados como percentagens, se a umidade não for apresentada dessa maneira, é necessário expressar se ela foi determinada à base de peso ou de volume. Esse é um parâmetro importante no dimensionamento de sistemas e no manejo da irrigação.



### 2.3.5.1 Umidade do solo a base de massa – Umidade Gravimétrica

É a relação entre a quantidade de água contida num solo ou substrato e a sua massa de sólidos secos (KLEIN, 2008). De maneira prática, uma amostra de solo é pesada úmida e seca em estufa (105°C) até massa constante, pesando-a novamente, obtendo-se a massa de sólidos secos. É expressa pela seguinte equação, em  $\text{Kg.Kg}^{-1}$ :

$$\text{Umidade gravimétrica} = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de sólidos secos}} \quad (2)$$

$$\text{Umidade gravimétrica} = \frac{\text{massa de solo úmido} - \text{massa de solo seco}}{\text{massa de sólidos secos}} \quad (3)$$

Segundo Klar (1991), nesse sistema não se considera o volume do solo e, conseqüentemente, a estrutura pode ser destruída.

Como a massa do solo por unidade de área ou volume varia de acordo com a densidade do solo, o teor de água a base de massa não serve como indicativo do volume de água armazenado e passível as plantas. Para que isso seja possível determina-se o teor de água a base de volume.

### 2.3.5.2 Umidade do solo a base de volume – Umidade Volumétrica

Para transformar a umidade do solo a base de massa para umidade do solo a base de volume utiliza-se uma relação matemática que determina que o produto da multiplicação dos valores da umidade gravimétrica pela densidade do solo, dividido pela densidade da água, origina a umidade a base de volume, expressa em  $\text{m}^3$  de água/ $\text{m}^3$  de solo,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $\text{mm}^3/\text{mm}^3$ , conforme Klein (2008). A importância dessa explicação é que as plantas exploram um volume de solo, no qual existirá um volume de água.

$$Umidade\ volumétrica = \frac{umidade\ gravimétrica \times densidade\ do\ solo}{densidade\ de\ água} \quad (4)$$

## 2.4 Determinação do teor de água no solo

A determinação do teor de água no solo é fundamental em várias situações na agricultura, e é imperativa para definir o momento de operações mecanizadas e controlar o correto manejo da irrigação. Nesse sentido, a rapidez na determinação do teor de umidade é importante para que as decisões possam ser tomadas de forma rápida.

Segundo Albuquerque e Durães (2008) a medição do teor de água no solo em condições de campo é difícil de ser realizada, por conta de uma série de fatores, tais como: o crescimento desigual das plantas e a desuniformidade da distribuição do sistema radicular; diferenças em características de infiltração; a variabilidade do solo com relação à estrutura, à estratificação e à textura; mudanças na densidade do solo, variação do volume de poros e da distribuição de tamanho de poros; desigualdades no relevo; desuniformidade inerente à irrigação. Portanto, o teor de água no solo está sujeito a variabilidade temporal, uma vez que o sistema solo-água é dinâmico, tanto no perfil do solo quanto na área (ALBUQUERQUE e DURÃES, 2008).

As variações espaciais dos mais diversos atributos físicos condicionam a distribuição de água no solo e conseqüentemente o rendimento das culturas. Assim, a medição da umidade do solo é essencial para a pesquisa e entendimento do comportamento de distribuição da água no mesmo (SIQUEIRA, 2006).

Devido à importância da água no desenvolvimento das plantas e suas implicações em várias propriedades do solo, a determinação do seu teor sempre foi de grande interesse, tanto no aspecto científico como no econômico.

Vários métodos e técnicas são utilizados para a determinação do teor de água no solo, algumas demoradas, outras caras e, ainda, algumas bastante imprecisas em função da condição do solo, segundo Klein (2008). Mantovani et al. (2009) destaca ainda que as principais diferenças entre os métodos resumem-se a forma de medição, local de medição, instalação, preço, tempo de resposta e, operacionalidade no campo.

## 2.5 Métodos para determinação do teor de água no solo

Existem métodos diretos e indiretos de determinação da umidade do solo. Dentre os métodos diretos (que permitem a determinação direta da umidade do solo), o gravimétrico é o mais utilizado, e é o método-padrão para calibração dos métodos indiretos. Como métodos alternativos ao método convencional existem o método do forno micro-ondas, o método do forno elétrico e o método das pesagens.

Os principais métodos indiretos (que se baseiam nas propriedades físicas e químicas dos solos, que estão estreitamente relacionadas ao conteúdo de água) baseiam-se em medidas como a moderação de nêutrons, a resistência do solo à passagem de corrente elétrica, a constante dielétrica do solo e a tensão da água no solo. Essas são características do solo que variam com a sua umidade. Grande parte destes métodos requer calibração (HILLEL, 1980; LIBARDI, 1995).

### 2.5.1 Métodos gravimétricos

Esses métodos se baseiam na determinação do conteúdo de água no solo através da pesagem de amostras de solo antes e após sofrerem um processo de secagem ou saturação da amostra.

#### 2.5.1.1 Método padrão de estufa

O método considerado padrão é a extração de água de uma amostra de solo por meio de calor, utilizando-se estufas elétricas, determinando-se, assim, a umidade gravimétrica do solo pela relação entre a massa de água e a massa de solo seco (KLEIN, 2008). Conforme Righes et al. (2003) é um método destrutivo, direto e muito preciso.

Este método consiste em retirar amostras do solo com trado, enxadão ou outro instrumento, atentando-se para que as amostras de diferentes horizontes e/ou

profundidades não sejam misturadas durante a retirada. Segundo Albuquerque e Durães (2008) as amostras são retiradas em vários locais e profundidades no campo, podendo ser amostras simples ou compostas. Podem, ainda, ser deformadas (com alteração de sua estrutura natural de campo), por meio da utilização de trados comuns, ou podem ser amostras não deformadas (sem alteração de sua estrutura natural de campo), de volumes conhecidos, que são obtidas utilizando-se trados especiais.

Em seguida, coloca-se parte da amostra de solo numa latinha de alumínio, fechando-se bem, para que não haja saída de vapor de água. Após isto, pesa-se o conjunto, obtendo-se o peso úmido. Leva-se para secagem as amostras de solo numa estufa (Figura 3) a 105-110 °C por 24 horas. Depois da secagem as amostras devem ser colocadas num dissecador para resfriar sem absorção de umidade e, posteriormente, são pesadas. Estas amostras são pesadas antes e depois da secagem, sendo possível calcular a percentagem de umidade do solo em base seca (KLAR, 1984; DAKER, 1988; RIGHES et al., 2003; CARLESSO e ZIMMERMANN, 2005; BERNARDO et al., 2006; EMBRAPA, 1997).

$$Ug = \frac{(Mu - Ms)}{Ms \times 100} \quad (5)$$

Onde:  $Ug$  é o conteúdo gravimétrico de água no solo (% de massa),  $Mu$  é a massa úmida da amostra (g), e  $Ms$  é a massa seca da amostra (g).

Para se obter o conteúdo volumétrico de água no solo  $\theta$  (% vol), que corresponde a quantidade de água em um determinado volume de solo, a  $Ug$  deve ser multiplicada pela densidade do solo ( $Ds$ ).

$$\theta = Ug \times Ds \quad (6)$$



Figura 3 – Estufa de secagem de amostras.

Fonte: O autor.

Uma das grandes vantagens do método padrão de estufa é a precisão que ele apresenta, sendo utilizado como referência para calibrar equipamentos e métodos. O maior limitante deste método é o tempo necessário para obtenção do resultado, o qual será de aproximadamente 24 horas. Este método é um dos métodos mais utilizados pelo seu baixo custo de realização, não necessitando de equipamentos sofisticados e nem de adição de produtos químicos.

#### 2.5.1.2 Método do forno elétrico

Segundo Fonseca et al. (2009a) o método do forno elétrico foi desenvolvido com o objetivo de reduzir o consumo de energia e o tempo de secagem do solo. É um método com grande potencial de utilização pelos produtores e técnicos para se medir a umidade do solo, visto que é simples, rápido, e de baixo custo de aquisição e execução. Tem seu funcionamento à base de energia elétrica, e a fonte de geração do calor usado para executar o aquecimento é através das resistências de

aquecimento. Os fornos elétricos são dotados de dois setores de cozimento, possuindo um resistor elétrico superior e outro inferior para emissão de calor. Cada um desses resistores possui seu próprio botão para ligar/ desligar, assim, o controle sobre o aquecimento é ainda mais eficiente (FORCESYSTEM, 2010).

Para a execução do método do forno elétrico, o mesmo deve ser previamente aquecido por 5 minutos, com o seletor de temperatura na posição inferior, a superior não deve ser usada na determinação de umidade do solo. Pesar a bandeja do forno vazio e anotar o valor (P1). Após isto, colocar 100 a 200 gramas de solo da amostra composta na bandeja do forno, espalhando o solo na bandeja, quebrando os torrões maiores e retirando as raízes. Pesar e anotar o peso da bandeja do forno com a amostra do solo (P2). Colocar a bandeja com a amostra composta dentro do forno elétrico por meia hora para secagem completa da amostra. Após este tempo, retirar a bandeja e deixá-la esfriar. Após o esfriamento pesar a bandeja com o solo seco e anotar o valor (P3). Calcular o valor da umidade média das três amostras de solo (U) aplicando a seguinte equação:

$$U = \frac{P2-P3}{P3-P1} \times 100 \quad (7)$$

Fonseca et al. (2009a) observaram que o método do forno elétrico é um método confiável e eficiente para a determinação da umidade do solo, tanto para um solo com textura arenosa quanto para um de textura argilosa, visto que não diferiu estatisticamente do método padrão de estufa. Oliveira et al. (2008) estudando dois solos, um de textura argilosa e outro arenosa, secaram as amostras durante 30 minutos a uma temperatura de 160°C, e concluíram que os teores de água determinados com o forno elétrico foram estatisticamente iguais ao método padrão de estufa.

### 2.5.1.3 Método do forno de micro-ondas

É o método que utiliza o forno micro-ondas comercial para a secagem das amostras de solo. Apresenta como vantagem principal a redução no tempo de secagem da amostra, o qual varia em função do número de amostras colocadas

para secar, do tamanho da amostra, da umidade, do tipo de solo e da potência do forno micro-ondas utilizado (DAL PRÁ, 2008; FRANCO, 2009).

Para fins de manejo de irrigação em uma determinada área, é aconselhável que seja feito um estudo prévio, com os diferentes tipos de solo existentes na propriedade, para a definição dos parâmetros acima mencionados, visando a sua calibração com o método padrão da estufa.

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas, de alta frequência, do mesmo tipo das ondas de rádio, só que mais curtas. O aquecimento ocorre em razão de uma radiação eletromagnética de 2.450 MHz que é gerada por um magnetron e irradiada por um ventilador de metal, que fica localizado na parte superior do aparelho, para o interior do mesmo (Figura 4). Radiação essa que aumenta a agitação das moléculas de água, aquecendo-as de forma quase uniforme e de fora para dentro, já que as ondas eletromagnéticas se localizam na parte externa dos alimentos (SILVA, 2012). O prato giratório serve para garantir uma distribuição mais uniforme da radiação eletromagnética sobre todo o objeto. Devem-se utilizar recipientes específicos, de preferência de vidro, que suportam altas temperaturas.

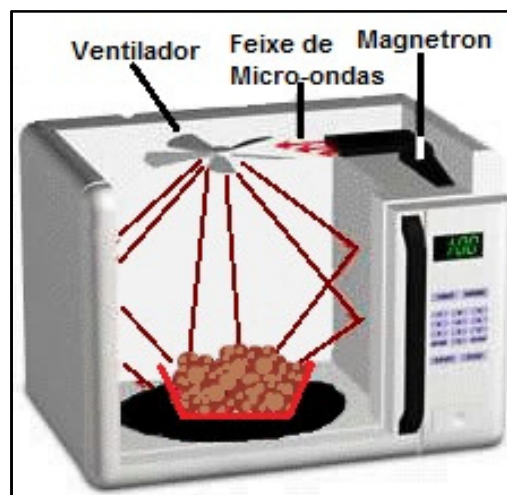


Figura 4 – Esquema de funcionamento do forno de micro-ondas.

Fonte: O autor.

A metodologia para determinação do teor de água é retirar as amostras do solo com trado, enxadão ou outro instrumento, atentando-se para que as amostras de diferentes horizontes e/ou profundidades não sejam misturadas durante a retirada. Depois colocar parte da amostra de solo na latinha de alumínio, fechando-se bem, para que não haja saída de vapor de água. Pesar o becker de vidro vazio (com capacidade para 100 a 200 mL), obtendo-se a tara. Feito isto, transferir parte da amostra de solo para o becker de vidro e, pesar o conjunto, obtendo-se o peso úmido (*Mu*). Levar ao forno micro-ondas (até peso constante), pesar novamente o conjunto, obtendo-se o peso seco (*Ms*), e determinar o conteúdo de água da amostra conforme as equações do método-padrão.

Essa tecnologia é um método alternativo ao método convencional de secagem de solo e de planta. O método convencional utiliza a estufa de secagem como equipamento e demanda de 12 até 72 horas para completar o teste. Já o método alternativo utiliza o forno de micro-ondas doméstico como equipamento e demanda 10 ou 14 minutos para secar solo ou planta, respectivamente, segundo Souza et al. (2002).

Estes autores ainda lembram que o método do forno micro-ondas tem efeito no incremento de produtividade laboratorial, na diminuição da geração de resíduos, na redução de custo da análise, na rapidez de fornecimento de resultados para os sistemas de produção, na realização de regas mais controladas das lavouras, com a utilização de equipamentos simples e acessíveis aos produtores familiares.

Segundo Bernardi et al. (2007) o custo total da análise por este método é reduzido em 61%, em relação ao método padrão. O aumento do número de análises e a alteração do equipamento utilizado permitem que o custo de energia, que representava 6% do custo total no método convencional, ficasse próximo de 1% no método alternativo.

Segundo Fonseca et al. (2009b) estudando dois solos, um de textura arenosa e outro argilosa, os resultados evidenciaram que o método do forno micro-ondas para a determinação de umidade do solo não difere estatisticamente do método padrão de estufa, constituindo uma metodologia confiável e que pode ser facilmente utilizada no manejo de irrigação. Para o solo arenoso foi encontrado um coeficiente de determinação de 0,99 e um índice de concordância de Willmott de 0,94, e para o solo argiloso, 0,99 e 0,96, respectivamente.



Oliveira (1979) testou a aplicabilidade de um forno de micro-ondas comercial para determinação de umidade através da secagem de amostras de solo. Os resultados mostraram que as umidades obtidas da secagem por micro-ondas não foram muito diferentes daqueles obtidos através do método gravimétrico, tendo em vista que os coeficientes de variação médios obtidos são bastante próximos (7,5% para estufa contra 9,5% para micro-ondas). O efeito do aquecimento por micro-ondas sobre a matéria orgânica do solo tem sido tanto quanto o da estufa convencional a 105°C, durante 24 horas. Os parâmetros das equações lineares, calculados para estimar o tempo de secagem para diferentes umidades, mostraram não depender da textura do solo.

Miranda et al. (2008a) estudaram um solo de textura arenosa, usando amostras de solo de 5 gramas cada colocadas no forno de micro-ondas por 5 minutos nas potências de 90%, 80%, 70%, 60%, 50% e 40%. Os melhores resultados foram obtidos para as potências de 80%, 70% e 60% com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) médios, respectivamente de 0,99916; 0,98 e 0,995. Em outro estudo, Miranda et al. (2008b) objetivaram verificar a influência do tamanho da amostra de solo para a determinação do teor de umidade através do uso de aparelho de micro-ondas. O solo de textura arenosa foi dividido em amostras de 5, 10, 15, 20 e 25 gramas e o tempo de aquecimento do forno de micro-ondas foi de 5 minutos na potência máxima. A conclusão foi de que a variação do tamanho da amostra para o solo de textura arenosa não influenciou na determinação da umidade a base de peso através do uso do forno de micro-ondas.

Carmo (2012) utilizou os tratamentos de 3, 5, 10 e 15 minutos no forno de micro-ondas, para um solo de textura franco-siltosa. Concluiu que não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos de 5, 10 e 15 minutos no forno de micro-ondas e a estufa a 110°C, tanto para o teste Tukey quanto para o teste Duncan, ambos a 1% de significância.

Tavares et al. (2008) estudou a utilização do forno de micro-ondas na determinação da umidade no solo, comparando os resultados com os valores fornecidos pelo método da estufa convencional, usando nove solos com diferentes texturas. Neste trabalho concluiu-se que o tempo de secagem de 240 segundos foi suficiente para a estabilização de massa em todos os solos estudados. Além de que os resultados obtidos por meio de qualquer um dos dois métodos não diferiram entre

si. Também que o processo de secagem no forno de micro-ondas tem maior efeito sobre solos argilosos em relação àqueles arenosos.

#### 2.5.1.4 Método das pesagens

Este método é também conhecido como método do balão volumétrico e foi desenvolvido por Papadakis (1941) e melhorado posteriormente por Klar et al. (1966) e Bernardo (1968) apud Righes et al. (2003).

É um método que se baseia na saturação da amostra de solo, contrariamente aos métodos anteriores, que promovem o secamento da amostra. Fundamenta-se na obtenção de um padrão, que servirá de referência às demais determinações. É um método simples e, após obtenção do padrão e da densidade de partículas do solo, necessita apenas de balança com sensibilidade de 1 g, sendo, portanto, barato e, para fins práticos apresenta boa precisão (KLAR, 1984).

Para a realização deste método é necessário que se calibre o método para cada tipo de solo e profundidade de trabalho, conhecendo assim a massa padrão (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2005). Para a obtenção deste padrão adiciona-se água até aproximadamente a metade do volume do erlenmeyer ou balão de 500 mL, em seguida coloca-se 100 g do solo seco em estufa a 105 °C agitando bem para garantir uma boa homogeneização da mistura água-solo. Posteriormente, completa-se o volume do frasco com água até a marca dos 500 mL, e pesa-se o conjunto ( $M$ ), considerado como padrão para o solo em questão, o qual é determinado apenas uma vez.

Para a determinação do conteúdo de água, repete-se, com a amostra de solo que se quer determinar a umidade, os mesmos passos utilizados para a obtenção do padrão, exceto a secagem do solo, obtendo-se o peso  $M'$ . O cálculo da umidade com base em peso úmido ( $U$ , em %) é efetuado por meio da equação abaixo (RIGHES et al., 2003):

$$U = (M - M') \times \left( \frac{D_p}{D_p - 1} \right) \quad (8)$$

Onde:  $D_p$  = densidade de partículas do solo, geralmente, igual a 2,65 g.cm<sup>-3</sup>.

Para a obtenção do conteúdo de água no solo em % de massa (em base seca) pode ser utilizada a seguinte equação:

$$Ug = 100 \times \frac{U}{100-U} \quad (9)$$

Onde:  $Ug$  é o conteúdo de água no solo em relação à massa seca (%), e  $U$  é o conteúdo de água no solo em relação à massa úmida (%).

Para obter os valores do conteúdo de água no solo em % de volume, basta aplicar a equação (9), multiplicando-se os valores de  $Ug$  pela densidade do solo ( $Ds$ ).

Filho (1988) em seu estudo concluiu que o método das pesagens teve um bom desempenho na determinação da umidade para os três tipos de solos analisados do município de Piracicaba, SP, e a comparação do método das pesagens com o método gravimétrico padrão, mostrou uma alta correlação, independente do tipo de solo em questão.

Calheiros e Arndt (1991) descreveram que o método das pesagens possibilitou valores de graus de umidade bem mais próximos daqueles fornecidos pelo secamento em estufa, obtendo, em vários casos, a valores idênticos, principalmente no solo de textura argilosa e para graus de umidade mais altos. No solo com textura franco-arenosa ocorreram algumas variações entre os valores de graus de umidade nas subamostras e, de uma maneira geral, foram mais afastados dos fornecidos pelo secamento em estufa, quando comparadas com as de textura argilosa. Os autores ainda afirmam que o método das pesagens pode se constituir num substituto eficiente e preciso do método de secamento em estufa, no controle da aplicação de água de irrigação.

A vantagem deste método é a sua rapidez para a determinação a campo em relação aos demais métodos, pois dá a resposta logo após a retirada da amostra (BERNARDO et al., 2006). Além de apresentar um baixo custo e ainda não necessitar de equipamentos sofisticados, podendo ser usado sem restrições para o monitoramento do conteúdo de água no solo para determinar o momento de iniciar a irrigação.

## 2.6 Disponibilidade de água no solo

A frequência de irrigação requerida para uma cultura, sob determinado clima, depende grandemente da quantidade de água que pode ser “armazenada” no solo, após uma irrigação (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2000).

Segundo critérios estabelecidos classicamente, a expressão “Água Disponível” foi definida como sendo o intervalo de umidade compreendido entre a Capacidade de Campo (CC) e o Ponto de Murchamento Permanente (PMP), respectivamente os limites superior e inferior de disponibilidade (BERNARDO et al., 2006), como pode ser visto na Figura 5. Ainda, segundo Klein (2008) esse conceito de água disponível é indispensável para o correto manejo da água e orientação de projetos de irrigação.

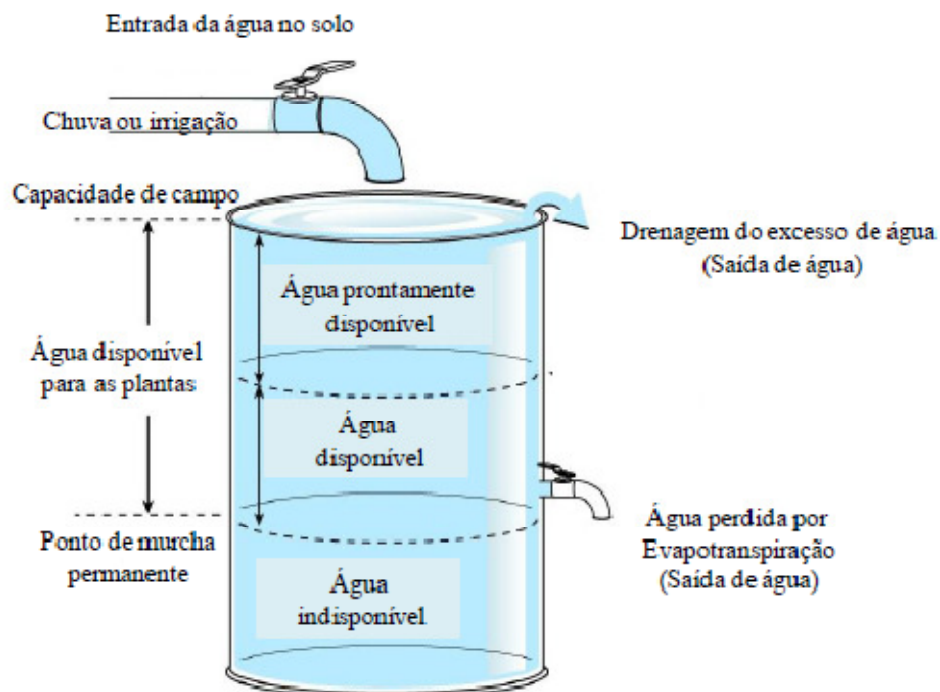


Figura 5 – Limites de disponibilidade de água no solo para as plantas.

Fonte: Kaiser (2010).

Atualmente a disponibilidade de água do solo às plantas é vista de maneira dinâmica, podendo variar de situação para situação, para o mesmo solo e a mesma planta. Dentro do contexto atual, REICHARDT (1978, p. 79) define a disponibilidade de água da seguinte maneira: "toda vez que o fluxo de água do solo para a raiz for de uma intensidade tal que supre a demanda de água da planta e da atmosfera, a água é disponível". Este conceito de disponibilidade de água é bastante amplo. Ele mostra que qualquer fator que afeta a mobilidade da água, afeta sua disponibilidade. Estes fatores podem ser do solo, da planta e da atmosfera.

A capacidade de campo é a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem ter ocorrido, ou cessado em um solo previamente saturado por chuva ou irrigação. A capacidade de campo é atingida 2 a 3 dias após a ocorrência de uma chuva que tenha saturado o solo.

Segundo Reichardt (1988), a capacidade de campo na maioria dos solos se encontra entre os potenciais matriciais de  $-10$  kPa e  $-33$  kPa, dependendo da textura e estrutura do solo. Este autor defende ainda que o teor de matéria orgânica, seqüência dos horizontes e gradiente textural entre os horizontes também interferem diretamente nos resultados da capacidade de campo. A classe textural das areias apresenta uma textura mais grossa, tendendo a uma maior drenagem, resultando em percentagens menores de umidade do solo, enquanto a textura fina dos solos podem ter teores maiores de umidade.

O conceito de capacidade de campo é de indiscutível utilidade, por indicar o limite superior aproximado da quantidade de água disponível para as plantas Jong (2000 apud VIELMO, 2008). No Brasil, há uma grande diversidade de solos com as mais variadas características físicas, dificultando assim uma padronização nos valores referentes à capacidade de campo devendo ser determinadas para cada tipo de solo.

O ponto de murcha permanente (PMP) é o conteúdo de água no solo retido a um componente matricial do potencial de água tão elevado, em valor absoluto, que a maioria das plantas não consegue extrair água do solo e entra em murcha permanente. Para irrigação, o ponto de murcha permanente é o conteúdo volumétrico de água em equilíbrio com o componente matricial do potencial de água no solo de  $1500$  kPa ou  $15$  atmosferas (HILLEL, 1980).

Segundo Kaiser (2010) o ponto de murcha permanente representa o conteúdo de água no solo em que a planta não consegue mais absorver água, devido a alta

energia com que ela fica retida, e entra em murcha, não recuperando mais a turgidez das células mesmo que seja colocada em ambiente com alta umidade e, nessas condições a planta senesce.

O conteúdo de água retido no solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente é variável com a textura do solo. Solos mais argilosos por apresentarem maior quantidade de poros e uma maior área superficial de suas partículas, apresentam maior quantidade de água retida na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (Figura 6).

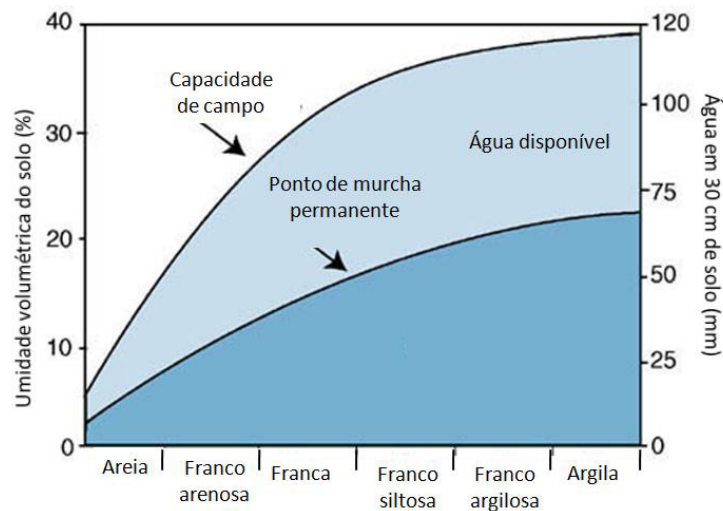


Figura 6 - Variação da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e da água disponível em função da textura do solo.

Fonte: Kaiser (2010).

É bastante usual o manejo de sistemas de irrigação com o uso destes atributos, acionando-se os sistemas antes que o solo alcance o limite inferior de disponibilidade de água e desligando no momento em que se atinge a umidade do limite superior de disponibilidade, diminuindo perdas de água, reduzindo custos de irrigação e aumentando a produtividade.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo diz respeito à descrição da coleta e preparação do material, das determinações físicas realizadas e do procedimento experimental adotado. Além de descrever a análise estatística utilizada.

#### 3.1 Localização e realização dos experimentos

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica Agrícola do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Tendo sido realizado no segundo semestre de 2012.

#### 3.2 Coleta e preparação do material

Inicialmente, foram coletadas três amostras de solo (S1, S2 e S3) de regiões geográficas distintas, na camada de 0-0,2 m, apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Localização dos solos estudados.

Amostra	Localização	Latitude	Longitude	Altitude (m)
S1	Santiago/ RS	29°09'50"	54°51'32"	439
S2	Bossoroca/ RS	28°39'56"	55°01'16"	260
S3	Alegrete/ RS	29°47'02"	55°47'28"	102

O solo S1 é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta. O solo S2 é classificado como Nitossolo Vermelho

Distroférico latossólico pertencente à unidade de mapeamento São Borja. O solo S3 é classificado como Argissolo Vermelho Ditrófico arênico, unidade de mapeamento São Pedro (STRECK et al., 2008). Foram escolhidos estes solos devido ao fato de serem possíveis de instalar sistemas de irrigação.

Utilizou-se como material para coleta das amostras de solo trado tipo holandês, pás e sacos plásticos. Posteriormente, estas amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Hidráulica Agrícola, onde foram secas ao ar, naturalmente, destorroadas com rolo e tapete de borracha e peneiradas, em peneira de 0,002 m, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

### **3.3 Análise física dos solos**

Realizado o procedimento inicial, descrito anteriormente, as amostras foram conduzidas para o Laboratório de Física do Solo, da UFSM, para a realização da análise granulométrica pelo método da pipeta, conforme procedimento descrito em EMBRAPA (1997). Este método baseia-se na velocidade de queda das partículas que compõem o solo. Fixa-se o tempo para o deslocamento vertical na suspensão do solo com água, após a adição de um dispersante químico (soda ou calgon). Pipeta-se um volume da suspensão, para determinação da argila que seca em estufa é pesada. As frações grosseiras (areia fina e grossa) são separadas por tamisação, secas em estufa e pesadas para obtenção dos respectivos percentuais. O silte corresponde ao complemento dos percentuais para 100%.

A determinação da densidade de partículas foi realizada no Laboratório de Hidráulica da UFSM, pelo método do balão volumétrico modificado (MBVmod) descrito por Gubiani et al. (2006). Neste método transfere-se 20 g de solo seco em estufa, macerado em gral de porcelana, para o balão de 50 ml. Adiciona-se álcool até a marca de aferição do balão, e ainda determina-se a densidade do álcool. Deve-se ter o cuidado de pesar o conjunto em cada etapa do procedimento.

A densidade do solo foi determinada de acordo com o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). O procedimento é realizado pela coleta das amostras de solo com estrutura indeformada através de um anel de aço (Kopecky)



de bordas cortantes e volume interno de 50 cm<sup>3</sup>. Após pesar o conjunto, seca-se a amostra em estufa.

### **3.4 Aparelhagem experimental**

Para determinar o teor de umidade dos solos conduziu-se os experimentos através de estufa com circulação de ar (método padrão, M0), marca CENCO, com dimensões de 0,45 x 0,60 x 0,35 m, e termostato digital TIC-17RGTi.

Para o método do forno elétrico (M1) utilizou-se um forno elétrico com 9 litros de capacidade, marca Home Life, modelo HLF 600, com 600 W de potência, e dimensões de são 0,396 x 0,238 x 0,246 m.

No método do forno de micro-ondas (M2) utilizou-se um forno micro-ondas comercial da marca Philco, modelo PMS35N, 31 litros de capacidade, 900 W de potência, consumo de 1,4 kW.h<sup>-1</sup>, dimensões aproximadas de 0,32 x 0,52 x 0,79 m.

Já no método das pesagens (M3) usou-se um copo de vidro com capacidade de 0,45 litros. Para a pesagem, de todos os métodos, empregou-se uma balança digital com capacidade de 1000g e precisão de 0,1g.

### **3.5 Procedimento experimental**

Foram quatro métodos testados (M0, M1, M2, M3), com três amostras de solo (S1, S2, S3) e três repetições para cada, totalizando nove testes para cada método, e 36 no total para cada percentual de umidade, conforme é apresentado no fluxograma (Figura 7).

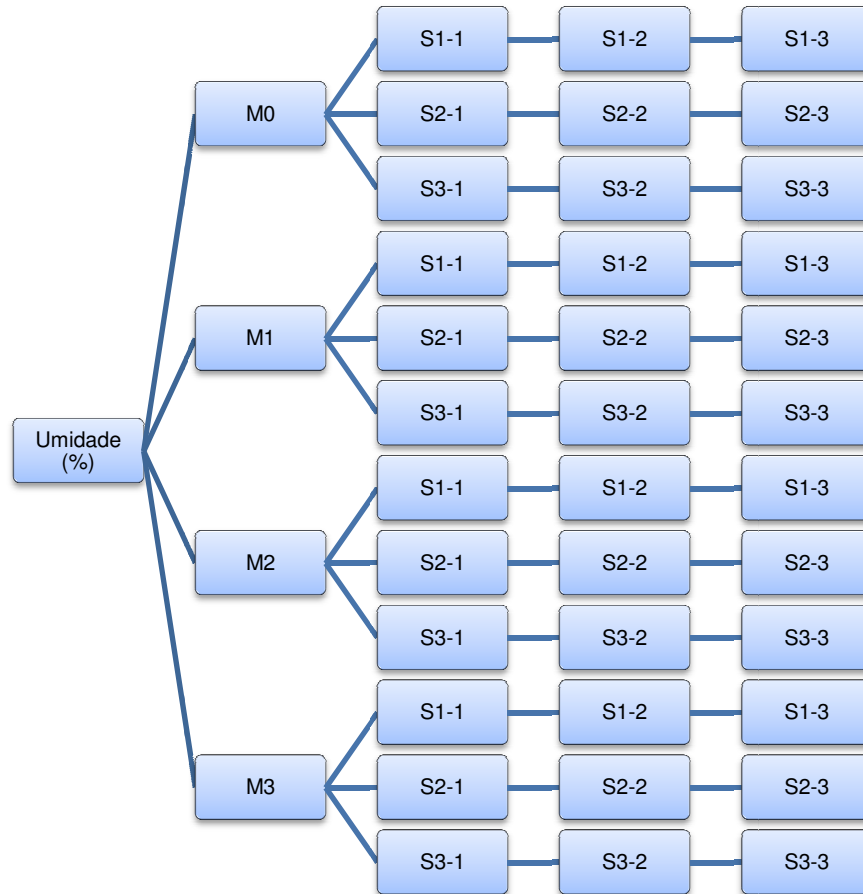


Figura 7 – Fluxograma do procedimento experimental.

Fonte: O autor.

Primeiramente, secaram-se as amostras de solo em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , isto para os três solos estudados. Após esta etapa separou-se 50 gramas de cada solo (S1, S2, S3), com três repetições. Exceto para as amostras referentes ao método das pesagens, em que foram utilizados 100g de cada solo, conforme determina o procedimento experimental.

Na sequência acrescentou-se água destilada para valores de umidade gravimétrica de 5, 10, 15, 20 e 25%, deixando de repouso durante 24 horas. Estes percentuais de umidade foram definidos em função da porosidade dos solos estudados. Após isto as amostras foram vedadas com sacos plásticos para eliminar a interferência da umidade do ar. No dia seguinte pesou-se a massa úmida de cada amostra, e em seguida partiu-se para a determinação da umidade do solo através do diferentes métodos propostos neste estudo.

No método padrão de estufa as amostras foram secas durante 24 horas em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  e pesadas ao final do procedimento. No método do forno elétrico, este foi pré-aquecido durante cinco minutos, e as amostras foram pesadas aos 20, 25 e 30 minutos de secagem. No método do forno de micro-ondas foi utilizada a potência máxima (100%) do aparelho, sendo que as amostras foram pesadas aos 5, 10, 15 e 20 minutos de secagem. Foram utilizados estes tempos a fim de verificar a possibilidade de reduzir o tempo de secagem das amostras. E no método das pesagens acrescentou-se à massa úmida das amostras água destilada até completar 0,40 litros do copo de vidro.

### 3.6 Análise dos dados

Executou-se uma análise comparativa entre os valores de umidade gravimétrica obtida através dos métodos alternativos e os valores de umidade gravimétrica obtidos com a metodologia padrão.

Foi feita a regressão linear  $Y = a + bX$  entre os métodos alternativos ( $X$ ) e o método padrão de estufa ( $Y$ ), através do software TableCurve 2D, com a finalidade de se obter o coeficiente de correlação ( $r$ ), o coeficiente linear e o coeficiente angular, e o índice de concordância de Wilmott ( $Iw$ ).

Após a obtenção dos valores dos coeficientes ( $a$ ,  $b$ ) da regressão linear foi feito o teste  $t$  de Student, ao nível de confiança de 95%, do coeficiente linear que indicará se  $a = 0$  e o teste  $t$  do coeficiente angular ( $b$ ) que indicará se  $b = 1$ .

O coeficiente de correlação permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise (SCHNEIDER et al., 1998). O campo de variação é de -1 a 1 e quanto maior o seu valor absoluto maior o grau de associação. O coeficiente de correlação pode ser estimado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2][\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]}} \quad (10)$$

Onde:  $E_i$  são os valores estimados,  $O_i$  os valores observados,  $\bar{E}$  a média dos valores estimados e  $\bar{O}$  a média dos valores observados.

O índice de concordância fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas, uma vez que está relacionada a diferença entre os valores estimados em relação aos valores observados, sendo seu campo de variação de 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita) (WILLMOTT, 1981). O índice de concordância de Willmott é calculado por:

$$Iw = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (11)$$

Onde:  $E_i$  é o valor da observação estimada,  $O_i$  é o valor da observação medida e  $\bar{E}$  é a média dos valores da observação estimada e  $\bar{O}$  é a média da observação medida.

A avaliação do desempenho das fórmulas utilizadas foi feita pelo índice de desempenho ( $I_d$ ), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), cujo valor é o produto do coeficiente de correlação e o índice de concordância ( $I_d = r \times Iw$ ).

O critério de interpretação do índice de desempenho e das respectivas classes de desempenho utilizadas neste trabalho foi feito de acordo com Costa (2004), e pode ser visto na tabela 3.

Tabela 3 - Critério de interpretação dos valores do índice desempenho e as respectivas classes de desempenho.

Critério de interpretação do índice de desempenho				Classes de desempenho	
0,85	<	Id			Ótimo
0,76	<	Id	≤	0,85	Muito Bom
0,66	<	Id	≤	0,76	Bom
0,61	<	Id	≤	0,66	Mediano
0,51	<	Id	≤	0,61	Ruim
0,41	<	Id	≤	0,51	Muito Ruim
		Id	≤	0,41	Péssimo

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo tem a finalidade de mostrar os resultados obtidos nos diversos testes, de modo sequencial, para comparar valores obtidos pelo método padrão de determinação da umidade do solo e os valores obtidos nos demais métodos de modo a verificar a validade da metodologia proposta neste estudo.

### 4.1 Características físicas dos solos

Na tabela 4 são apresentados os resultados das características físicas dos três solos estudados.

Tabela 4 – Características físicas dos solos estudados.

Amostra	Profundidade (m)	Granulometria (%)				Classe textural
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
S1	0-0,2	30,801	14,601	18,733	35,864	Argilo arenoso
S2	0-0,2	2,552	3,642	30,207	63,599	Muito argiloso
S3	0-0,2	23,88	46,42	2,418	27,283	Franco argilo arenoso

O solo S1 é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta (STRECK et al., 2008). De acordo com Albuquerque e Durães (2008), são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte diagnóstico superficial, apresentando média capacidade de retenção de água. Apresenta densidade média do solo de  $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$  e densidade média de partículas de  $2,56 \text{ g.cm}^{-3}$ .

O solo S2 é classificado como Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico pertencente à unidade de mapeamento São Borja (STRECK et al., 2008). Os Nitossolos compreendem solos constituídos por material mineral, de coloração que varia de vermelha a brunada, textura argilosa ou muito argilosa, com alta capacidade de retenção de água (ALBUQUERQUE e DURÃES, 2008). Apresenta densidade média do solo de  $1,8 \text{ g.cm}^{-3}$  e densidade média de partículas de  $2,43 \text{ g.cm}^{-3}$ .

O solo S3 é classificado como Argissolo Vermelho Ditrófico arênico, unidade de mapeamento São Pedro (STRECK et al., 2008). Conforme Albuquerque e Durães (2008) os argissolos compreendem solos constituídos por material mineral, horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte A ou E, de textura variando de arenosa a argilosa no horizonte A, e de média a muito argilosa no horizonte Bt, apresentando de baixa a média capacidade de retenção de água. A densidade média do solo é de  $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$  e a densidade média de partículas é de  $2,61 \text{ g.cm}^{-3}$ .

A análise granulométrica foi realizada com a finalidade de caracterizar o solo local, e conforme os resultados obtidos pode-se perceber que são solos com classes texturais distintas. Portanto, justificando o comportamento diferenciado frente a propriedades físicas como a capacidade de retenção de água.

Em condições de lavoura os valores da densidade do solo são alterados pelas condições de manejo impostas ao solo. Os solos aqui estudados tem um histórico de intenso uso agrícola, determinando a elevada densidade do solo.

Os valores da densidade de partícula observados foram de 2,43, 2,56 e 2,61  $\text{g cm}^{-3}$ , pertencendo a faixa de variação de 2,3 a 3,0  $\text{g cm}^{-3}$  descrita por Kaiser (2010).

## **4.2 Comparações entre os diferentes métodos**

Para realizar a comparação foram construídas tabelas que apresentam os valores de umidade gravimétrica (%) obtidos na aplicação dos diferentes métodos de determinação da umidade dos solos. Também é apresentada a avaliação do desempenho dos métodos analisados neste estudo.

#### 4.2.1 Método padrão (M0) x Método do forno elétrico (M1)

A tabela 5 apresenta os valores de umidade gravimétrica (%) obtidos na aplicação do método padrão de estufa e os valores obtidos pelo método do forno elétrico. Também é apresentada a média e o desvio padrão das observações.

A comparação gráfica dos valores de umidade gravimétrica (%) do método da estufa com o método do forno elétrico para os tempos testados (20, 25 e 30 minutos), nos percentuais de umidade estabelecidos de 5, 10, 15, 20 e 25%, são apresentados nas figuras 8, 9 e 10, para o S1, S2 e S3, respectivamente.

Para ambos os gráficos apresentados foi ajustada uma equação linear, com valores para y, o método padrão, em relação ao método do forno elétrico (x). Sendo que, as equações apresentaram coeficientes de determinação de 0,981, 0,978 e 0,990, quando testados todos os tempos (20, 25 e 30 minutos) reunidos para o S1, S2 e S3, respectivamente, indicando haver um bom ajustamento dos valores de umidade.

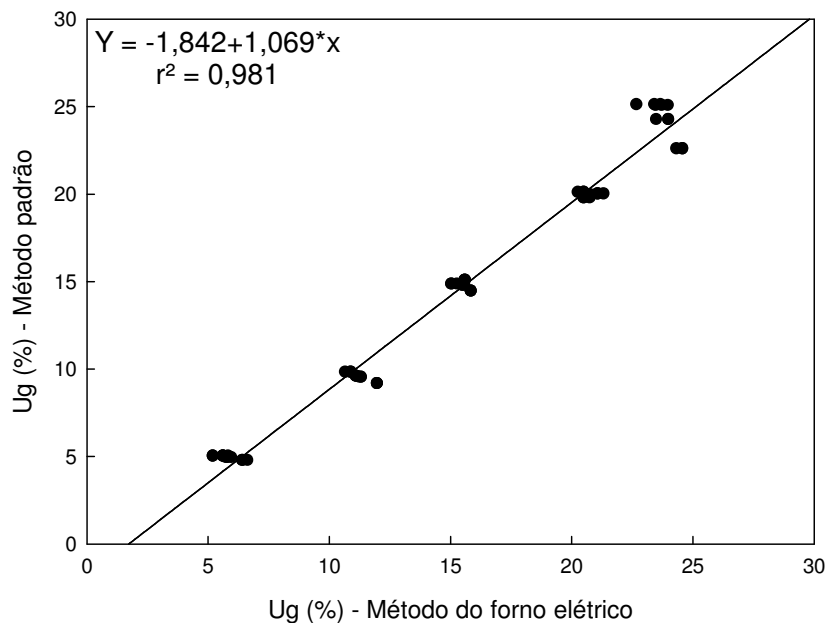


Figura 8 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método do forno elétrico para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S1.

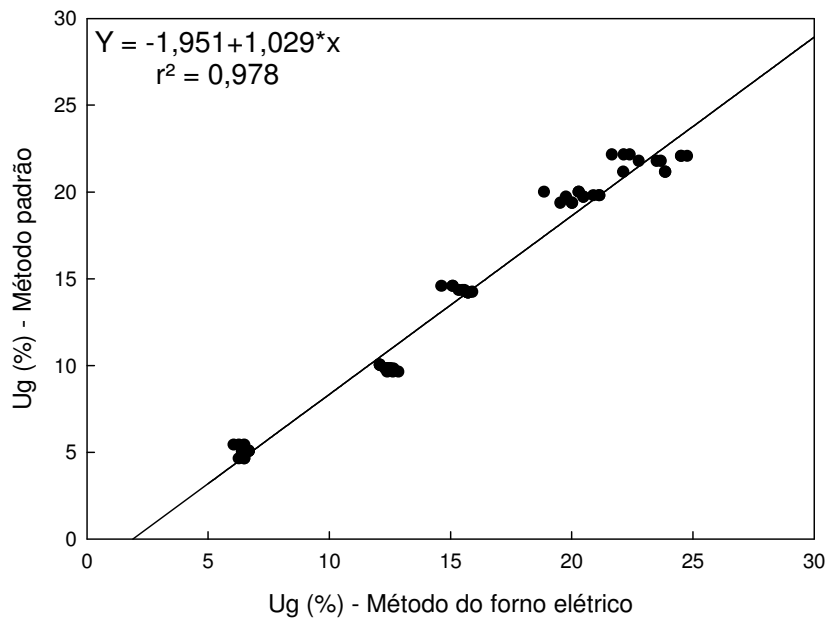


Figura 9 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método do forno elétrico para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S2.

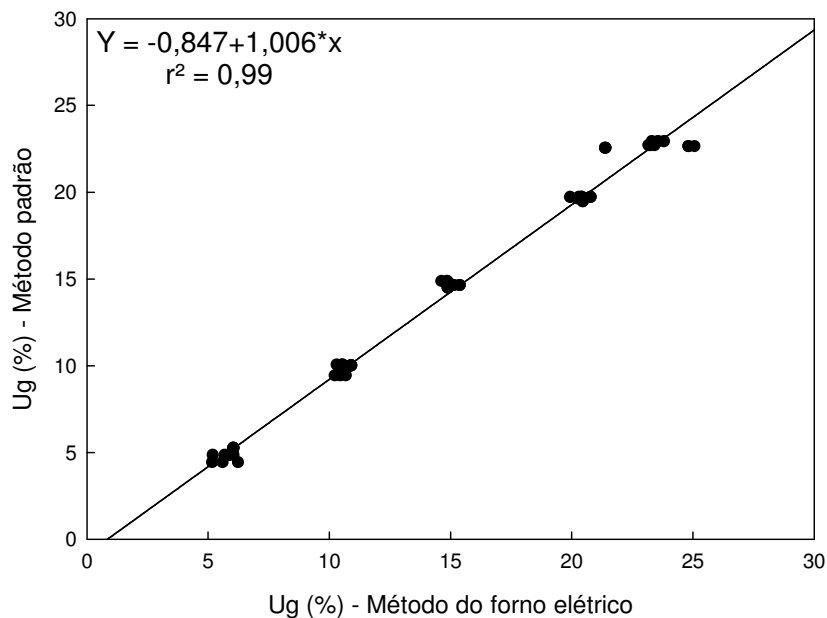


Figura 10 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método do forno elétrico para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S3.



Percebe-se ainda que o comportamento da umidade não diferiu em função das classes texturais, como pode ser visto na tabela 5. Também percebe-se que há resíduos quando o percentual de umidade gravimétrica é maior, isto porque os valores de umidade obtidos pelo método do forno elétrico são mais elevados quando comparados aos valores do método da estufa.

Na tabela 6 apresentam-se os valores do coeficiente de determinação “ $r^2$ ”, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student, do t tabelado ao nível de 95% de probabilidade, e o resultado estatístico (S ou NS) para os solos estudados na comparação entre o método da estufa e o método do forno elétrico.

Na tabela 6, observa-se que o coeficiente de determinação para todas as combinações se mostrou acima de 97%. Também percebe-se que o coeficiente angular foi não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro indicando que  $b=1$ . Portanto, pode-se afirmar que o método do forno elétrico é um método confiável para a determinação da umidade do solo, visto que não diferiu estatisticamente do método padrão de estufa. De forma que existe a possibilidade de usar o forno elétrico para determinar a umidade do solo em substituição ao método padrão. Resultados similares foram observados por Fonseca et al., 2009a; Oliveira et al., 2008, ao comparar estes métodos para amostras de solo argiloso e arenoso, não diferindo estatisticamente.

Em relação aos tempos testados (20, 25 e 30 minutos), pode-se verificar que o tempo de 20 minutos é eficiente na determinação da umidade para os solos estudados, significando em redução do tempo de secagem das amostras, e conseqüentemente redução no consumo de energia. Além de ser um método com grande potencial de utilização pelos produtores e técnicos para se medir a umidade do solo, visto que é simples, rápido, e de baixo custo de aquisição.

Tabela 5 – Valores de umidade gravimétrica (%) obtidos com o método padrão (M0) e o método do forno elétrico (M1) nos tempos de secagem de 20, 25 e 30 minutos para os diferentes percentuais de umidade gravimétrica estabelecidos.

	Ug 5%				Ug 10%				Ug 15%				Ug 20%				Ug 25%			
	M0	M1 20min	M1 25min	M1 30min	M0	M1 20min	M1 25min	M1 30min	M0	M1 20min	M1 25min	M1 30min	M0	M1 20min	M1 25min	M1 30min	M0	M1 20min	M1 25min	M1 30min
<b>S1</b>	4,75	6,44	6,65	6,44	9,15	11,99	11,99	11,99	14,43	15,86	15,86	15,86	19,76	20,77	20,52	20,52	25,05	23,49	23,74	23,99
	5,00	5,63	5,63	5,85	9,80	10,69	10,91	10,91	14,84	15,29	15,06	15,06	20,08	20,28	20,52	20,52	22,58	24,35	24,60	24,60
<b>Média</b>	5,00	5,22	5,65	5,22	9,56	11,13	11,13	11,13	15,06	15,62	15,62	15,62	20,00	21,34	21,10	21,10	25,10	22,69	23,68	23,43
	4,92	5,76	5,98	5,84	9,50	11,27	11,34	11,34	14,78	15,59	15,51	15,51	19,95	20,80	20,71	20,71	24,24	23,51	24,01	24,01
<b>D padrão</b>	0,14	0,62	0,59	0,61	0,33	0,66	0,57	0,57	0,32	0,29	0,41	0,41	0,17	0,53	0,33	0,33	1,44	0,83	0,51	0,58
<b>S2</b>	5,40	6,52	6,30	6,09	10,00	12,11	12,11	12,11	14,54	14,66	15,12	15,12	19,96	18,89	20,32	20,32	22,02	24,55	24,55	24,80
	5,03	6,71	6,71	6,71	9,60	12,88	12,65	12,42	14,17	15,76	15,76	15,76	19,32	19,56	20,04	20,04	22,11	21,69	22,18	22,42
<b>Média</b>	4,60	6,30	6,52	6,52	9,78	12,68	12,45	12,45	14,20	15,69	15,69	15,93	19,76	20,93	21,17	21,17	21,12	22,16	23,89	23,89
	5,01	6,51	6,51	6,44	9,79	12,56	12,41	12,33	14,30	15,37	15,52	15,60	19,68	19,79	20,51	20,51	21,75	22,80	23,54	23,70
<b>D padrão</b>	0,40	0,20	0,20	0,32	0,20	0,40	0,27	0,19	0,21	0,62	0,35	0,43	0,33	1,04	0,59	0,59	0,55	1,53	1,22	1,20
<b>S3</b>	4,40	5,20	6,26	5,62	9,98	10,93	10,93	10,93	14,60	15,18	15,42	15,42	19,68	20,32	20,81	20,81	22,51	21,41	21,41	21,41
	4,82	5,86	5,22	6,07	10,02	10,34	10,57	10,57	14,46	14,92	14,92	14,92	19,44	20,49	20,49	20,49	22,89	23,34	23,84	23,59
<b>Média</b>	5,22	6,07	6,07	6,07	9,40	10,26	10,48	10,71	14,83	14,89	14,89	14,66	19,68	19,96	20,45	20,45	22,60	24,85	25,10	24,85
	4,81	5,71	5,85	5,92	9,80	10,51	10,66	10,74	14,63	15,00	15,07	15,00	19,60	20,26	20,58	20,58	22,67	23,20	23,45	23,28
<b>D padrão</b>	0,41	0,45	0,55	0,26	0,35	0,36	0,24	0,18	0,19	0,16	0,30	0,38	0,14	0,27	0,20	0,20	0,20	1,72	1,87	1,74

Tabela 6 - Valores do coeficiente de determinação, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student e a significância do teste, ao nível de 95% de probabilidade, para os solos estudados na comparação entre o método da estufa e o método do forno elétrico.

Tratamentos*	r <sup>2</sup>	Coeficientes	Valores	ρ	t Student	t tabela	Obs.
<b>St Tt</b>	0,980	<b>a</b>	-1,527	0,186	-8,210	1,975	S
		<b>b</b>	1,034	0,011	0,317		NS
<b>S1 Tt</b>	0,981	<b>a</b>	-1,842	0,329	-5,597	2,002	S
		<b>b</b>	1,069	0,020	0,489		NS
<b>S1 T20</b>	0,977	<b>a</b>	-1,825	0,654	-2,792	2,101	S
		<b>b</b>	1,073	0,039	0,367		NS
<b>S1 T25</b>	0,983	<b>a</b>	-1,925	0,550	-3,501	2,101	S
		<b>b</b>	1,070	0,033	0,389		NS
<b>S1 T30</b>	0,983	<b>a</b>	-1,781	0,559	-3,183	2,101	S
		<b>b</b>	1,063	0,033	0,345		NS
<b>S2 Tt</b>	0,978	<b>a</b>	-1,951	0,339	-5,752	2,002	S
		<b>b</b>	1,029	0,020	0,203		NS
<b>S2 T20</b>	0,972	<b>a</b>	-2,339	0,695	-3,364	2,101	S
		<b>b</b>	1,068	0,042	0,328		NS
<b>S2 T25</b>	0,982	<b>a</b>	-1,883	0,544	-3,460	2,101	S
		<b>b</b>	1,019	0,032	0,104		NS
<b>S2 T30</b>	0,983	<b>a</b>	-1,716	0,533	-3,219	2,101	S
		<b>b</b>	1,007	0,032	0,038		NS
<b>S3 Tt</b>	0,990	<b>a</b>	-0,847	0,214	-3,955	2,002	S
		<b>b</b>	1,006	0,013	0,055		NS
<b>S3 T20</b>	0,992	<b>a</b>	-0,776	0,352	-2,203	2,101	S
		<b>b</b>	1,010	0,022	0,065		NS
<b>S3 T25</b>	0,989	<b>a</b>	-0,798	0,404	-1,974	2,101	NS
		<b>b</b>	0,998	0,025	-0,010		NS
<b>S3 T30</b>	0,990	<b>a</b>	-0,977	0,383	-2,552	2,101	S
		<b>b</b>	1,012	0,023	0,076		NS

\* StTt= todos os três solos com os tempos reunidos; S1Tt= S1 com os tempos reunidos; S1T20= S1 no tempo de 20 minutos; S1T25= S1 no tempo de 25 minutos; S1T30= S1 no tempo de 30 minutos; e assim, suscecivamente, para o S2 e S3.

#### 4.2.2 Método padrão (M0) x Método do forno de micro-ondas (M2)

A tabela 7 apresenta os valores de umidade gravimétrica (%) obtidos na aplicação do método padrão de estufa e os valores obtidos pelo método do forno de micro-ondas. Também é apresentada a média e o desvio padrão das observações.

Observando-se os valores das umidades obtidas pela secagem em estufa e através da secagem em forno de micro-ondas nota-se que em geral o secamento através do forno de micro-ondas produz valores de umidade maiores que a secagem convencional, resultados similares foram observados por Oliveira (1979).

A comparação gráfica dos valores do método da estufa com o método do forno de micro-ondas para os tempos testados (5, 10, 15 e 20 minutos) reunidos, nos percentuais de umidade estabelecidos de 5, 10, 15, 20 e 25%, são apresentados nas figuras 11, 12 e 13, para o S1, S2 e S3, respectivamente.

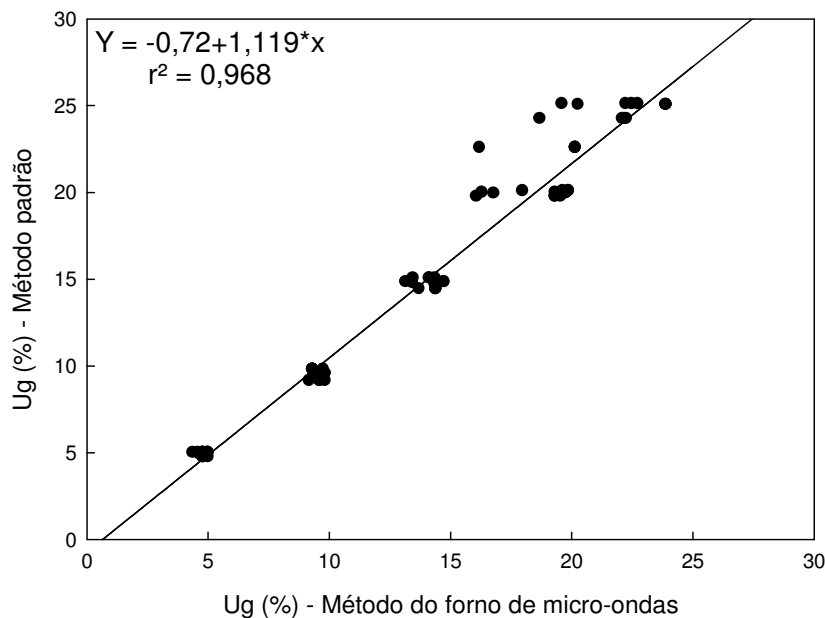


Figura 11 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método do forno de micro-ondas para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S1.

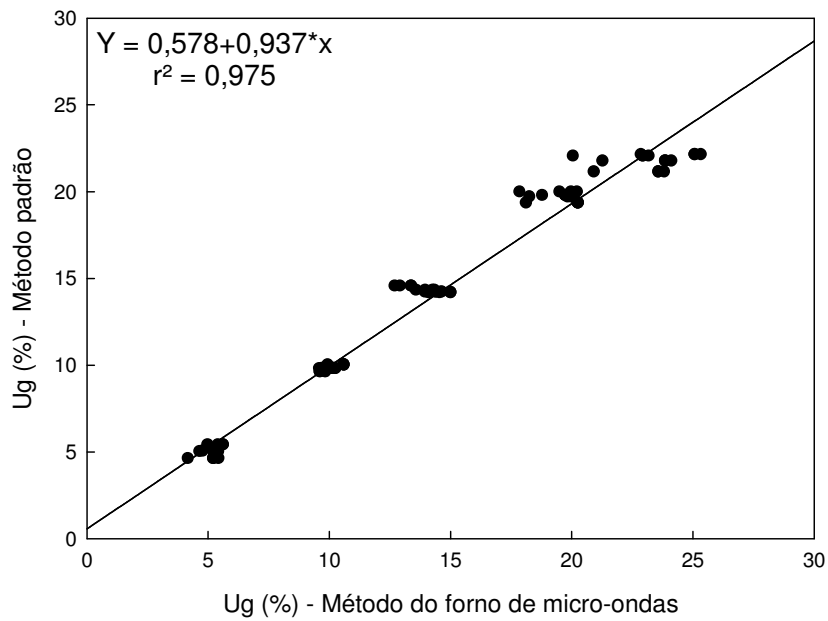


Figura 12 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método do forno de micro-ondas para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S2.

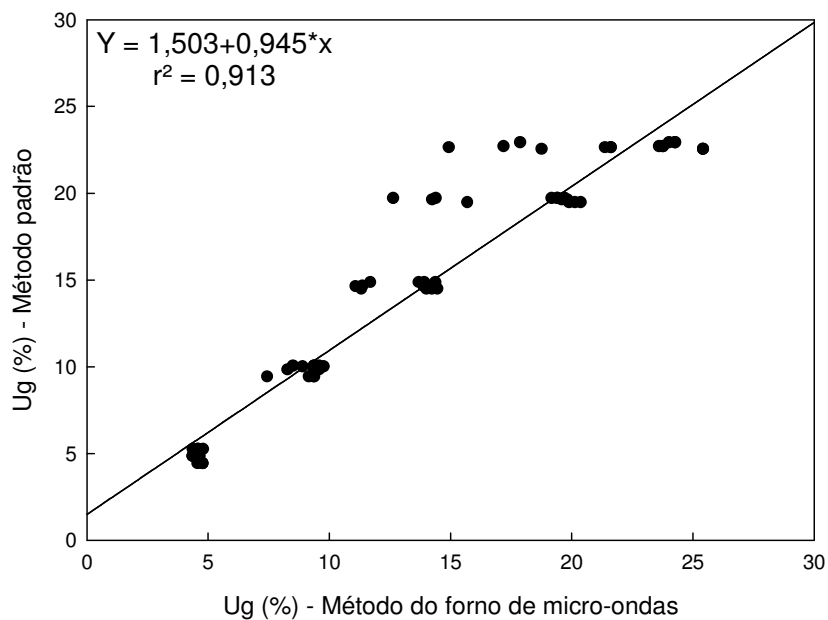


Figura 13 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método do forno de micro-ondas para os tempos testados reunidos em todos os percentuais de umidade do S3.

Para ambos os gráficos apresentados foi ajustada uma equação linear, com valores para  $y$ , o método padrão, em relação ao método do forno de micro-ondas ( $x$ ). Sendo que, as equações apresentaram coeficientes de determinação de 0,968, 0,975 e 0,913, quando testados todos os tempos (5, 10, 15 e 20 minutos) reunidos para o S1, S2 e S3, respectivamente, indicando haver um bom ajustamento dos valores de umidade.

Percebe-se ainda que o comportamento da umidade não diferiu em função das classes texturais, como pode ser visto na tabela 7. Oliveira (1979) chegou a conclusão semelhante, em que o processo final da secagem não variou muito com a textura, mas sim, com o conteúdo de água e o peso da amostra. Também percebe-se que há resíduos quando o percentual de umidade gravimétrica é maior, devido ao fato de que, pelo método do micro-ondas, encontra-se valores de umidade mais elevados. Segundo Davisson e Sivaslian (1918) apud Oliveira (1979), o tempo de 24 horas na estufa não é suficiente para remover totalmente a água de uma amostra de solo numa temperatura de 105°C.

Na tabela 8 apresentam-se os valores do coeficiente de determinação " $r^2$ ", dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste  $t$  de Student, do  $t$  tabelado ao nível de 95% de probabilidade, e o resultado estatístico (S ou NS) para os solos estudados na comparação entre o método padrão da estufa e o método do forno de micro-ondas.

Na tabela 8, observa-se que o coeficiente de determinação para todas as combinações se mostrou acima de 91%. Também percebe-se que o coeficiente angular foi não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro indicando que  $b=1$ . Portanto, pode-se afirmar que o método do forno de micro-ondas é um método confiável para a determinação da umidade do solo, visto que não diferiu estatisticamente do método padrão de estufa.

Resultados similares foram observados por Fonseca et al. (2009b) estudando dois solos, um de textura arenosa e outro argilosa, os autores evidenciaram que o método do forno micro-ondas para a determinação de umidade do solo não difere estatisticamente do método padrão de estufa. Oliveira (1979) testou a aplicabilidade de um forno de micro-ondas comercial para determinação de umidade através da secagem de amostras de solo, e os resultados mostraram que as umidades obtidas da secagem por micro-ondas não foram muito diferentes daqueles obtidos através do método gravimétrico.

Tabela 7 – Valores de umidade gravimétrica (%) obtidos com o método padrão (M0) e o método do forno de micro-ondas (M2) nos tempos de secagem de 5, 10, 15 e 20 minutos para os diferentes percentuais de umidade gravimétrica estabelecidos.

	Ug 5%					Ug 10%					Ug 15%					Ug 20%					Ug 25%				
	M0	M2 5min	M2 10min	M2 15min	M2 20min	M0	M2 5min	M2 10min	M2 15min	M2 20min	M0	M2 5min	M2 10min	M2 15min	M2 20min	M0	M2 5min	M2 10min	M2 15min	M2 20min	M0	M2 5min	M2 10min	M2 15min	M2 20min
<b>S1</b>	4,75	4,80	5,01	4,80	4,80	9,15	9,18	9,62	9,62	9,84	14,43	13,72	14,40	14,40	14,40	19,76	16,09	19,32	19,32	19,56	25,05	20,27	23,90	23,90	23,90
	5,00	4,79	5,00	5,00	5,00	9,80	9,33	9,33	9,33	9,76	14,84	13,16	14,51	14,74	14,74	20,08	17,98	19,88	19,64	19,88	22,58	16,22	20,16	20,16	20,16
	5,00	4,38	4,59	4,80	4,80	9,56	9,62	9,62	9,84	9,84	15,06	13,47	14,14	14,14	14,37	20,00	16,31	19,32	19,80	19,80	25,10	19,61	22,24	22,49	22,74
<b>Média</b>	4,92	4,66	4,87	4,87	4,87	9,50	9,38	9,52	9,59	9,81	14,78	13,45	14,35	14,43	14,50	19,95	16,79	19,51	19,59	19,75	24,24	18,70	22,10	22,18	22,26
<b>D padrão</b>	0,14	0,24	0,24	0,12	0,12	0,33	0,22	0,17	0,26	0,05	0,32	0,28	0,19	0,30	0,21	0,17	1,04	0,32	0,24	0,17	1,44	2,18	1,87	1,89	1,91
<b>S2</b>	5,40	5,01	5,43	5,65	5,65	10,00	9,96	10,62	10,62	10,62	14,54	12,72	12,95	13,40	13,40	19,96	17,88	19,52	20,00	20,24	22,02	20,08	22,95	22,95	23,20
	5,03	4,81	5,44	5,23	5,23	9,60	9,64	9,64	9,86	9,86	14,17	14,12	14,57	15,03	15,03	19,32	18,15	20,28	20,28	20,28	22,11	22,88	25,10	25,10	25,35
	4,60	4,19	5,24	5,24	5,45	9,78	9,62	10,06	10,28	10,06	14,20	13,97	14,43	14,43	14,66	19,76	18,81	19,76	19,76	19,76	21,12	20,94	23,60	23,60	23,85
<b>Média</b>	5,01	4,67	5,37	5,37	5,44	9,79	9,74	10,11	10,25	10,18	14,30	13,60	13,98	14,29	14,36	19,68	18,28	19,85	20,01	20,09	21,75	21,30	23,88	23,88	24,13
<b>D padrão</b>	0,40	0,43	0,11	0,24	0,21	0,20	0,19	0,49	0,38	0,39	0,21	0,77	0,90	0,82	0,85	0,33	0,48	0,39	0,26	0,29	0,55	1,44	1,10	1,10	1,10
<b>S3</b>	4,40	4,59	4,80	4,80	4,80	9,98	8,93	9,58	9,58	9,80	14,60	11,11	14,00	14,23	14,23	19,68	14,42	19,72	19,72	19,72	22,51	18,79	25,45	25,45	25,45
	4,82	4,39	4,60	4,39	4,39	10,02	8,53	9,40	9,40	9,62	14,46	11,35	14,03	14,49	14,26	19,44	15,73	19,92	20,16	20,40	22,89	17,90	24,05	24,30	24,30
	5,22	4,40	4,61	4,61	4,82	9,40	7,47	9,18	9,40	9,40	14,83	11,72	13,72	13,94	14,40	19,68	12,67	19,20	19,44	19,44	22,60	14,96	21,40	21,64	21,64
<b>Média</b>	4,81	4,46	4,67	4,60	4,67	9,80	8,31	9,39	9,46	9,61	14,63	11,39	13,92	14,22	14,30	19,60	14,27	19,61	19,77	19,85	22,67	17,22	23,63	23,80	23,80
<b>D padrão</b>	0,41	0,11	0,11	0,20	0,24	0,35	0,76	0,20	0,10	0,20	0,19	0,31	0,17	0,27	0,09	0,14	1,54	0,37	0,36	0,50	0,20	2,00	2,06	1,95	1,95

Tabela 8 - Valores do coeficiente de determinação, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student e a significância do teste, ao nível de 95% de probabilidade, para os solos estudados na comparação entre o método da estufa e o método do forno de micro-ondas.

Tratamentos*	r <sup>2</sup>	Coeficientes	Valores	ρ	t Student	t tabela	Obs.
<b>St Tt</b>	0,939	<b>a</b>	0,580	0,251	2,306	1,971	S
		<b>b</b>	0,990	0,016	-0,075		NS
<b>S1 Tt</b>	0,968	<b>a</b>	-0,720	0,348	-2,067	1,999	S
		<b>b</b>	1,119	0,023	0,783		NS
<b>S1 T5</b>	0,971	<b>a</b>	-2,151	0,734	-2,930	2,101	S
		<b>b</b>	1,336	0,054	1,447		NS
<b>S1 T10</b>	0,991	<b>a</b>	-0,695	0,370	-1,877	2,101	NS
		<b>b</b>	1,093	0,024	0,598		NS
<b>S1 T15</b>	0,992	<b>a</b>	-0,704	0,364	-1,937	2,101	NS
		<b>b</b>	1,088	0,023	0,577		NS
<b>S1 T20</b>	0,991	<b>a</b>	-0,775	0,371	-2,088	2,101	NS
		<b>b</b>	1,085	0,024	0,553		NS
<b>S2 Tt</b>	0,975	<b>a</b>	0,578	0,268	2,155	1,999	S
		<b>b</b>	0,937	0,017	-0,485		NS
<b>S2 T5</b>	0,987	<b>a</b>	0,161	0,411	0,393	2,101	NS
		<b>b</b>	1,032	0,028	0,189		NS
<b>S2 T10</b>	0,981	<b>a</b>	0,613	0,489	1,254	2,101	NS
		<b>b</b>	0,922	0,030	-0,449		NS
<b>S2 T15</b>	0,985	<b>a</b>	0,467	0,436	1,070	2,101	NS
		<b>b</b>	0,924	0,027	-0,463		NS
<b>S2 T20</b>	0,984	<b>b</b>	0,547	0,454	1,206	2,101	NS
		<b>b</b>	0,914	0,028	-0,518		NS
<b>S3 Tt</b>	0,913	<b>a</b>	1,503	0,496	3,031	1,999	S
		<b>b</b>	0,945	0,033	-0,304		NS
<b>S3 T5</b>	0,961	<b>a</b>	-1,232	0,796	-1,548	2,101	NS
		<b>b</b>	1,396	0,066	1,538		NS
<b>S3 T10</b>	0,985	<b>a</b>	0,968	0,431	2,246	2,101	S
		<b>b</b>	0,936	0,027	-0,387		NS
<b>S3 T15</b>	0,987	<b>a</b>	0,981	0,398	2,463	2,101	S
		<b>b</b>	0,927	0,025	-0,462		NS
<b>S3 T20</b>	0,988	<b>a</b>	0,853	0,390	2,185	2,101	S
		<b>b</b>	0,931	0,024	-0,441		NS

\* StTt= todos os três solos com os tempos reunidos; S1Tt= S1 com os tempos reunidos; S1T5= S1 no tempo de 5 minutos; S1T10= S1 no tempo de 10 minutos; S1T15= S1 no tempo de 15 minutos; S1T20= S1 no tempo de 20 minutos; e assim, suscecivamente, para o S2 e S3.



Em relação aos tempos testados (5, 10, 15 e 20 minutos), pode-se verificar que o tempo de 5 minutos é eficiente na determinação da umidade para os solos estudados. Carmo (2012) também concluiu que não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos de 5, 10 e 15 minutos no forno de micro-ondas e a estufa a 110°C.

Portanto, o método do forno micro-ondas com a utilização de equipamentos simples e acessíveis aos produtores, tem efeito na rapidez de fornecimento de resultados, e na redução do consumo de energia. Além de ter efeito no incremento de produtividade laboratorial, pois é um método de fácil execução.

#### 4.2.3 Método padrão (M0) x Método das pesagens (M3)

A tabela 9 apresenta os valores de umidade gravimétrica (%) obtidos na aplicação do método padrão de estufa e os valores obtidos pelo método das pesagens. Também é apresentada a média e o desvio padrão das observações.

A comparação gráfica dos valores do método da estufa com o método das pesagens, nos percentuais de umidade estabelecidos de 5, 10, 15, 20 e 25%, são apresentados nas figuras 14, 15 e 16, para o S1, S2 e S3, respectivamente.

Para ambos os gráficos apresentados foi ajustada uma equação linear, com valores para y, o método padrão, em relação ao método das pesagens (x). Sendo que, as equações apresentaram coeficientes de determinação de 0,739, 0,784 e 0,821 para o S1, S2 e S3, respectivamente, indicando haver um ajustamento aceitável dos valores de umidade.

Percebe-se ainda que o comportamento da umidade não diferiu em função das classes texturais, como pode ser visto na tabela 9. Também percebe-se que há resíduos quando o percentual de umidade gravimétrica é maior.

Na tabela 10 apresentam-se os valores do coeficiente de determinação “r<sup>2</sup>”, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student, do t tabelado ao nível de 95% de probabilidade, e o resultado estatístico (S ou NS) para os solos estudados na comparação entre o método padrão e o método das pesagens.

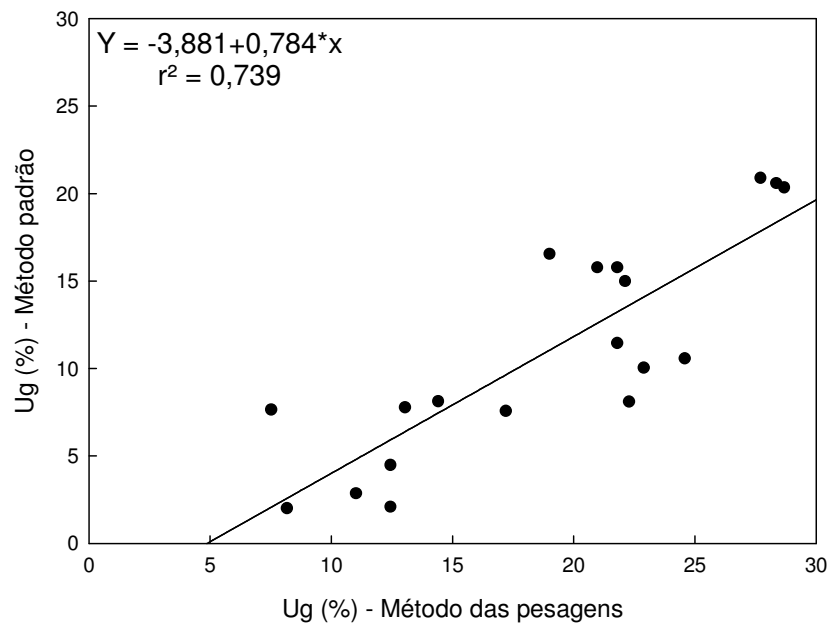


Figura 14 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método das pesagens em todos os percentuais de umidade do S1.

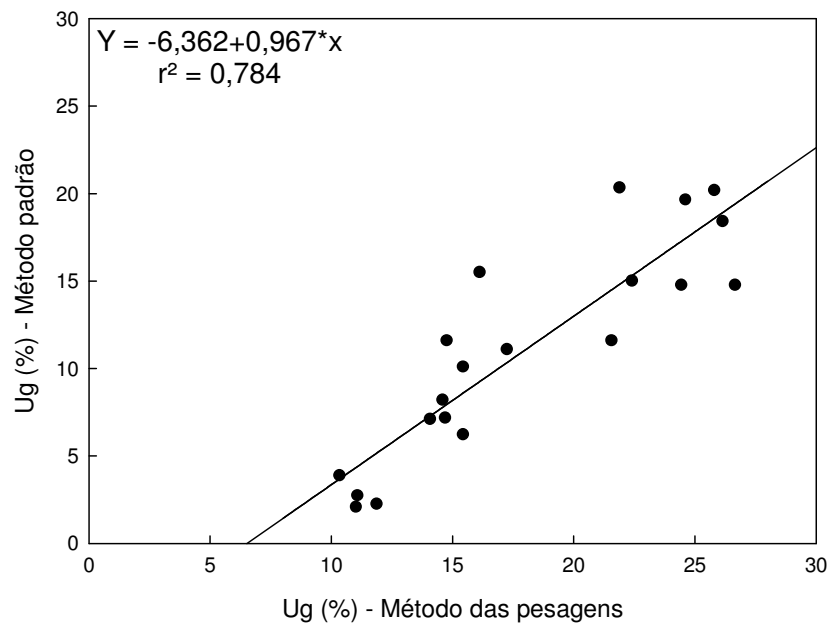


Figura 15 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método das pesagens em todos os percentuais de umidade do S2.

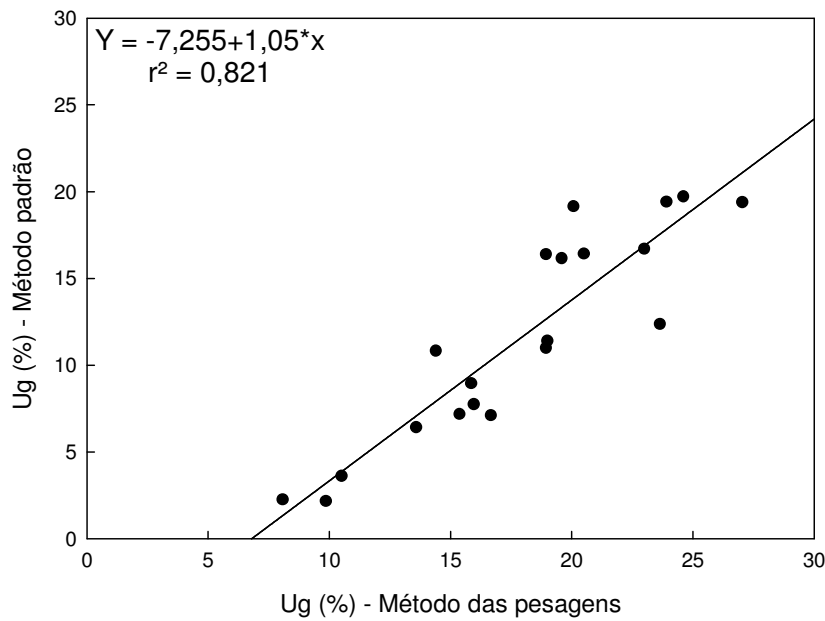


Figura 16 - Comparação entre os valores de umidade gravimétrica (Ug) obtidos através do método da estufa e o método das pesagens em todos os percentuais de umidade do S3.

Tabela 9 – Valores de umidade gravimétrica (%) obtidos com o método padrão e o método das pesagens para os diferentes percentuais de umidade gravimétrica estabelecidos.

	Ug 5%		Ug 10%		Ug 15%		Ug 20%		Ug 25%	
	M0	M3	M0	M3	M0	M3	M0	M3	M0	M3
<b>S1</b>	2,00	12,47	7,61	7,55	11,41	21,83	14,95	22,15	20,54	28,39
	4,26	12,47	8,08	14,44	10,53	24,62	16,51	19,04	19,53	30,03
<b>Média</b>	1,92	8,21	7,53	17,23	8,05	22,32	15,74	21,83	20,85	27,73
	2,73	11,05	7,74	13,07	10,00	22,92	15,73	21,01	20,31	28,72
<b>D padrão</b>	1,32	2,46	0,30	4,98	1,74	1,49	0,78	1,71	0,69	1,18
<b>S2</b>	2,00	11,05	7,07	14,10	10,07	15,46	14,74	24,47	18,38	26,17
	2,17	11,90	6,19	15,46	11,56	14,78	14,74	26,68	20,31	21,92
<b>Média</b>	3,70	10,37	8,16	14,61	11,56	21,58	15,46	16,14	20,16	25,83
	2,63	11,10	7,14	14,73	11,07	17,28	14,98	22,43	19,61	24,64
<b>D padrão</b>	0,94	0,77	0,99	0,69	0,86	3,74	0,42	5,56	1,08	2,36
<b>S3</b>	6,00	13,62	8,91	15,89	10,96	18,97	16,67	23,02	19,11	20,10
	2,08	9,89	7,07	16,70	10,79	14,43	16,11	19,62	19,35	27,07
<b>Média</b>	2,17	8,11	7,14	15,40	12,33	23,67	16,36	18,97	19,68	24,64
	3,42	10,54	7,71	16,00	11,36	19,02	16,38	20,53	19,38	23,94
<b>D padrão</b>	2,24	2,81	1,04	0,66	0,84	4,62	0,28	2,18	0,29	3,54

Tabela 10 - Valores do coeficiente de determinação, dos coeficientes linear e angular, do desvio padrão, do teste t de Student e a significância do teste, ao nível de 95% de probabilidade, para os solos estudados na comparação entre o método da estufa e o método das pesagens.

Tratamentos	r <sup>2</sup>	Coeficientes	Valores	$\rho$	t Student	t tabela	Obs.
<b>St*</b>	0,756	<b>a</b>	-5,150	1,289	-3,994	2,002	S
		<b>b</b>	0,893	0,067	-0,414		NS
<b>S1</b>	0,739	<b>a</b>	-3,881	2,251	-1,724	2,101	NS
		<b>b</b>	0,784	0,110	-0,651		NS
<b>S2</b>	0,784	<b>a</b>	-6,362	2,255	-2,821	2,101	S
		<b>b</b>	0,967	0,120	-0,094		NS
<b>S3</b>	0,821	<b>a</b>	-7,255	2,162	-3,357	2,101	S
		<b>b</b>	1,050	0,116	0,147		NS

\* St= os três solos reunidos.

Na tabela 10, observa-se que o coeficiente de determinação para todas as combinações se mostrou acima de 73%. Também percebe-se que o coeficiente angular foi não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro indicando que  $b=1$ . Portanto, pode-se afirmar que o método das pesagens é um método confiável para a determinação da umidade do solo, visto que não diferiu estatisticamente do método padrão de estufa. Resultados semelhantes foram observados por Filho (1988) onde concluiu que o método das pesagens teve um bom desempenho na determinação da umidade para os três tipos de solos analisados (texturas argilosa, barro arenosa e barro argilosa), e a comparação do método das pesagens com o método gravimétrico padrão, mostrou uma alta correlação, independente do tipo de solo em questão. Este autor ainda relata a facilidade de execução do método, visto que com apenas um frasco e uma pequena balança obteve-se resultados confiáveis.

Apresenta-se como um método com grande potencial de utilização pelos produtores e técnicos para se medir a umidade do solo, visto que é simples e rápido. Além de apresentar um baixo custo e ainda não necessitar de equipamentos sofisticados, podendo ser usado sem restrições para o monitoramento do conteúdo de água no solo para determinar o momento de iniciar a irrigação.

#### 4.2.4 Avaliação do desempenho dos métodos

Os valores do coeficiente de correlação, índice de concordância, índice de desempenho e classe de desempenho para os métodos analisados neste trabalho são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Valores do coeficiente de correlação “r”, índice de concordância “lw”, índice de desempenho “ld” e classe de desempenho para os métodos estudados.

Tratamentos*	r	lw	ld	Classe de desempenho
<b>M1 S1 Tt</b>	0,990	0,991	0,981	Ótimo
<b>M1 S2 Tt</b>	0,989	0,994	0,983	Ótimo
<b>M1 S3 Tt</b>	0,995	0,994	0,989	Ótimo
<b>M2 S1 Tt</b>	0,984	0,987	0,971	Ótimo
<b>M2 S2 Tt</b>	0,987	0,988	0,975	Ótimo
<b>M2 S3 Tt</b>	0,956	0,977	0,934	Ótimo
<b>M3 S1</b>	0,860	0,872	0,750	Bom
<b>M3 S2</b>	0,885	0,913	0,808	Muito bom
<b>M3 S3</b>	0,905	0,933	0,845	Muito bom

\* M1S1Tt= método do forno elétrico com todos os tempos reunidos para o S1; M1S2Tt= método do forno elétrico com todos os tempos reunidos para o S2; M1S3Tt= método do forno elétrico com todos os tempos reunidos para o S3; M2S1Tt= método do forno de micro-ondas com todos os tempos reunidos para o S1; M2S2Tt= método do forno de micro-ondas com todos os tempos reunidos para o S2; M2S3Tt= método do forno de micro-ondas com todos os tempos reunidos para o S3; M3S1= método das pesagens para o S1; M3S2= método das pesagens para o S2; M3S3= método das pesagens para o S3;

Como pode ser observado na tabela 11, o coeficiente de correlação para todas as combinações se mostrou próximo a 1 (um), indicando boa associação entre as variáveis envolvidas na análise. Em relação ao índice de concordância, que fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas, pode-se observar que a concordância é quase perfeita, com valores próximos a 1 (um).

Ainda percebe-se que os desempenhos variaram entre bom, muito bom e ótimo. As prováveis razões para estes resultados, no método das pesagens (M3), se devem a dificuldade na leitura do nível estabelecido no copo. Pois ao misturar a

água destilada à massa de solo forma-se espuma, que pode vir a confundir na leitura, afetando diretamente nos valores encontrados de umidade gravimétrica.

Através destes resultados pode-se afirmar que a metodologia aplicada apresentou resultados consistentes para a maioria dos dados avaliados de umidade gravimétrica, podendo ser esta uma alternativa para estimativa da umidade referente ao método padrão de estufa.

## 5 CONCLUSÃO

Segundo a metodologia utilizada neste estudo e os resultados obtidos, foi possível concluir que:

As amostras de solo apresentaram características físicas distintas, sendo que foram obtidos solos com classe textural argilo arenosa, muito argilosa e, franco argilo arenosa.

Pode-se afirmar que o método do forno elétrico e o método do forno de micro-ondas apresentaram desempenho ótimo quando comparados ao método padrão de estufa. O método das pesagens apresentou desempenho bom e muito bom.

Também concluiu-se que o tempo de 20 minutos para o método do forno elétrico foi eficiente, significando redução no tempo para determinação da umidade, consequentemente redução nos gastos.

Para o método do forno de micro-ondas o tempo de 5 minutos de secagem foi suficiente, não diferindo estatisticamente do método padrão. Aliado a redução no tempo de resposta, ainda pode-se reforçar a facilidade de execução deste método.

O método das pesagens também se mostrou um método confiável na determinação da umidade do solo. Sendo que, suas principais vantagens são o baixo custo e a rapidez na determinação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. E. P. de; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo da irrigação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 528p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2012**. Ed. especial. Brasília: ANA, 2012. 215p. Disponível em: <  
[http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id\\_noticia=11655](http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=11655)  
>. Acesso em: 14 jan. 2013.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**, Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 11-23.

BERNARDI, A. C. de C. et al. **Tecnologias da Embrapa Pecuária Sudeste para agricultura familiar** [Recurso eletrônico] — São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 25p. Disponível em: <  
<http://www.cppse.embrapa.br/servicos/publicacao gratuita/documentos/Documentos75.pdf/view>>. Acesso em: 17 set. 2012.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. — Viçosa: Ed. UFV, 2006. 625p.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos** / "The nature and properties of soils". Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo F<sup>o</sup>. 7<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989. 898p.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm)>. Acesso em: 14 jan. 2013.

CALHEIROS, C. B. M.; ARNDT, E. Comparação de métodos de determinação da umidade do solo para fins de irrigação. **Ciência Agrícola**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 7-14, 1991.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, p. 89-97, 1997.



CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo: Parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM/ Departamento de Engenharia Rural, 2000. 88p. (Caderno Didático nº 4).

CARMO, F. F. et al. Determinação da umidade de um solo franco-siltoso usando forno de microondas. In: INOVAGRI International Meeting & IV WINOTEC Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 2012, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI & WINOTEC, 2012.

COSTA, S. V. **Desenvolvimento e calibração de um mini-tanque evaporimétrico**. 2004. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, RS.

DAKER, A. **Irrigação e drenagem: a água na agricultura**. 3 vol., 7. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1988. 543p.

DAL PRÁ, B. R. **Desenvolvimento de sistema para controle de umidade de solo em pequenas propriedades rurais**. 2009. 66f. Dissertação (Mestrado Profissional do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisas de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FILHO, H. G. Estudo comparativo do método das pesagens e o método gravimétrico padrão para a determinação do teor de umidade do solo. **Anais...** ESALQ, Piracicaba, 1988.

FONSECA, S. O. et al. Avaliação do método do forno elétrico para a determinação de umidade do solo em relação ao método padrão de estufa. IN: XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2009a. **Anais eletrônicos...** [S.l.], 2009. Disponível em:  
<[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2009/anais/arquivos/RE\\_0213\\_0309\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/RE_0213_0309_01.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2012.

FONSECA, S. O. et al. Avaliação do método do forno microondas para a determinação de umidade do solo em relação ao método padrão de estufa. In: XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2009. **Anais eletrônicos...** [S.l.], 2009b. Disponível em: <

[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2009/anais/arquivos/RE\\_0213\\_0306\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/RE_0213_0306_01.pdf) > .  
Acesso em: 10 set. 2012.

ForceSystem – Informações que você merece. 2010. Disponível em:  
<<http://www.forcesystem.com.br/tudo-sobre-forno-eletrico/>>. Acesso em: 12 set.  
2012.

FRANCO, E. M. **Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo, sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de capacitância e extratos de solução.** 2009. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2009.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n. 2, p. 664-668, mar./abr. 2006.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics.** London: Academic Press, 1980. 413 p.

JAMES, L. G. **Principles of farm irrigation system design.** New York: Krieger Publishing Company, 1988. 543 p.

KAISER, D.R. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Centro de Ciências Rurais. **Fundamentos da ciência do solo. Aulas práticas.** Santa Maria, 2010. 112 p.

KLAR, A. E. et al. Determinação da umidade do solo pelo método das pesagens. In: Anais da Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, 1966, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, v. 23, p. 15-30, 1966.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KLAR, A. E. **Irrigação: Frequência e quantidade de aplicação.** São Paulo: Nobel, 1991. 156p.

KLEIN, V. A. **Física do Solo** – Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** 1. ed. Piracicaba, 1995. 497 p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. atual. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 355p.

MIRANDA, E. P. de. et al. Determinação da umidade do solo no forno microondas em diferentes potências. In: II Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação e I Simpósio Brasileiro sobre o uso Múltiplo da Água, 2008, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza, 2008a.

MIRANDA, E. P. de. et al. Influência do tamanho da amostra de solo na determinação da umidade pelo forno de microondas. In: II Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação e I Simpósio Brasileiro sobre o uso Múltiplo da Água, 2008, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza, 2008b.

OLIVEIRA, G. R. de. **Determinação da umidade do solo por radiações de microondas**. 1979. 52f. Tese (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1979.

OLIVEIRA, R. A. de. et al. Determinação da umidade do solo com uso de forno elétrico e balança digital. In: UFV / VIII SIMPOS, 2008, Viçosa, MG, **Anais...** Viçosa, 2008.

PARIZI, A. R. C. **Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob as culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e milho (*Zea mays* L.) na região de Santiago, RS**. 2007. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PEITER, M. X.; CHAUDHRY, F. H.; CARLESSO, R. Programação do manejo da irrigação de milho via modelo de simulação. **Engenharia Agrícola**, v. 19, n. 1, p. 53-63, 1999.

PIRES, R. C. de M. et al. **Métodos e manejo da irrigação**. In: Agrometeorologia como suporte ao manejo de recursos hídricos e preservação de mananciais, Campinas, Instituto Agrônômico, 1999. Disponível em: < [www.ciiagro.org.br/janeladofrusicultor/.../irrigacao.doc](http://www.ciiagro.org.br/janeladofrusicultor/.../irrigacao.doc) >. Acesso em: 14 jan. 2013.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1978. 119p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4ª. ed. ver. e ampliada. Campinas, Fundação Cargil, 1985. vii +466p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

RIGHES, A. A. et al. **Determinação da água no solo e na planta para irrigação**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 2003. 97p.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1998. 236p.

SCHNEIDER, P.; KLAMT, E.; GIASSON, E. **Morfologia do solo: subsídios para caracterização e interpretação de solos a campo**. Guaíba: Agrolivros, 2007. 72p.

SILVA, M. A. da. Equipe Brasil Escola. Disponível em: < <http://www.brasilecola.com/fisica/forno-microondas.htm> >. Acesso em: 12 set. 2012.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 163f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2006.

SOARES, F. C. **Análise da viabilidade da irrigação de precisão na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 2010. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. A; RASSINI, J. B. **Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico**. São Carlos: EMBRAPA-CPPSE. Circular Técnica nº 33, Dezembro, 2002.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p.

TAVARES, M. H. F. et al. Uso do forno de microondas na determinação da umidade em diferentes tipos de solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 3, p. 529-538, jul./set. 2008.

VIELMO, A. L. **Limite superior da retenção da água no solo: método de campo e método de estimativa**. 2008. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

WILLMOTT, C. J.: On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n. 2, p.184-194, 1981.