

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LUGO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL**



TESIS DOCTORAL

Estudio de propiedades hídricas del suelo mediante
medidores de actividad de agua en la zona regable de
Terra Chá

Autora:

Emma María Martínez Pérez
Ingeniera Agrónoma

Directores:

Javier José Cancela Barrio
Dr. Ingeniero Agrónomo

Tomás Serafín Cuesta García
Dr. Ingeniero Agrónomo

Lugo, Junio de 2008

“En lo tocante a la Ciencia, la autoridad de un millar no es superior al humilde razonamiento de una sola persona”
Galileo Galilei (1564-1642). Físico y astrónomo italiano.

AGRADECIMIENTOS

Son varios ya los años pasados desde que recién licenciada me *subí al tren en marcha* para comenzar el largo camino que me ha llevado hasta este momento en que, por fin, he visto *la luz al final del túnel*. Si bien inevitablemente he cambiado y evolucionado, en el fondo sigo teniendo la misma ilusión que antaño por ver realizado mi sueño, intentar (y espero que lograr) ser *doctora*. Durante todo este proceso, he compartido mis buenos (y no tan buenos) momentos con *no* demasiada gente, pero sin duda, la *más importante*. A todos los que me han acompañado y no se han quedado por el camino, mi profundo afecto, respeto y agradecimiento. Gracias por estar ahí y apoyarme cuando más lo necesitaba...sin yo pedirlo.

En primer lugar a mis directores de tesis:

Al Dr. Javier J. Cancela Barrio, no existen suficientes páginas para agradecer tu apoyo *científico* tanto en el inicio de esta tesis como durante todo su desarrollo, sin cuestionarte en ningún momento tu permanencia en su dirección. Son múltiples los artículos buscados, los correos cruzados y los silencios otorgados, los cuales, sin duda, han contribuido favorablemente en su evolución. Gracias por confiar en mí, cuestionarme, y, sobre todo, por darme la *libertad* y el *espacio* que necesitaba. Siempre recordaré nuestras conversaciones y debates sobre diferentes temas de la tesis, los momentos de exasperación compartidos y las *tablas* alcanzadas, y, como no, las salidas a campo tomando muestras y perdiéndonos...aún con GPS. Espero que haya logrado que siempre recuerdes tu primera tesis dirigida...yo, sin duda, no lo olvidaré. Infinitas gracias.

Al Dr. Tomás S. Cuesta García por la bibliografía aportada y por sus innumerables correcciones que, sin duda, han contribuido a que esta tesis sea más rigurosa en la transmisión de información. Siempre he sabido que estabas ahí...no sabes cómo te lo agradezco.

A mi *tercer director*, el Dr. Xan X. Neira Seijo, que me acogió desde un principio haciéndome un huequecito en la subárea de Hidráulica e Hidroloxía. Gracias por darme una oportunidad y por los innumerables informes realizados. Me hubiese gustado que me *acompañaras* hasta el final...

A las Comunidades de Regantes de la zona de Terra Chá, por permitir de forma desinteresada que se pudiera llevar a cabo la toma de muestras en sus parcelas.

Al Dr. Antonio Paz González por permitir la utilización del laboratorio de Edafología de la Universidad de A Coruña para los análisis de las muestras contenidas en esta tesis.

Al Dr. Carlos J. Álvarez López y al Dr. Francisco Maseda Eimil por ayudarme e impulsarme en mis inciertos comienzos en el Tercer Ciclo y en el IBADER. Sin vosotros no habría sido posible.

Al Dr. Jorge Dafonte Dafonte, por su asesoramiento en temas relativos al medidor de actividad de agua y por su participación en un capítulo de esta tesis.

Al Dr. José María Alonso Meijide, por su ayuda en diversos aspectos de manejo del SPSS y conseguir que la investigación resultase *estadísticamente significativa*.

A Iván Rodríguez Costas, Almudena Rodríguez Veiga, y Juan Antonio Valencia Castro, por sus trabajos previos que han servido de apoyo en aspectos considerados en esta tesis.

A mis compañeros del laboratorio de Hidráulica, con todos los que coincidí a través de los años, innumerables gracias por todos esos momentos de silencio otorgados, que permitieron mi concentración en estas y otras palabras. Especial mención a Adolfo Marín López y Fernando J. Souto Jorge, por su asesoramiento en temas de traducción e informática. Gracias por hablarme de temas tan diversos que no incluían mi tesis, habéis sido un *soplo de aire fresco*.

Al Dr. Josep María Villar Mir, del Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria de la Universidad de Lleida, y al Dr. Francesc Ferrer Alegre de “LAB-Ferrer”, por poner a mi disposición tanto el medidor de actividad de agua con control de temperatura como sus conocimientos sobre el mismo. *Gracies per tot*.

Al Dr. Giovanni Pardini y su esposa, la Dra María A. Gispert Negrell, de la Unitat de Ciència del Sòl, Departament Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària, Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Girona, por permitirme experimentar en su psicrómetro. Infinitas gracias por vuestra preocupación y por hacer que mi estancia con vosotros haya resultado *molto bene*.

A mis *compañeros* de estancia en Lleida: Nuria Nieto Bonet por nuestras tertulias vespertinas de laboratorio y al Dr. Francisco Fonseca Salcedo por mostrarme la metodología de funcionamiento empleada en su Universidad para las lecturas psicrométricas.

A mi *compañera* de estancia en Girona, Sandra Torras, por ser mi *contacto con el mundo real* en mis jornadas maratónicas y de aislamiento con el psicrómetro.

A mi FAMILIA...

Al tribunal que, desinteresadamente, ha aceptado analizar y evaluar esta tesis.

Todos vosotros me estáis permitiendo “*hacer de la vida un sueño y de un sueño una realidad*” [Pierre Curie (1859-1906). Físico francés].

Esta tesis ha sido realizada gracias a la concesión de dos becas:

Beca para la realización de “Estadías en el extranjero y en centros españoles situados fuera de la Comunidad Autónoma”. Dirección Xeral de Investigación e Desenvolvemento. Consellería de Innovación, Industria e Comercio. Xunta de Galicia (15/09/05-15/12/05).

Beca Predoctoral de Nueva Adjudicación, con 1ª y 2ª prórroga. Dirección Xeral de Investigación e Desenvolvemento. Consellería de Innovación, Industria e Comercio. Xunta de Galicia (01/10/04-09/04/07).

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xv
Acrónimos	xix
Resumen	1
Abstract.....	2
SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN	3
Capítulo I: Aspectos generales	7
Capítulo II: Descripción de la zona de estudio.....	23
Capítulo III: Fundamentos del estudio del agua en el suelo.....	51
SECCIÓN II. MATERIAL Y MÉTODOS	77
Capítulo IV: Toma de muestras.....	81
Capítulo V: Métodos de medición empleados.....	101
Capítulo VI: Métodos de estimación empleados.....	119
Capítulo VII: Ensayos previos de laboratorio	141
SECCIÓN III. INVESTIGACIÓN Y RESULTADOS	153
Capítulo VIII: Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica	157
Capítulo IX: Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua	247
Capítulo X: Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua	273
Capítulo XI: Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelos: estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” en el NO de España.....	317
Capítulo XII: Eficiencia en la estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” con diferentes metodologías	345
SECCIÓN IV: CONCLUSIONES GENERALES	377

Capítulo XIII: Conclusiones generales	381
SECCIÓN V: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	391
Capítulo XIV: Futuras líneas de investigación	395
SECCIÓN VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	403
Capítulo XV: Referencias bibliográficas	407
SECCIÓN VII: ANEXOS	451
Anexo I: Cartografía de la zona de estudio	455
Anexo II: Fichas de los ensayos realizados.....	461
Anexo III: Protocolos de determinación de propiedades	475
Anexo IV: Elementos constituyentes del WAM	485
Anexo V: Esquema de la investigación.....	493

ÍNDICE DESARROLLADO

Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xv
Acrónimos	xix
Resumen	1
Abstract.....	2
<i>SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN</i>	3
<u>Capítulo I: Aspectos generales.</u>	7
1. Introducción.....	11
2. Objetivos.....	14
3. Estructura de la memoria.....	15
4. Referencias bibliográficas	17
<u>Capítulo II: Descripción de la zona de estudio.</u>	23
Resumen	27
1. Selección del área de estudio. Justificación.....	29
2. Delimitación geográfica	29
3. Orografía.....	30
4. Hidrografía	31
5. Estudio climático	31
5.1. Temperatura.....	31
5.2. Precipitación.....	32
5.3. Viento	33
5.4. Diagrama ombométrico de Gausson.....	34
5.5. Clasificación bioclimática	35
5.5.1. Clasificación de Papadakis	35
5.5.2. Clasificación UNESCO-FAO.....	35
6. Suelos	35
7. Distribución de la utilización de la tierra	36
8. Cultivos.....	36
9. Recursos humanos	37
9.1. Población.....	37
9.2. Distribución por edades.....	38
9.3. Nacimientos y defunciones	39
9.4. Dependencia de la población.....	39
9.5. Ocupación por sectores	40
10. Transformaciones en la agricultura de Terra Chá: La Colonización.....	41
11. Sectores de riego.....	43
12. Modernización del regadío	44

13. Referencias bibliográficas	45
Capítulo III: Fundamentos del estudio del agua en el suelo	51
Resumen	55
1. Introducción	57
2. Composición del suelo	57
3. Estudio del agua del suelo	58
4. Propiedades básicas que influyen en las características hidrodinámicas de los suelos..	59
4.1. Materia orgánica.	59
4.2. Textura	60
4.3. Estructura	60
4.4. Densidad.....	61
4.5. Porosidad.....	61
4.6. Profundidad radicular.....	62
4.7. pH.....	62
4.8. Carbono orgánico	62
5. Estados y contenido del agua en el suelo. Importancia del potencial	62
5.1. Contenido del agua del suelo	62
5.2. Potencial del agua del suelo	64
5.3. Estados del agua en el suelo.....	66
6. Cuantificación del agua en el suelo a través de las propiedades hídricas definitorias ...	67
7. Reserva de agua útil del suelo	67
8. Nivel de agotamiento permisible.....	68
9. Curva de retención de agua	68
10. Medición del potencial de agua en el suelo.....	70
11. Referencias bibliográficas	72
SECCIÓN II. MATERIAL Y MÉTODOS.....	77
Capítulo IV: Toma de muestras	81
Resumen	85
1. Introducción	87
2. Muestreo.....	87
2.1. Selección de los puntos de muestreo.....	87
2.2. Realización del muestreo	88
2.3. Condiciones de transporte	88
2.4. Operaciones previas	88
2.5. Tipos de análisis a realizar	89
2.6. Condiciones de realización	89
2.7. Almacenamiento y conservación de las muestras.....	89
3. Descripción de la totalidad de las muestras	90
3.1. Características generales para la zona de estudio	90
3.2. Características en función del sector considerado	92
3.3. Características en función del tipo de suelo considerado	94
4. Muestras consideradas en los diferentes ensayos.....	96
5. Referencias bibliográficas	97

<u>Capítulo V: Métodos de medición empleados</u>	101
Resumen	105
1. Introducción.....	107
2. Método de referencia: Placa de presión.....	107
2.1. Elementos constituyentes	108
2.2. Principio de funcionamiento	109
2.3. Protocolo de medición.....	109
3. Método de medición: Medidor de actividad de agua	111
3.1. Características principales	111
3.2. Especificaciones	112
3.3. Elementos constituyentes	112
3.4. Principio de funcionamiento	113
3.5. Protocolo de medición.....	113
4. Referencias bibliográficas	114
<u>Capítulo VI: Métodos de estimación empleados</u>	119
Resumen	123
1. Introducción.....	125
2. Funciones de pedotransferencia.....	125
2.1. Fundamentos	125
2.2. Denominaciones	125
2.3. Variables implicadas	126
2.4. Tipos de enfoques.....	126
2.5. Clasificación de las PTFs	126
2.6. Propiedades y características físicas del suelo	128
2.7. Procedimiento de aplicación	129
2.8. Procedimiento de desarrollo de nuevas PTFs.....	130
2.9. Técnicas de desarrollo de nuevas PTFs.....	131
2.10.Ámbito de aplicación.....	131
2.11.Aparataje utilizado.....	131
2.12.Aplicaciones de las PTFs.....	131
3. Aplicaciones informáticas	134
3.1. Fundamentos	134
3.2. Requerimientos.....	134
3.3. Estimaciones realizadas.....	134
3.4. Propiedades predictivas y estimadas	134
3.5. Software disponible	135
4. Referencias bibliográficas	135
<u>Capítulo VII: Ensayos previos de laboratorio</u>	141
Resumen	145
1. Introducción.....	147
2. Protocolo de medición inicial	147
3. Determinación de las propiedades hídricas	150
4. Idoneidad del empleo de un WAM para la determinación de la FC y la AWC	151

5. Referencias bibliográficas	152
SECCIÓN III. INVESTIGACIÓN Y RESULTADOS	153
<u>Capítulo VIII: Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica</u>	157
Resumen	161
1. Introducción	163
2. Psicrómetros de termopar	164
2.1. Definición.....	164
2.2. Clasificación de los psicrómetros. Rango de medida	166
2.2.1. Nonequilibrium	166
2.2.2. Dewpoint	168
2.2.3. Isopiestic.....	169
3. Técnicas de medida, componentes y accesorios	170
3.1. Principio de funcionamiento	170
3.1.1. Técnica psicrométrica	170
3.1.2. Técnica isopiestic	175
3.1.3. Técnica higrométrica.....	175
3.2. Materiales de construcción y diseños.....	176
3.3. Tipos de soldaduras utilizadas	183
3.4. Aparataje para la medición simultánea de varias muestras.....	183
3.5. Registro de salidas	184
4. Ajustes para la puesta en marcha	185
4.1. Limpieza y calibración.....	185
4.2. Tiempo de equilibrio.....	186
4.3. Factores que pueden introducir errores en las lecturas	187
4.4. Instalación en campo.....	188
5. Mediciones en material vegetal.....	188
5.1. Corrección de errores	191
5.2. Mediciones del potencial de agua en hojas.....	194
5.3. Determinación del potencial de agua en tallos, frutos, raíces y semillas.....	197
5.4. Valoración del potencial en el sistema suelo-planta-atmósfera	198
5.5. Medición continuada del potencial de agua.....	199
5.6. Medición del potencial osmótico	200
5.7. Comparación de metodologías en Psicrometría <i>per se</i>	201
5.8. Comparación de la Psicrometría con otras metodologías	204
5.9. Otros estudios.....	207
6. Mediciones realizadas en suelos	208
6.1. Medición separada de potenciales.....	210
6.2. Determinación de las causas de error producidas durante las mediciones	211
6.3. Medición del potencial de agua	214
6.4. Determinación de la conductividad hidráulica insaturada	217
6.5. Comparación de metodologías en Psicrometría <i>per se</i>	218
6.6. Comparación de la Psicrometría con otras metodologías	218
7. Conclusiones	220
8. Referencias bibliográficas	222

Capítulo IX: Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua 247

Resumen	251
1. Introducción y objetivos	253
2. Material y métodos	254
2.1 Descripción del área de estudio	254
2.2 Muestras de suelo y técnicas de análisis de laboratorio	255
2.2.1 Medidor de actividad de agua	257
2.2.2 Placa de presión	258
2.3 Análisis de los datos y procedimientos estadísticos	259
3. Resultados y discusión	261
3.1 Análisis de los datos obtenidos con el medidor de actividad de agua.....	261
3.2 Comparación de metodologías alternativas	264
4. Conclusiones.....	265
5. Referencias bibliográficas	266

Capítulo X: Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua 273

Resumen	277
1. Introducción y objetivos	279
2. Material y métodos	281
2.1. Descripción de las muestras implicadas en el estudio.....	281
2.2. Técnicas de análisis de laboratorio.....	282
2.3. Ajuste de las curvas de retención de agua.....	282
2.4. Factores extrínsecos	282
2.4.1. Material de la cápsula empleada y tiempos de humectación y secado necesarios	283
2.4.2. Factores dependientes de las fluctuaciones de temperatura ambiental.....	284
2.4.2.1. Influencia de la absorción y evaporación de agua.....	285
2.4.2.2. Influencia de la condensación y reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra.....	285
2.4.3. Influencia de la solución de calibración empleada.....	286
2.5. Factores intrínsecos	286
2.5.1. Influencia de la temperatura a la que se realizan las lecturas del potencial.....	286
2.5.2. Influencia de la humedad relativa en el compartimento del WAM.....	287
2.5.3. Influencia del potencial osmótico.....	287
2.5.4. Influencia del ventilador del WAM.....	287
3. Resultados y discusión	287
3.1. Tiempo de humectación	287
3.2. Tiempo de secado.....	289
3.3. Influencia de la evaporación y absorción de agua.....	291
3.4. Influencia de la condensación y reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra	292
3.4.1. Influencia de la condensación.....	292

3.4.2. Influencia de la reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra	294
3.5. Influencia de la solución de calibración empleada	295
3.6. Influencia de la temperatura ambiental y la temperatura de lectura	296
3.7. Influencia de la humedad relativa en el compartimento del WAM	302
3.8. Influencia del potencial osmótico	303
3.9. Influencia del ventilador del WAM	304
3.10. Tiempos empleados en la realización de las lecturas	304
3.11. Reducción del tiempo de obtención del PWP en función de los factores considerados	306
4. Conclusiones y recomendaciones prácticas	308
5. Referencias bibliográficas	310

Capítulo XI: Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelos: estimación de “*hydrolimits*” en el NO de España.....

Resumen	321
1. Introducción y objetivos	323
2. Material y métodos	325
2.1. Tipos de suelo y técnicas de análisis de laboratorio	325
2.2. Ajuste de los datos observados	326
2.3. Software utilizado	326
2.4. Funciones de pedotransferencia de partida	327
2.5. Análisis estadístico	327
2.6. Análisis de incertidumbre	328
3. Resultados y discusión	329
3.1. Evaluación y validación de los distintos modelos en la determinación del PWP y la FC mediante <i>SOILPAR 2.00</i>	329
3.2. Evaluación y validación de las PTFs propuestas por Soto <i>et al.</i> (2001)	331
3.3. Proposición de PTFs específicas para la zona de estudio	332
3.3.1. Para la totalidad de la zona de estudio	332
3.3.2. Proposición de PTFs específicas según diversas categorías	335
3.3.2.1.1. En función del tipo de suelo	335
3.3.2.1.2. En función de la profundidad de toma de muestras	336
3.3.2.1.3. En función de la tipología del cultivo	336
4. Conclusiones	338
5. Referencias bibliográficas	339

Capítulo XII: Eficiencia en la estimación de “*hydrolimits*” con diferentes metodologías.....

Resumen	349
1. Introducción y objetivo	351
2. Material y métodos	352
2.1. Zona de estudio y tipos de suelo	352
2.2. Análisis de la eficiencia	353
2.3. Metodologías empleadas en la determinación de las propiedades hídricas	354
2.4. Parámetros empleados según metodologías	356

3.	Resultados y discusión	356
3.1.	Determinación de los componentes de la eficiencia	356
3.1.1.	Cálculo del esfuerzo	356
3.1.1.1.	Medidor de actividad de agua.....	356
3.1.1.2.	Placa de presión.....	356
3.1.1.3.	Propiedades de los suelos	357
3.1.1.4.	SOILPAR 2.00.....	358
3.1.1.5.	Funciones de pedotransferencia.....	358
3.1.2.	Análisis del esfuerzo.....	360
3.1.3.	Cálculo y análisis del coste en función del coste del operario y de los análisis.....	361
3.1.4.	Cálculo y análisis de la calidad de la información	364
3.2.	Cálculo y análisis de la eficiencia	366
4.	Conclusiones.....	371
5.	Referencias bibliográficas	372
SECCIÓN IV: CONCLUSIONES GENERALES		377
<u>Capítulo XIII: Conclusiones generales.....</u>		<u>381</u>
1.	Conclusiones científicas	385
1.1.	Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica	385
1.2.	Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua.....	385
1.3.	Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua.....	386
1.4.	Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelo: estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” en el NO de España	387
1.5.	Eficiencia en la estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” con diferentes metodologías	388
2.	Conclusiones personales.....	389
SECCIÓN V: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....		391
<u>Capítulo XIV: Futuras líneas de investigación.....</u>		<u>395</u>
1.	Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica	399
2.	Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua.....	399
3.	Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua	400
4.	Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelo: estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” en el NO de España	401
5.	Eficiencia en la estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” con diferentes metodologías	402
SECCIÓN VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		403

Capítulo XV: Referencias bibliográficas	407
SECCIÓN VII: ANEXOS	451
<u>Anexo I: Cartografía de la zona de estudio</u>	455
<u>Anexo II: Fichas de los ensayos realizados</u>	461
1. Ficha WAM: Metodología convencional	465
2. Ficha WAM: Metodología alternativa	467
3. Ficha WAM: Análisis factores condensación- evaporación-espacio de cabeza-temperatura.....	468
4. Ficha WAM: Análisis factores tiempos de humectado y secado, material de la cápsula a emplear y tiempos de lecturas	469
<u>Anexo III: Protocolos de determinación de propiedades</u>	475
1. Protocolo para la determinación de la densidad aparente	479
1.1. Material requerido	479
1.2. Procedimiento	479
2. Protocolo para el análisis textural	479
2.1. Material requerido	480
2.2. Procedimiento	480
3. Referencias bibliográficas	481
<u>Anexo IV: Elementos constituyentes del WAM</u>	485
1. Vista frontal del WP4	489
2. Vista posterior del WP4	489
3. Vista inferior del bloque que se dispone como cierre del compartimento de lectura ..	490
4. Referencias bibliográficas	490
<u>Anexo V: Esquema de la investigación</u>	493

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla II.1. Distribución de superficies y población según ayuntamientos.....</i>	30
<i>Tabla II.2. Temperaturas medias mensuales y amplitudes térmicas de la serie 1985-2005.....</i>	32
<i>Tabla II.3. Precipitaciones medias mensuales de la serie 1985-2005</i>	32
<i>Tabla II.4. Frecuencia y velocidad del viento según direcciones.....</i>	33
<i>Tabla II.5. Tiempo en que se mantiene la dirección del viento (%).....</i>	34
<i>Tabla II.6. Distribución de la utilización de la tierra por ayuntamientos (ha).....</i>	36
<i>Tabla II.7. Distribución de las tierras según cultivo (ha)</i>	37
<i>Tabla II.8. Distribución de los cultivos (ha).....</i>	37
<i>Tabla II.9. Evolución de la población (hab).....</i>	38
<i>Tabla II.10. Evolución de la población por edad y sexo (hab).....</i>	38
<i>Tabla II.11. Nacimientos y defunciones según ayuntamientos (hab)</i>	39
<i>Tabla II.12. Índice de dependencia senil.....</i>	39
<i>Tabla II.13. Número y tipología de la actividad desarrollada por ayuntamiento.....</i>	40
<i>Tabla II.14. Ocupación por sectores</i>	40
<i>Tabla II.15. Características de los sectores resultantes de la Colonización.....</i>	44
<i>Tabla IV.1. Características físicas y químicas de los suelos analizados</i>	90
<i>Tabla IV.2. Características físicas y químicas de los suelos en función del sector considerado</i>	92
<i>Tabla IV.3. Características físicas y químicas en función de la tipología de suelo.....</i>	94
<i>Tabla VI.1. Diferentes combinaciones de las variables predictoras/estimadas.....</i>	127
<i>Tabla VII.1. Niveles de humectación.....</i>	148
<i>Tabla VIII. 1. Materiales de construcción de los TCPs</i>	178
<i>Tabla VIII.2. Principales causas de error en el uso de TCPs.....</i>	187

Tabla VIII.3. <i>Aplicación de TCPs en especies vegetales</i>	189
Tabla VIII.4. <i>Comparación de diferentes metodologías en su aplicación a material vegetal</i>	202
Tabla VIII.5. <i>Aplicación de TCPs en suelos</i>	208
Tabla VIII.6. <i>Comparación de diferentes metodologías en su aplicación a suelos</i>	219
Tabla IX.1. <i>Distribución de las muestras según tipo de suelo y cultivo</i>	257
Tabla IX.2. <i>Resumen estadístico de las variables del suelo</i>	257
Tabla IX.3. <i>Resumen de los tiempos requeridos para la estimación del PWP con la PP y el WAM, de acuerdo a las dos metodologías utilizadas</i>	265
Tabla X.1. <i>Características físicas y químicas de los suelos analizados</i>	281
Tabla X.2. <i>Estabilización del peso de las muestras según tiempos de secado y porcentaje de humedad</i>	289
Tabla X.3. <i>Variación del potencial entre cápsulas sin sellar y selladas para cada porcentaje de humedad</i>	292
Tabla X.4. <i>Variación del potencial entre las cápsulas a temperatura ambiente y a temperatura controlada</i>	293
Tabla X.5. <i>Variación del potencial entre la cápsula y el vaso ambos sellados y a temperatura ambiente</i>	294
Tabla X.6. <i>Variación del potencial entre cápsulas medidas a diferente temperatura</i>	297
Tabla X.7. <i>Valores de la amplitud del equilibrio dinámico en función de la HR interior y exterior del compartimento de lectura</i>	303
Tabla X.8. <i>Tiempos medios empleados en la obtención del potencial en función del tiempo de humectado considerado y material de las cápsulas empleadas</i>	306
Tabla X.9. <i>Tiempos requeridos en función de la metodología y el dispositivo utilizado para 24 muestras</i>	308
Tabla XI.1. <i>Características físicas de los 24 suelos analizados</i>	325
Tabla XI.2. <i>Métodos disponibles en SOILPAR 2.00</i>	326
Tabla XI.3. <i>Estadísticos descriptivos para el PWP de los modelos disponibles en el software SOILPAR 2.00 para el WAM y la PP</i>	330

Tabla XI.4. Estadísticos descriptivos de la aplicación de las ecuaciones de Soto et al. (2001)	331
Tabla XI.5. PTFs propuestas para la determinación del PWP y FC para ambos métodos.....	333
Tabla XI.6. Estadísticos descriptivos de las regresiones realizadas para la determinación del PWP con el WAM y la PP.....	334
Tabla XI.7. PTFs propuestas para la determinación de la AWC a partir de la metodología combinada PP-WAM.....	335
Tabla XI.8. PTFs propuestas para la estimación de los hydrolimits en función de los distintos subgrupos considerados.....	337
Tabla XII.1. Características físicas de los 24 suelos analizados	352
Tabla XII.2. Características de la PTF propuesta por Soto et al. (2001).....	354
Tabla XII.3. Características de las PTFs específicas propuestas.....	355
Tabla XII.4. Tiempo necesario en las determinaciones realizadas en la PP.....	357
Tabla XII.5. Tiempo necesario en la determinación de las propiedades descriptivas de los suelos	357
Tabla XII.6. Tiempo necesario empleando SOILPAR 2.00	358
Tabla XII.7. Tiempo necesario empleando PTFs	358
Tabla XII.8. Coste de los métodos considerando la realización externa de los análisis de las muestras	362
Tabla XII.9. Calidad de la información en función de las diferentes metodologías.....	365

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura I.1. Estructura de la memoria.....</i>	16
<i>Figura II.1. Ayuntamientos integrantes de la Comarca de Terra Chá</i>	29
<i>Figura II.2. Diagrama ombrométrico de Gaussen.....</i>	34
<i>Figura II.3. Localización de los núcleos de colonización.....</i>	42
<i>Figura III.1. WRC en función de las propiedades del suelo</i>	69
<i>Figura III.2. Efecto de las muestras alteradas en la WRC</i>	70
<i>Figura IV.1. Distribución del tipo de suelo en función del sector</i>	93
<i>Figura IV.2. Distribución del tipo de cultivo en función del sector.....</i>	94
<i>Figura IV.3. Distribución del tipo de cultivo en función del tipo de suelo</i>	96
<i>Figura V.1. Olla extractora</i>	108
<i>Figura V.2. Placa porosa con muestras durante el periodo de saturación o humectación ...</i> <i>.....</i>	110
<i>Figura V.3. WAM empleado en las determinaciones psicrométricas.....</i>	111
<i>Figura VI.1. Esquema de generación de FTPs.....</i>	130
<i>Figura VII.1. WRC de la muestra C15.....</i>	150
<i>Figura VII.2. Comparación de las dos lecturas realizadas para la determinación de la FC y la AWC.....</i>	151
<i>Figura VIII.1. Elementos estructurales de TCPs “simple junction” (A) y “double junction” (B).....</i>	165
<i>Figura VIII.2. Comparación del TCP de Spanner frente al de Richards y Ogata</i>	167
<i>Figura VIII.3. Efectos termoeléctricos producidos en un TCP</i>	171
<i>Figura VIII.4. Disposición del agua condensada en los alambres y en la unión del termopar</i>	173
<i>Figura IX.1. Localización de la zona de estudio.....</i>	255
<i>Figura IX.2. Red de muestreo de suelo.....</i>	256

Figura IX.3. Repetibilidad en la estimación del PWP mediante el empleo de un WAM de acuerdo a la metodología inicial 261

Figura IX.4. Comparación del PWP obtenido a partir de la metodología inicial y de la metodología alternativa para la primera repetición (a) y la segunda repetición (b)..... 262

Figura IX.5. Tiempo empleado en cada muestra con la metodología inicial y la metodología alternativa para la determinación del PWP, para la primera repetición (a) y la segunda repetición (b)..... 263

Figura IX.6. Método de la PP vs. método del WAM para la estimación del PWP..... 264

Figura X.1. PWP en función del tiempo de humectación considerado..... 288

Figura X.2. Variación del PWP en función del tiempo de secado y del material de la cápsula considerados 290

Figura X.3. PWP obtenido con 8 y 24 horas de secado para diferentes materiales..... 290

Figura X.4. Variación del potencial obtenido entre cápsulas sin sellar y selladas en función del porcentaje de humedad 291

Figura X.5. Variación del potencial obtenido entre cápsulas sellada a temperatura ambiente y a temperatura controlada en función del porcentaje de humedad..... 293

Figura X.6. Variación del potencial obtenido entre la cápsula y el vaso en función del porcentaje de humedad 294

Figura X.7. Influencia de la determinación del PWP empleando como solución de calibración cloruro potásico 0,5 y 0,1 m 295

Figura X.8. Variación del potencial en función de los porcentajes de humedad por efecto de la temperatura 296

Figura X.9. WRCs en función de la temperatura 298

Figura X.10. Variación del PWP en función de la temperatura de las lecturas realizadas...
 299

Figura X.11. Comparación del PWP obtenido con la PP en función del tiempo de equilibrio y la presión considerados..... 299

Figura X.12. Comparación del PWP obtenido con la PP y con el WAM sin control de temperatura..... 300

Figura X.13. Comparación del PWP obtenido con la PP y con el WAM con control de temperatura..... 301

Figura X.14. Comparación del PWP obtenido para cada una de las dos condiciones empleando los WAMs con y sin control de temperatura.....	302
Figura X.15. Tiempos medios para la obtención de la lectura del potencial con el WP4-T.....	305
Figura X.16. Tiempos empleados en las diferentes etapas según los protocolos seguidos y la metodología empleada por muestra.....	307
Figura XI.1. Relación entre el contenido de agua en el PWP obtenido experimentalmente y el estimado mediante modelo de regresión de Soto et al. (2001), empleando a) WAM y b) PP.....	332
Figura XI.2. Relación entre el contenido de agua en el PWP obtenido experimentalmente y el obtenido mediante regresión lineal múltiple “por pasos” para a) WAM y b) PP.....	334
Figura XII.1. Análisis del esfuerzo demandado para la obtención del PWP en función de las diferentes metodologías empleadas.....	360
Figura XII.2. Análisis del esfuerzo demandado para la obtención de la FC en función de las diferentes metodologías empleadas.....	360
Figura XII.3. Análisis del esfuerzo demandado para la obtención de la AWC en función de las diferentes metodologías empleadas.....	361
Figura XII.4. Análisis de los costes demandados para la obtención del PWP en función de las diferentes metodologías empleadas.....	363
Figura XII.5. Análisis de los costes demandados para la obtención de la FC en función de las diferentes metodologías empleadas.....	364
Figura XII.6. Análisis de los costes demandados para la obtención de la AWC en función de las diferentes metodologías empleadas.....	364
Figura XII.7. Análisis de la calidad de la información en la obtención del PWP en función de las diferentes metodologías.....	365
Figura XII.8. Análisis de la calidad de la información en la obtención de la FC en función de las diferentes metodologías.....	366
Figura XII.9. Análisis de la calidad de la información en la obtención de la AWC en función de las diferentes metodologías.....	366
Figura XII.10. Eficiencias en la determinación del PWP según metodologías.....	367
Figura XII.11. Eficiencias en la determinación de la FC según metodologías.....	368
Figura XII.12. Eficiencias en la determinación de la AWC según metodologías.....	368

Figura XII.13. Comparación de la desviación típica vs. coste análisis para la totalidad de los métodos y las tres propiedades consideradas 369

Figura XII.14. Comparación del tiempo invertido vs. coste análisis para los métodos predictivos en la obtención del PWP 369

Figura XII.15. Comparación del tiempo invertido vs. coste análisis para la totalidad de los métodos en la obtención de la AWC 370

Figura XII.16. Influencia del tamaño muestral en la aplicación sobre el esfuerzo según métodos..... 370

ACRÓNIMOS

Las abreviaturas de los conceptos técnicos se fundamentan en las empleadas internacionalmente, correspondientes al término en inglés.

- AF:** Contenido en arena fina (%).
AG: Contenido en arena gruesa (%).
ANN: Redes neuronales (*artificial neural network*).
ARC: Contenido en arcilla (%).
ARE: Contenido en arena (%).
AWC: Reserva de agua útil (*available water content*) (cm^3/cm^3).
CCRR: Comunidades de regantes.
CHN: Confederación Hidrográfica del Norte.
CO: Contenido en carbono orgánico (%).
CRM: Coeficiente de masa residual (*coefficient of residual mass*).
DAP: Densidad aparente (gr/cm^3).
DN: Dosis neta (cm^3/cm^3).
DHM-S: Demarcación Hidrográfica de Miño-Sil.
DMA: Directiva Marco al Agua.
EF: Eficiencia del modelo (*modelling efficiency*).
FC: Capacidad de campo (*field capacity*) (cm^3/cm^3).
FF: Fracción fina (%).
FG: Fracción gruesa (%).
HR: Humedad relativa (%).
IGE: Instituto Galego de Estadística.
INC: Instituto Nacional de la Colonización.
IRYDA: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario.
LF: Contenido en limo fino (%).
LG: Contenido en limo grueso (%).
LIM: Contenido en limo (%).
MAPA: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
ME: Error medio (*mean error*).
MO: Contenido en materia orgánica (%).
NN: Redes neuronales (*neural network*).
PH_A: pH en agua.
PH_CL: pH en cloruro potásico 1 M.
PHC: Planes Hidrológicos de Cuenca.
PNR: Plan Nacional de Regadíos.
PP: Placa de presión de Richards (*pressure plate*).
PSD: Distribución del tamaño de partícula (*particle size distribution*).
PTF: Función de pedotransferencia (*pedotransfer function*).
PWP: Punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (cm^3/cm^3).
RMSE: Raíz del error cuadrático medio (*root mean square error*).
SAU: Superficie agraria útil (ha).
SIG: Sistema de Información Geográfica.
SEIASA: Sociedad Estatal de Infraestructuras Agrarias.
TCP: Psicrómetro de termopar (*thermocouple psychrometer*).

WAM: Medidor de actividad de agua (*water activity meter*).

WRC: Curva de retención de agua (*water retention curve*).

Z: Profundidad radicular (cm).

RESUMEN

Un elemento básico en la gestión del agua es el conocimiento de los recursos hídricos y las actividades de ellos derivadas. En este sentido, la agricultura y el regadío, se encuentran íntimamente relacionados, demandándose un uso más racional y eficiente, adecuado a las demandas del cultivo. Una correcta programación de riegos deberá responder tanto a criterios técnicos como económicos, teniendo en todo momento presente el sistema suelo-planta-atmósfera. En este sentido, la cuantificación y el seguimiento del agua en el suelo se presentan como un aspecto esencial en la gestión eficiente del agua de riego.

El objetivo planteado en esta investigación es el estudio, y por derivación, la determinación y estimación/predicción de las propiedades hídricas del suelo, en concreto los denominados “*hydrolimits*”, capacidad de campo (FC), punto de marchitamiento permanente (PWP) y reserva de agua útil (AWC), empleando medidores de la actividad de agua (WAMs). Se selecciona, para la aplicación de esta tecnología, la zona regable de Terra Chá por ser una de las tres comarcas regables de Galicia, con una clara tradición tanto agrícola como ganadera.

Para el establecimiento de las hipótesis iniciales de trabajo con el WAM se realiza una revisión histórica de los psicrómetros (TCPs), detallando aspectos de importancia tales como la nomenclatura existente, clasificación, fundamentos teóricos y aplicaciones. Se presenta como un dispositivo adecuado, rápido y fiable en la obtención del PWP, no obstante, su idoneidad en la obtención de la FC, y la AWC recomienda el empleo de una metodología complementaria y/o de referencia, la placa de presión (PP), estableciéndose de esta forma una metodología combinada PP-WAM para la determinación de los “*hydrolimits*”. Con el WAM, se propone un protocolo de medición alternativo, frente al inicialmente considerado, duplicando el número de muestras examinadas y reduciendo el tiempo total de lectura a la mitad frente a la PP. En un análisis del protocolo propuesto, se observan, determinan, analizan y cuantifican los factores tanto extrínsecos como intrínsecos al WAM influyentes en la cuantificación del potencial de agua, y, por derivación, sobre el PWP. De esta forma, se propone un protocolo de medición que aporta lecturas rápidas y confiables.

Como método alternativo a la determinación por métodos indirectos, se proponen y aplican dos tipologías de métodos estimativos/predictivos. En una vertiente se consideran funciones de pedotransferencia (PTFs) a través de modelos tanto nacionales como internacionales, estos últimos mediante la aplicación informática *SOILPAR 2.00*, analizando la idoneidad de su aplicación al área considerada. Por otro lado, se generan PTFs específicas, tanto generales para la zona de estudio, como adecuadas en función de tres categorías: tipología de suelo, cultivo y profundidad radicular. En la totalidad de las casuísticas se parte de la información aportada por el WAM y se complementan con la PP. Los resultados aportados indican la idoneidad de emplear PTFs lo más específicas para la zona de estudio considerada. Finalmente, se analiza la eficiencia de los métodos, tanto indirectos como estimativos/predictivos considerados en el estudio, fundamentándose en criterios tanto económicos como de esfuerzo. Todo ello permite la determinación de los “*hydrolimits*” siguiendo ambas vertientes, pero, en todo caso, fundamentándose en el empleo y aplicación de un WAM a la zona de estudio.

ABSTRACT

Knowing water resources and water-resources activities is essential to water management. In this sense, agriculture and irrigation are closely related and call for a more rational and efficient use of water that meets crop requirements. Proper irrigation scheduling must be based on technical and economic criteria and must consider the soil-plant-atmosphere continuum. Accordingly, quantifying and monitoring soil water is a key element in efficient irrigation water management.

The objective of this research is to analyze and, consequently, to determine and estimate/predict soil hydraulic properties and, particularly, soil hydrolimits, field capacity (FC), permanent wilting point (PWP) and available water content (AWC) by using water activity meters (WAMs). The area chosen for the application of the technology is the Terra Cha Irrigation District. Terra Cha is one of the three irrigation districts in Galicia and has a strong agricultural and farming tradition.

To define the initial hypotheses of the research, a historical review of thermocouple psychrometers (TCPs) was conducted. The review detailed a number of relevant aspects, such as the nomenclature, classification, theoretical fundamentals and uses of TCPs. TCPs are suitable, fast and reliable devices to measure PWP. However, the suitability of TCPs for the determination of FC and AWC recommends the use of a supplementary/reference method such as the pressure plate (PP). Hence, a combined PP-WAM method was established to determine hydrolimits. For WAM, an alternative measurement protocol was proposed. The alternative protocol tested twice the number of samples and reduced total reading time as compared to PP. From the analysis of the proposed protocol, the external and internal WAM factors affecting the quantification of water potential and, consequently, PWP, were observed, determined, analyzed and quantified. The measurement protocol proposed provided fast and reliable readings.

Two types of estimation/prediction methods were proposed and used as an alternative to the determination of hydrolimits using indirect methods. One of the approaches used pedotransfer functions (PTFs) and comprised models developed at the national and international levels. International models used *SOILPAR* 2.00 software and analyzed the suitability of the model for the area considered. In addition, specific PTFs were developed for the study area. Some PTFs were general for the study area while other PTFs were developed according to three categories: soil type, crop type and rooting depth. In all cases, WAM data were used as input data and complemented with PP data. The results demonstrate the suitability of the most specific PTFs for the study area considered. Finally, the efficiency of the indirect or estimation/prediction methods considered was tested based on economic and effort criteria. The use of the described methods enables the determination of hydrolimits following both approaches and using WAMs in the study area.

I

INTRODUCCIÓN

SECCIÓN

I

ASPECTOS GENERALES

CAPÍTULO

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

“Un científico debe tomarse la libertad de plantear cualquier cuestión, de dudar de cualquier afirmación, de corregir errores”
Julius Robert Oppenheimer (1904-1967). Físico estadounidense.

ÍNDICE

1. Introducción.....	11
2. Objetivos.....	14
3. Estructura de la memoria.....	15
4. Referencias bibliográficas	17

1. Introducción¹.

Desde épocas ancestrales el hombre ha tratado de controlar el agua, elemento considerado desde el punto de vista biológico, imprescindible para la vida humana, animal y vegetal, y desde el punto de vista económico, fuente de riqueza y desarrollo social. Conjuntamente con el suelo, es el recurso más importante para la producción de alimentos y la base del desarrollo rural, distribución de la población en el territorio y la conservación del medioambiente (Del Campo, 2003).

En un sistema suelo-planta-atmósfera, donde en el siglo XXI resulta evidente el cambio climático existente (Martín de Santa Olalla, 2001) provocando la progresiva desertificación, el regadío se presenta como herramienta de trabajo obligada. La presencia de tierras secas, provoca la existencia de espacios en los que la interacción clima-recursos naturales-hombre se mantienen en precario equilibrio, generándose sistemas especialmente sensibles a la erosión del suelo, procesos de desertificación y cambio climático. Todo ello da lugar a un “círculo” que es preciso reestructurar. El concepto de desertificación es un término amplio que engloba tres conceptos fundamentales: falta de agua dulce, degradación del suelo y pérdida de diversidad biológica, tratándose de una de las amenazas más implacables del mundo actual (López, 2001).

No obstante, el ámbito del regadío no queda relegado exclusivamente a zonas áridas, tratándose de una práctica comúnmente utilizada y encontrándose históricamente unido al desarrollo de las culturas de las grandes civilizaciones mediterráneas, aprovechando las condiciones favorables de luz y calor, y fomentándose de esta forma el regadío en España (MAPA, 2002). No debe considerarse como un aspecto aislado, sino como un elemento constituyente de la “gestión del agua”. Dentro del entorno del agua vinculada a la agricultura, la gestión se caracteriza por la acción de adecuar demandas y recursos, en cantidad y calidad, para lograr su pervivencia y la de sus usos de forma compatible con la conservación del medio ambiente (Martín de Santa Olalla, 2005).

En este contexto, el RD 329/2002² considera que “*la contribución de los regadíos al valor de la producción final agraria, a la productividad y competitividad de las explotaciones, al empleo directo y en la agroindustria, a la balanza comercial agraria y a la ocupación del territorio, son decisivos para la economía agraria y la vida rural*”. En el medio rural inciden todos aquellos aspectos necesarios que permitan una vida digna, los cuales deben perdurar (Llorente, 2003). El agua es uno de ellos.

La Ley de aguas (Ley 29/1985 modificada)³ define a este recurso como “*un bien escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las*

¹ En este capítulo se presenta y describe el marco general de la investigación. En cada uno de los capítulos de la memoria se incluye una introducción específica al tema tratado en el mismo.

² Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se prueba el Plan Nacional de Regadíos. BOE 27/04/2002, nº 101, p: 15558.

³ Ley 29/1985 de aguas modificada por la Ley 42/94 de 30 de diciembre, RD Ley 6/1995 de 14 de julio, Ley 9/1996 de 15 de enero, Ley 13/1996 de 3 de diciembre, Ley 11/199 de 21 de abril y Ley 46/1999 de 13 de diciembre.

actividades económicas; es irremplazable, no ampliable por la mera voluntad del hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos". Se trata de un recurso natural cuyo disfrute y protección compete a los poderes públicos. Al Estado compete el establecimiento de las bases y coordinación de la planificación general de la actividad económica (art. 149.1.3ª de la Constitución Española)⁴ y, derivado de ello, el establecimiento de la legislación necesaria para una correcta Planificación Hidrológica. Su competencia desaparece en aquellas cuencas que discurran por el territorio de una sola Comunidad Autónoma. Por ello, el Estado o la Comunidad Autónoma son los encargados de la Planificación Hidrológica y el establecimiento de la legislación específica a tal efecto. En España, la legislación en materia de aguas lleva modificándose desde hace años hasta hoy en día. En la actualidad, la Directiva Marco del Agua⁵, el Plan Hidrológico Nacional⁶, el Plan Nacional de Regadíos⁷ y en menor escala territorial, los Planes Hidrológicos de Cuenca⁸, coordinan y complementan sus objetivos en la "política del agua".

La Directiva Marco establece que los Estados miembros deben "determinar todas las cuencas hidrográficas que se encuentran en su territorio y asignarlas a distritos hidrográficos". En España la organización se basa en las Confederaciones Hidrográficas, (RD125/2007)⁹, quedando asentadas en el ámbito de actuación de la *Confederación Hidrográfica del Norte* (CHN) las *Demarcaciones Hidrográficas Miño-Limia y Norte*.

Según establece el RD 266/2008¹⁰, la Confederación Hidrográfica del Norte se divide en dos nuevas confederaciones: la *Confederación Hidrográfica del Miño-Sil* y la *Confederación Hidrográfica del Cantábrico*. Este mismo Real Decreto dispone que las *Demarcaciones Hidrográficas del Miño-Limia y Norte* pasen a denominarse *Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil* (DHM-S) y *del Cantábrico*, respectivamente.

La DHM-S abarca a las grandes superficies regables de Galicia, Terra Chá, Val de Lemos y A Limia. La comarca de Terra Chá destaca por tratarse de una zona con gran tradición ganadera y agrícola y que actualmente se está viendo sometida a un proceso de "modernización de las infraestructuras de distribución y aplicación de agua de riego para racionalizar el uso de recursos, reducir la contaminación de origen agrario de las aguas superficiales y subterráneas y promover innovaciones de los sistemas de riego para reducir los consumos de agua" (RD 329/2002).

⁴ <http://www.gva.es/cidaj/cas/c-normas/constitucion.pdf>

⁵ Directiva 2000/60/CE de 23 de octubre de 2000. DOCE 22/12/2000. nº L 327, 1-72.

⁶ Ley 10/2001 de 5 de julio de 2001. BOE 06/06/200, nº 161. p: 24228.

⁷ Real Decreto 392/2002 de 5 de abril de 202. BOE 27/04/2002, nº 101, p: 15558.

⁸ Real Decreto 1664/1998 de 24 de julio de 1998. BOE 11/09/1998, nº 191, p: 27296.

⁹ Real Decreto 125/2007 de 2 de febrero de 2007. BOE 03/02/2007, nº 30, p: 5118.

¹⁰ Real Decreto 166/2008 de 22 de febrero de 2008. BOE 12/03//2008, nº 62, p: 14696.

Toda gestión eficiente del regadío es esencial que se fundamente en el seguimiento y medida del agua en el suelo, al influir en el estado hídrico del cultivo. La determinación de la eficiencia de la técnica de riego demandará el conocimiento de los recursos necesarios y los realmente utilizados (Bielsa y Duarte, 2000). En esta circunstancia, uno de los elementos más relevantes de una correcta programación de riegos, que indique el momento y la cantidad de agua a aplicar (Campbell y Campbell, 1982), es la determinación y, en algunos casos, la estimación del contenido de agua en los suelos (Villar y Ferrer, 2005).

El conocimiento de la capacidad de retención de un suelo es una característica hidrofísica que se puede describir a través de la dependencia entre el contenido de agua y el potencial, permitiendo caracterizar muchos de los procesos presentes en el suelo tal como la infiltración, el drenaje, el movimiento de solutos y, como no, la disponibilidad de agua para la plantas (Walczack *et al.* 2006). Su cuantificación viene determinada por el conocimiento de dos propiedades hídricas o hidráulicas (Ozier-Lafontaine *et al.*, 1998; Deuchars *et al.*, 1999; Cousin *et al.*, 2003; Christensen, 2005), consideradas hidrodinámicas (Tournebize *et al.*, 2004), la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y el punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP), denominadas internacionalmente “*hydrolimits*”. Su determinación se fundamenta en la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC), derivada de la relación existente en el suelo entre el agua contenida y el potencial al que se encuentra, e íntimamente relacionada y dependiente de las características físico-químicas del medio (Fredlund y Xing, 1994; Fredlund *et al.*, 2007). Estas últimas son consideradas la base de la productividad de los suelos y del crecimiento y producción de los cultivos.

La existencia de una metodología de medición amplia (Durner y Or, 2005), lejos de facilitar la determinación de los “*hydrolimits*” (Orfánus, 2005), la dificulta, debido a la heterogeneidad de características, demandas, precisión aportada y tiempo invertido. Dentro de ellos, los medidores de actividad de agua (*water activity meters*) (WAMs) surgidos en la década de los noventa, se presentan como dispositivos de fácil manejo, adecuación a todo tipo de muestras de suelo, rápidos y fiables (Mittal y Zhang, 2003; Kirkham, 2004).

Una alternativa a los métodos de determinación, son los métodos de estimación basados en la predicción del propiedades hídricas a partir de propiedades físico-químicas de los suelos mediante el establecimiento de relaciones empíricas obtenidas mediante regresión lineal. Las “*funciones de pedotransferencia*” (*pedotransfer functions*) (PTFs) se presentan a tal efecto como una herramienta muy útil (Bell y van Keulen, 1995; Vereecken, 1995; van der Berg *et al.*, 1997) pudiéndose utilizar través de aplicaciones informáticas.

Por ello, en el estudio de propiedades hídricas, concretamente los “*hydrolimits*”, una vez se ha seleccionado la zona de estudio y se ha establecido la metodología de determinación de las propiedades hídricas, es necesaria su evaluación, analizando su idoneidad y adecuación, conjuntamente con la proposición de metodologías de medición alternativas y/o complementarias.

2. Objetivos.

El *objetivo general* de esta investigación es el estudio, a través de la determinación y estimación/predicción, de propiedades hídricas de suelos de la zona regable de Terra Chá con el empleo de un medidor de actividad de agua (WAM). Para el logro de este objetivo se plantean unos *objetivos específicos*:

- Revisión global de los diseños, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar (*thermocouples psychrometers*) (TCPs).
- Estimación del PWP usando un WAM.
- Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un WAM.
- Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de los suelos utilizadas para la estimación de los “*hydrolimits*”.
- Eficiencia en la estimación de “*hydrolimits*” con diferentes metodologías.

Para el desarrollo de cada uno de estos objetivos específicos se plantean *subobjetivos*:

- ✓ Aportación de una visión global de los estudios e investigaciones realizados sobre la Psicrometría desde sus inicios.
- ✓ Establecimiento de las bases sobre las que se fundamentan las distintas técnicas de medición.
- ✓ Recopilación de la denominación existente y actualizada de los distintos tipos de TCPs.
- ✓ Clasificación de los psicrómetros incluyendo las distintas denominaciones.
- ✓ Recopilación de las aplicaciones realizadas en agronomía.
- ✓ Esbozar las pautas futuras de uso de los TCPs para la determinación del estado del agua en el sistema, desde un punto de vista práctico e investigador.
- ✓ Verificación de la repetibilidad de las mediciones correspondientes a las estimaciones del PWP en suelos de Terra Chá.
- ✓ Definición de un método adecuado de estimación del PWP en un tiempo lo más breve posible.

- ✓ Observación y análisis de los factores implicados en el proceso de medición con el uso de WAMs, en concreto el WP4-T y WP4 (Decagon Devices, Inc), con y sin control de la temperatura.
- ✓ Evaluación y validación de modelos propuestos a nivel internacional mediante el empleo del software *SOILPAR 2.00* en la estimación de parámetros hidrológicos.
- ✓ Evaluación y validación del modelo propuesto a nivel nacional por Soto *et al.* (2001) para suelos de la Comunidad Autónoma de Galicia.
- ✓ Proposición de PTFs específicas para la determinación de los “*hydrolimits*” en la zona de estudio.
- ✓ Comparación de la eficiencia de las metodologías utilizadas para la obtención de los “*hydrolimits*” en la zona regable de Terra Chá.
- ✓ Establecimiento de la idoneidad en la determinación de los “*hydrolimits*” empleando una metodología u otra siguiendo criterios de esfuerzo y económicos.

Cada uno de los objetivos específicos se desarrolla en un capítulo de la sección III de la memoria.

3. Estructura de la memoria.

La memoria se ha dividido en quince capítulos y cinco anexos agrupados en siete secciones, según el esquema de la figura I.1 En cada uno de los capítulos se realiza la introducción correspondiente.

La *Sección I*, “*Introducción*”, engloba una breve introducción y contextualizaron de la problemática existente en la determinación de las propiedades hídricas haciendo una descripción de los aspectos más destacables de la zona de estudio en donde se aplica la investigación contenida en esta memoria. Se incluyen contenidos teóricos que son la base de capítulos posteriores.

La *Sección II*, “*Material y métodos*”, realiza una descripción del proceso de toma de muestras y descripción de los métodos empleados, tanto de naturaleza indirecta como predictiva. Se introduce brevemente en investigaciones previas realizadas por la autora, estableciendo las premisas de partida de los capítulos de la sección III.

La *Sección III*, “*Investigación y resultados*”, se inicia con una revisión del estado del arte de la Psicrometría, contextualizando la metodología empleada, los WAMs y la problemática que plantean. Se establece la metodología de medición empleando este tipo de dispositivos y se determinan los factores influyentes en el proceso de medición. Finalmente, se analizan métodos alternativos de estimación y se compara la eficiencia de la totalidad de las metodologías empleadas (Anexo V).

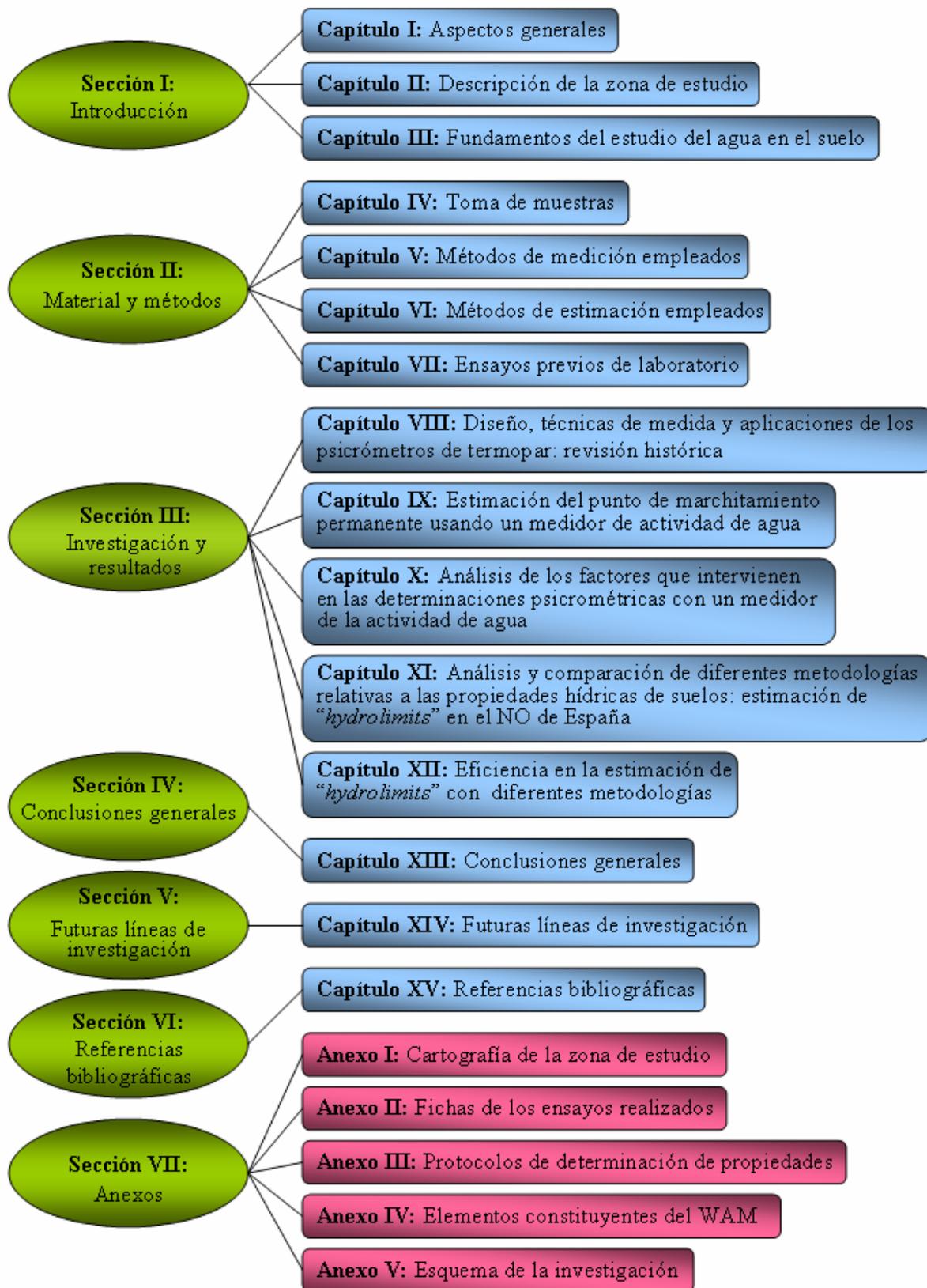


Figura I.1. "Estructura de la memoria"

Cada uno de los capítulos de esta sección se encuentra estructurado como un artículo, indicándose las publicaciones a las que, en el momento de presentación de esta memoria, han dado lugar.

La Sección IV, “Conclusiones generales”, muestra las conclusiones a las que se ha llegado tras la investigación realizada en la Sección III.

La Sección V, “Futuras líneas de investigación” aporta nuevas vías de investigación, sirviendo de complemento y futura ampliación de la problemática presentada en la memoria.

La Sección VI, “Bibliografía”, recoge aquellas fuentes de carácter bibliográfico que han servido de apoyo al texto presentado.

Finalmente, la Sección VII, “Anexos”, recoge diversa información complementaria al texto, facilitando la comprensión de diversos aspectos en él contenidos.

4. Referencias bibliográficas.

Bell, M.A.; van Keulen, H. 1995. Soil pedotransfer functions for four mexican soils. *Soil Science Society of America Journal*. **59**: 865-871.

Bielsa, J.; Duarte, R. 2000. La eficiencia técnica de riego: análisis de las conexiones y la utilidad de sus diversas definiciones. *Estudios Agrosociales y Pesqueros*. **189**: 103-118.

Campbell, G.S.; Campbell, M.D. 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. En: *Advances in irrigation*. Daniel Hillel (Ed). New york. Academic Press. Vol I.

Cousin, I.; Nicoullaud, B.; Coutadeur, C. 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*. **53** (2): 97-114.

Christensen, N.B. 2005. Irrigation management using soil moisture monitors. *Western Nutrient Management Conference*. **6**: 46-53.

Del Campo, A. 2003. ¿Tiene futuro el regadío español?. Retos para el siglo XXI. Fecha de consulta: 02/06/2003. Disponible en:
<http://www.agroinformacion.com/leer-articulo.aspx?not=161>

Deuchars, S.A.; Townend, J.; Aitkenhead, M.J.; FitzPatrick, E.A. 1999. Changes in soil structure and hydraulic properties in regenerating rain forest. *Soil Use and Management*. **15**: 183-187.

- Durner, W.; Or, D.** 2005. Soil water potential measurement. En: Encyclopedia of Hydrological Sciences. Ed. M.G. Anderson. John Wiley & Sons, Ltd. pp: 1089-1102.
- Fredlund, D.G.; Xing, A.** 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. **31**: 521-532.
- Fredlund, M.D.; Fredlund, D.G.; Wilson, G.W.** 2007. Estimation of Unsaturated Soil Properties Using a Knowledge-Based System. Conference Proceeding Paper. Computing in Civil Engineering (Proceedings of the Fourth Congress held in conjunction with A/E/C Systems '97. Philadelphia).
- Kirkham, M.B.** 2004. Measurement of water potential with thermocouple psychrometers. En: Plant-water relationships. Elsevier. pp: 241-262.
- López, F.** 2001. Cambio climático y desertificación, amenazas para la sostenibilidad de las tierras del Arco Mediterráneo: situación y perspectiva. *Revista Valenciana d'Estudis Autonòmics*. **36**: 93-116.
- Llorente, P.** 2003. La importancia de los regadíos en el desarrollo rural. Jornada Autonómica de Castilla y León. Valladolid.
- MAPA.** 2002. Plan Nacional de Regadíos. Horizonte 2008. (RD 329/2002, de 5 de abril, por le que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos. BOE nº 101, del 27 de abril de 2002).
- Martín de Santa Olalla, F.** 2001. Agricultura y desertificación. Mundi-Prensa. Madrid.
- Martín de Santa Olalla, F.** 2005. El uso del agua en el regadío: la gestión de los recursos hídricos. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. pp: 353-376.
- Mittal, G.S.; Zhang, J.** 2003. Artificial neural network-based psychrometric predictor. *Biosystems Engineering*. **85** (3): 283-289.
- Orfánus, T.** 2005. Regional processing of soil drought indicators: conditional hydrolimits and water storage capacity. En: INYS Workshop on Hydrology, Smolenice.
- Ozier-Lafontaine, H.; Lafolie, F.; Bruckler, L.; Tournebize, R.; Mollier, A.** 1998. Modelling competition for water in intercrops: theory and comparison with field experiments. *Plant and Soil*. **204**: 183-201.
- Soto, B.; Arias, M.; Diaz-Fierros, F.** 2001. Desarrollo de una función de pedotransferencia para los suelos de Galicia (NW Spain). *Agrochimica*. **XLV** (5-6): 178-188.
- Tournebize, J.; Kao, C.; Nikolic, N.; Zimmer, D.** 2004. Adaptation of the STICS model to surface drained soils. *Agronomie*. **24**: 305-313.

- van den Berg, M.; Klamt, E.; van Reeuwijk, L.P.; Sombroek, W.G.** 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics for Ferrasols and related soils. *Geoderma*. **78**: 161-180.
- Vereecken, H.** 1995. Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties. *Geoderma*. **65**: 81-92.
- Villar, J.M.; Ferrer, F.** 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. pp: 23-86.
- Walczack, R.T.; Moreno, F.; Stawiński, C.; Fernández, E.; Arue, J.L.** 2006. Modelling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology*. **329**: 527-533.

Referencias páginas web.

<http://www.gva.es/cidaj/cas/c-normas/constitucion.pdf> Constitución Española. Fecha consulta: 10/03/2008.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

“La Ciencia es la progresiva aproximación del hombre al mundo real”
Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947). Físico alemán y Premio Nobel de Física (1918).

ÍNDICE

Resumen	27
1. Selección del área de estudio. Justificación.....	29
2. Delimitación geográfica	29
3. Orografía.....	30
4. Hidrografía	31
5. Estudio climático	31
5.1. Temperatura.....	31
5.2. Precipitación.....	32
5.3. Viento	33
5.4. Diagrama ombométrico de Gausson.....	34
5.5. Clasificación bioclimática	35
5.5.1. Clasificación de Papadakis	35
5.5.2. Clasificación UNESCO-FAO.....	35
6. Suelos	35
7. Distribución de la utilización de la tierra	36
8. Cultivos.....	36
9. Recursos humanos	37
9.1. Población.....	37
9.2. Distribución por edades.....	38
9.3. Nacimientos y defunciones	39
9.4. Dependencia de la población.....	39
9.5. Ocupación por sectores	40
10. Transformaciones en la agricultura de Terra Chá: La Colonización.....	41
11. Sectores de riego.....	43
12. Modernización del regadío	44
13. Referencias bibliográficas	45

RESUMEN

La *Directiva Marco del Agua (DMA)*, los *Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC)* y el *Plan Nacional de Regadíos (PNR)* hacen hincapié en la necesidad de la modernización del regadío para la gestión del agua en su uso agrario. De las tres zonas regables pertenecientes a la Comunidad Autónoma Gallega, la elección de la Comarca regable de Terra Chá radica en la importancia que tiene la agricultura, en especial el riego, en la Comarca; conjuntamente con la disponibilidad de material, instrumentación necesaria, información suficientemente detallada y extensa y numerosos estudios realizados con anterioridad.

Se realiza una descripción de la Comarca, en distintos niveles, geográfico, orográfico, hidrográfico, climatológico, edafológico y poblacional. Especial mención al proceso de colonización realizado en la zona de estudio y su implicación en la configuración del regadío actual, y, como no, las reformas que actualmente se están acometiendo en una de las *Comunidades de Regantes (CCRR)* que la integran.

1. Selección del área de estudio. Justificación.

En esta sección se presenta la zona de colonización de Terra de Chá como el área de estudio seccionada para la realización de esta investigación (Anexo I). De las tres zonas regables pertenecientes a la Comunidad Autónoma Gallega, la elección de la Comarca regable de Terra Chá radica en la importancia que tiene la agricultura, en especial el riego, en la zona. Es importante destacar, que durante los últimos años se vienen desarrollando en ella diferentes estudios en el Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela (Neira, 1994; Gómez, 2002; Marín, 2003; Cancela, 2004; Rodríguez, 2004; Santé, 2005) disponiéndose, por ello, tanto de instrumentación como de información suficientemente detallada y extensa.

2. Delimitación geográfica.

La delimitación geográfica de la comarca de Terra Chá es un tanto inconcreta y dificultosa por no coincidir con ninguna unidad administrativa y perteneciendo a tres partidos judiciales: Mondoñedo, Lugo y Vilalba. Se encuentra la problemática de que los límites municipales que la constituyen no coinciden con lo que se entiende por dicha comarca (Río, 2000)¹¹, existiendo diferentes definiciones y delimitaciones de la zona según autores (Río, 1962; López, 1980; López, 1997). Basándose en la *Consellería de Medio Rural* y la “*Fundación Comarcal de Terra Chá*”¹², la comarca está constituida por los ayuntamientos de A Pastoriza, Abadín, Begonte, Castro de Rei, Cospeito, Guitiriz, Muras, Vilalba y Xermade (Fig. II.1).

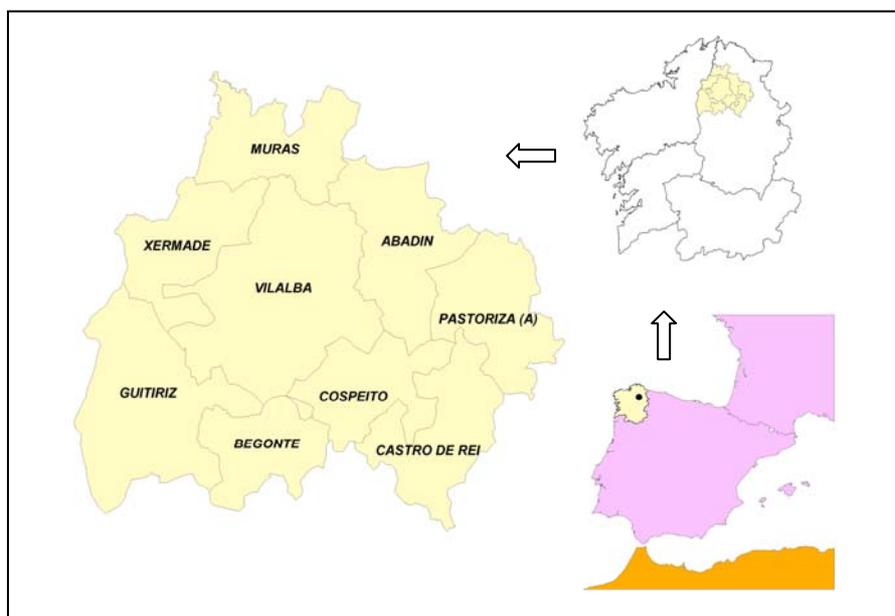


Figura II.1. “Ayuntamientos integrantes de la Comarca de Terra Chá”

¹¹ Gran Enciclopedia Gallega (1974).

¹² <http://www.terrachanaturalmente.com/principal.htm>

La superficie global de toda la comarca es de 1.822,7 km², con 45.939 habitantes, divididos por ayuntamientos según tabla II.1:

Tabla II.1. “Distribución de superficies y población según ayuntamientos”

Ayuntamiento	Superficie (km²)	Población (hab)
<i>Abadín</i>	196,00	3.065
<i>Begonte</i>	126,80	3.550
<i>Castro de Rei</i>	177,00	5.744
<i>Cospeito</i>	144,80	5.349
<i>Guitiriz</i>	293,70	5.974
<i>Muras</i>	163,80	891
<i>Pastoriza, A</i>	175,00	3.690
<i>Vilalba</i>	379,00	15.358
<i>Xermade</i>	166,60	2.318

(Instituto Galego de Estadística (IGE), 2007)

La Comarca de Terra Chá representa el 6,16% de la superficie de Galicia y aporta el 1,66 % de la población, encontrándose diferencias significativas en ambos aspectos en los ayuntamientos integrantes, resultando el más pequeño en superficie, Begonte, y en habitantes, Muras.

La densidad de población de la Comarca se cifra en 25,20 hab/km². Por municipios oscila entre 5,43 hab/km² de Muras, como valor inferior, y 40,52 hab/km² de Vilalba como cifra superior. La despoblación de la Comarca en las últimas décadas, unido a que se trata de un espacio muy deprimido, ocasiona que se trate de una de las Comarcas lucenses con menor densidad poblacional (Xunta de Galicia, 1993).

3. Orografía.

La toponimia de la Comarca, *Terra Chá* (Tierra Llana), hace referencia a una extensa llanura delimitada en sus extremos por rebordes montañosos, por cuyo interior discurren diferentes cursos fluviales constituyendo una densa red.

Los límites montañosos, los constituyen de forma natural con la provincia de A Coruña, la *Serra da Cova da Serpe* y la *Serra da Loba*, por el norte con la *Mariña* lucense, la *Serra da Carba* y la *Serra do Xistral* y por el este, el *Cordal de Neda* y la *Serra de Meira*¹³. En el interior solamente destaca una meseta con una altura máxima de 683 m situada en su mayor parte en Guitiriz (López, 1997).

¹³ <http://www.terrachanaturalmente.com/principal.htm>

4. Hidrografía.

La comarca posee una hidrografía muy rica, basada en la recogida de aguas procedentes de montañas limítrofes y presentando un aspecto de peniplano de drenaje incompleto debido a su planitud.

El principal río es el Miño, constituyendo Terra Chá el primer segmento del valle del Miño y siendo su cuenca la unidad morfológica de la Comarca. Los demás ríos son tributarios del Miño, destacando el río Azúmara y el Lea, afluentes por la izquierda, caracterizados por ser cortos y de menos importancia. Los afluentes de la margen derecha son más numerosos e importantes: Miñotelo, Pequeno, Anllo, Támoga o Santalla, Ladra, Figueira, Parga y Labrada.

Se trata de ríos poco encajados, que nacen en los rebordes montañosos que rodean la comarca y que en ocasiones debido a la inexistencia de pendientes, tal como el nombre de la comarca indica, drenan difícilmente las tierras (López, 1980).

Complementariamente a esta densa red hidrográfica, el denominado “*Complejo Húmedo de Terra Chá*”, incluido en la Red Natura 2000 por su elevado valor ecológico. Varias de sus lagunas, la “*Lagoa de Cospeito y Espiñeira*” o la “*Poza de Pumar*” en Castro de Rei, son catalogadas como “*Espacio natural de interés*” e incluidas en la Red Natura 2000, consideradas con una gran riqueza de fauna y flora (Romero *et al.*, 2004; Ramil *et al.*, 2005)

5. Estudio climático.

Para el estudio climático se emplearon los datos procedentes de una estación cercana, la *Estación Meteorológica de primer orden de Rozas “Aeródromo”*, cuyas características son:

- Coordinadas geográficas:
 - Latitud oeste: 7° 27’ 22”
 - Latitud norte: 43° 6’ 55”
- Altitud: 446 m.
- Clasificación: Termopluviométrica

5.1 Temperatura.

La zona de temperatura más baja se corresponde con la franja norte por delimitar con las *Sierras de Carba* y *O Xistral*, siendo las zonas de temperatura más acusada las que se encuentran más al sur y al este, concretamente en la penetración del valle del río Miño por Castro de Rei. El mes de agosto presenta la temperatura media más elevada, 18,5° C, muy semejante a la de julio, 18,1° C. Los mínimos se presentan en los meses de enero y

febrero, 6,1° C y 7,0° C, respectivamente. El valor mínimo de temperatura se presenta en enero, 1,6° C, y el valor máximo en agosto, 25,1° C (Tabla II.2).

El período frío, con temperaturas comprendidas entre 5 y 10° C, comprende los meses de noviembre a abril, con una duración media de 6 meses. El período fresco, con temperaturas entre 10 y 15° C, resulta muy breve, comprendiendo únicamente dos meses al año, marzo y octubre. El período templado, con temperaturas comprendidas entre 15 y 20° C, abarcaría 4 meses, de junio a septiembre. De esta forma, la media anual se cifra en 11,9° C, siendo para la temperatura máxima de 17,4° C y la media anual para los mínimos de 6,4° C. La amplitud térmica oscila entre 8,2° C de diciembre y 13,2° C de agosto, correspondiendo la media anual a 11,1° C. La baja amplitud térmica y la obtención del máximo en agosto es debido a la influencia oceánica.

Tabla II.2. “Temperaturas medias mensuales y amplitudes térmicas de la serie 1985-2005”

Mes	Tª. Máx (°C)	Tª. Mín (°C)	Tª. Media (°C)	Amplitud térmica (°C)
Enero	10,6	1,6	6,1	9,0
Febrero	12,3	1,7	7,0	10,6
Marzo	15,1	3,0	9,1	12,1
Abril	15,2	4,2	9,7	11,0
Mayo	19,3	7,1	13,2	12,2
Junio	22,1	9,9	16,0	12,2
Julio	24,3	12,0	18,1	12,3
Agosto	25,1	11,9	18,5	13,2
Septiembre	22,7	10,1	16,4	12,6
Octubre	18,0	7,5	12,7	10,5
Noviembre	13,3	4,4	8,9	8,9
Diciembre	11,2	3,0	7,1	8,2

5.2 Precipitación.

La precipitación presenta, al igual que la temperatura, un gradiente S-N muy acusado. La aportación de agua es abundante durante los meses de octubre a enero con un máximo en octubre de 137,5 mm, siendo reducida los meses de junio a agosto, alcanzándose un mínimo en agosto de 35,7 mm (Tabla II.3). Anualmente se recogen de media 1063,2 mm, concentrados en los meses del periodo frío y fresco.

Tabla II.3. “Precipitaciones medias mensuales de la serie 1985-2005”

Mes	Precipitación (mm)
Enero	115,10
Febrero	83,00
Marzo	77,60

(Continúa)

Tabla II.3. (Continúa)

Mes	Precipitación (mm)
<i>Abril</i>	104,00
<i>Mayo</i>	82,10
<i>Junio</i>	45,80
<i>Julio</i>	35,70
<i>Agosto</i>	38,10
<i>Septiembre</i>	75,20
<i>Octubre</i>	137,50
<i>Noviembre</i>	137,10
<i>Diciembre</i>	131,90

5.3 Viento.

En el regadío adquiere gran importancia no solamente las velocidades y frecuencias del viento, sino el porcentaje de tiempo en que el viento sopla en una determinada dirección. Las tablas II.4 y II.5 recogen esta información, refiriéndose la tabla II.5 a los meses de menor precipitación, junio a agosto, en una serie de referencia de 1985 a 1998.

Tabla II.4. “Frecuencia y velocidad del viento según direcciones”

Dirección	Frecuencia (%)	Velocidad (m/s)
<i>N</i>	8	3,9
<i>NNE</i>	10	4,7
<i>NE</i>	10	5,0
<i>ENE</i>	2	3,6
<i>E</i>	3	3,1
<i>ESE</i>	3	1,7
<i>SE</i>	3	2,2
<i>SSE</i>	3	3,9
<i>S</i>	12	4,4
<i>SSO</i>	4	4,4
<i>SO</i>	9	4,7
<i>OSO</i>	3	4,2
<i>O</i>	4	3,9
<i>ONO</i>	3	2,8
<i>NO</i>	3	2,8
<i>NNO</i>	2	2,8

Durante el mes de junio como media el 29% del tiempo sopló el viento en la misma dirección, valor idéntico al alcanzado en el mes de julio y superior al mes de agosto, 27%.

Tabla II.5. “Tiempo en que se mantiene la dirección del viento (%)”

Año	Junio (%)	Julio (%)	Agosto (%)
1.985	28	27	25
1.986	26	29	28
1.987	33	25	25
1.988	17	17	19
1.989	36	-	39
1.990	46	34	31
1.991	-	42	26
1.992	42	29	26
1.993	22	32	26
1.994	28	29	31
1.995	36	25	32
1.996	18	33	33
1.997	29	32	12
1.998	19	25	20

5.4 Diagrama ombrométrico de Gausson.

El “*diagrama ombrométrico de Gausson*” representa la temperatura frente a la precipitación para los meses del año, permitiendo identificar los periodos de sequía y cómo se distribuyen. Considerando el criterio de considerar un mes como “*seco*” aquel cuya precipitación resulte inferior al doble de la temperatura media mensual, los meses de junio y julio se pueden clasificar a tal efecto (Fig. II.2).

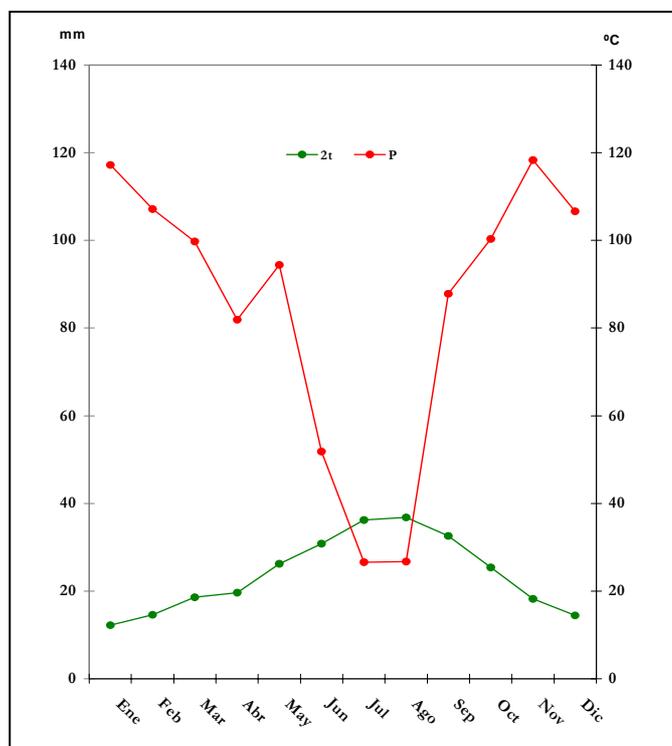


Figura II.2. “Diagrama ombrométrico de Gausson”

5.5 Clasificación bioclimática.

5.5.1 Clasificación de Papadakis.

La “clasificación de Papadakis” establece la clasificación del clima desde un punto de vista agroecológico, correspondiendo los distintos tipos climáticos a los límites naturales de los cultivos.

El sur de la Comarca se caracteriza por un carácter mediterráneo “templado” o “templado-fresco”. La zona central se presenta “templada-fresca” y el norte es “marítimo-fresco”. El régimen térmico oscila entre “templado-cálido” y “pirenaico” hacia el sur y “marítimo-fresco” hacia el norte. El tipo de invierno predominante es “avena cálido” o “fresco”, pudiendo en ocasiones ser “cítrus” hacia la costa. El régimen de humedad es “mediterráneo húmedo” hacia el sur y “húmedo” hacia el norte (Xunta Galicia, 1993).

5.5.2 Clasificación UNESCO-FAO.

La totalidad de los meses se clasifican dentro del rango de “mes templado” correspondiente a aquel cuya temperatura media oscila entre 0 y 20° C. Si se considera el mes más frío como criterio de clasificación, se puede englobar en el “Grupo I”, con temperatura del mes más frío superior a 0° C, correspondiéndose con un “clima templado-medio”, donde la temperatura media del mes más frío se encuentra comprendida entre 10 y 15° C. En este caso se alcanzan 5,5° C durante el mes de enero.

Tomando como criterio de clasificación la temperatura media de las mínimas del mes más frío, se presenta un “invierno moderado” cuando esta se encuentra entre 3 y -1° C (Elías y Castellví, 1996), presentándose 1,6° C en enero.

6. Suelos.

Según Castelao y Díaz-Fierros (1992), el marco geológico de la Comarca lo constituyen la “Unidad del Domo de Lugo”. Estos materiales pueden ser de origen Precámbrico o Cámbrico.

Se compone de materiales geológicos muy heterogéneos, existiendo rocas ígneas de composición granítica, metamórficas y en proporción inferior rocas metabásicas y de calizas y sedimentos terciarios y cuaternarios con gran variedad de texturas y composición. Los materiales más antiguos son conglomerados finos, arena, arcillas, que en ocasiones se encuentran inclinados hasta un 30% y se encuentran con frecuencia hundidos en las depresiones tectónicas. Estos sedimentos se encuentran recubiertos por depósitos más modernos, formados por conglomerados gruesos, poco cementados por arcillas rojas. Los materiales sedimentarios ocupan la mayor extensión en la cuenca de Vilalba, Pastoriza o Guitiriz. En la cuenca de Vilalba existe una alternancia de arcillas verdes, grises, pardas y rojizas. La mineralogía de las arcillas constituye la mayor parte de los sedimentos del Terciario gallego.

En cuanto al Cuaternario, las llanuras aluviales se encuentran muy desarrolladas en la zona, de modo que el río Miño, aguas abajo del Meira y el río Anllo, formaron amplio valles de fondo plano, en los cuales se ha producido un depósito de material aluvionar, por lo general de escaso espesor.

Los horizontes y perfiles presentados son de tres tipos, $A_p/B_w/2B_{tg}$, $A_p/B_w/BC/2B_{tg}$ y $A_p/B_w/2BC$, correspondiéndose con la tipología de suelos de alisoles, fluvisoles, gleisoles y cambisoles, resultando estos últimos los más abundantes, presentando globalmente un nivel freático elevado (Macías y Calvo, 2001).

7. Distribución de la utilización de la tierra.

La SAU (*Superficie agraria útil*) de la Comarca asciende a 63.701 ha, representando un 38% de la superficie total. En el aspecto forestal, 105.520 ha se consideran, de las cuales, un 60,34 es arborizado. Si se analiza por ayuntamientos, la mayor relación SAU/Superficie total, se presenta en Cospeito, 0,72, siendo el mínimo en Muras, 0,09 (Tabla II.6).

Tabla II.6. “Distribución de la utilización de la tierra por ayuntamientos (ha)”

Ayuntamiento	SAU	Forestal desarborizado	Forestal arborizado	Superficie ayuntamiento	Forestal total	SAU/Sup total	Forestal arborizado/Forestal total
Abadín	5.429	7.669	6.194	19.292	13.863	0,28	0,45
Begonte	3.837	689	6.868	11.394	7.558	0,34	0,91
Castro de Rei	8.255	866	5.891	15.012	6.757	0,55	0,87
Cospeito	8.669	1.026	2.334	12.030	3.361	0,72	0,69
Guitiriz	7.956	5.509	14.190	27.654	19.699	0,29	0,72
Muras	1.648	10.538	5.459	17.645	15.997	0,09	0,34
Pastoriza, A	8.438	2.591	4.366	15.395	6.957	0,55	0,63
Vilalba	14.968	7.218	12.356	34.542	19.574	0,43	0,63
Xermade	4.501	5.743	6.012	16.256	11.755	0,28	0,51
Terra Chá	63.701	41.849	63.671	169.221	105.520	0,38	0,60

(Xunta de Galicia, 2004)

Por el contrario, si se considera la relación *forestal arborizado/forestal total*, el máximo lo presenta Begonte, 0,91, y el mínimo de nuevo Muras, 0,34.

8. Cultivos.

En la distribución de los cultivos en la Comarca destacan los cultivos herbáceos, representando el 18,11% del total (Tabla II.7). Los prados y distintos tipo de pastizales representan un 27,32% y la superficie forestal 46,49%. Esta distribución se debe a que se

trata de una comarca cuya principal actividad es la ganadería, principalmente bovina en cría semi-intensiva de ganado (Neira *et al.*, 2002; Fandiño *et al.*, 2003).

Tabla II.7. “Distribución de las tierras según cultivo (ha)”

Zona	Tierras de cultivo				Prados, pastizales y pastizales arbustivos	Otras superficies	Superficie forestal	Superficie total
	Cultivos herbáceos	Cultivos leñosos	Otras tierras de cultivo	Cultivos asociados y sucesivos				
Terra Chá	33.004	336	718	4.382	49.809	13.059	84.736	182.280
Lugo	153.398	14.477	3.510	13.739	174.399	73.612	579.943	985.600
Galicia	385.369	74.294	18.476	51.693	447.932	320.450	1.763.013	2.957.841

(Xunta de Galicia, 2004)

Si se considera la tipología de cultivo, destacan los cultivos forrajeros invirtiendo 32.234 ha en la Comarca, 133.784 ha en Lugo y 287.233 ha en toda la Comunidad Autónoma. Dentro de los cultivos leñosos, en Terra Chá la mayor superficie la ocupan los frutales, en Lugo el castaño y en Galicia el viñedo (Tabla II.8).

Tabla II.8. “Distribución de los cultivos (ha)”

Zona	Cultivos herbáceos				Cultivos leñosos			
	Cereales grano	Cultivos forrajeros	Tubérculos	Leguminosas grano	Hortícolas, flores y viveros	Frutales	Castaño	Viñedo
Terra Chá	2.660	32.234	1.673	127	1.310	234	101	1
Lugo	8.423	133.784	5.585	956	4.650	2.753	9.151	2.573
Galicia	53.420	287.233	21.506	4.333	18.874	13.107	27.481	33.705

(Xunta de Galicia, 2004)

9. Recursos humanos.

9.1 Población.

En toda la comarca destaca por su elevada población Vilalba con 15.358 habitantes en el 2007, de los 45.939 habitantes que presenta la Comarca, representando el 32,52%. En los últimos años se ha producido un decremento de la población tanto a nivel comarcal con un saldo de 2.229 habitantes menos, como a nivel de ayuntamientos, con una disminución media de 248 habitantes menos, siendo los menos afectados Vilaba, con 162, y Muras, con 176 habitantes (Tabla II.9).

Tabla II.9. “Evolución de la población (hab)”

Ayuntamiento	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Incremento
Abadín	3.342	3.326	3.256	3.201	3.141	3.065	-277
Begonte	3.748	3.684	3.682	3.616	3.587	3.550	-198
Castro de Rei	5.966	5.902	5.856	5.779	5.785	5.744	-222
Cospeito	5.706	5.609	5.548	5.500	5.409	5.349	-357
Guitiriz	6.249	6.131	6.086	6.041	5.972	5.974	-275
Muras	1.067	1.020	978	941	926	891	-176
Pastoriza, A	3.975	3.911	3.856	3.787	3.726	3.690	-285
Vilalba	15.520	15.598	15.484	15.409	15.455	15.358	-162
Xermade	2.595	2.516	2.464	2.414	2.339	2.318	-277

(IGE, 2006)

De todas formas, a pesar de la disminución generalizada de la población, Vilalba, se sigue presentando como el ayuntamiento de mayor peso demográfico, por algo se trata del centro neurálgico de la Comarca.

9.2 Distribución por edades.

Analizando la población por edades (Tabla II.10), la edad media en toda la Comarca es de 52,42 años para las mujeres y 49,07 para los hombres, destacando un mayor número de población comprendida en la franja de edades de 16 a 64 años, un 30,74%. Esta es una imagen del progresivo envejecimiento que está sufriendo la Comarca, sobre todo considerando que la franja de edades de los jóvenes es la que menos individuos presenta, el 8,66%.

Tabla II.10. “Evolución de la población por edad y sexo (hab)”

Ayuntamiento	0 a 15 años		16 a 64 años		65 y más años		Extranjeros		Edad media (años)	
	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M
Abadín	118	97	881	826	486	657	0	5	50,60	55,00
Begonte	133	122	1.116	958	536	685	45	9	49,40	53,20
Castro de Rei	242	233	1.807	1.643	810	1.009	62	29	48,00	50,90
Cospeito	201	203	1.604	1.500	804	1.037	20	25	49,20	52,10
Guitiriz	266	256	1.894	1.702	789	1.067	25	16	47,30	50,90
Muras	25	26	263	231	159	187	0	1	53,00	55,70
Pastoriza, A	163	163	1146	1.029	525	664	13	9	48,20	51,10
Vilalba	817	754	4.863	4.678	1.835	2.411	114	102	45,60	48,50
Xermade	80	79	709	599	353	498	12	8	50,30	54,40

(IGE, 2007)

H: Hombres; M: Mujeres.

9.3 Nacimientos y defunciones.

Considerando los nacimientos y las defunciones que se producen (Tabla II.11), en todos los ayuntamientos el saldo vegetativo es negativo, siendo más acuciante en Vilalba, con 124 habitantes menos durante el año 2006, no obstante también es el ayuntamiento con mayor número de habitantes, representando una disminución del 0,81%. El menor saldo vegetativo negativo se produce en Cospeito, con 5 habitantes menos, no correspondiéndose al ayuntamiento de menor población, que en la Comarca sería Muras. Esto provoca que el menor porcentaje de disminución de la población se produzca en Cospeito, 0,09% y el máximo en Muras, un 2,13% de población menos en el último año.

Tabla II.11. “Nacimientos y defunciones según ayuntamientos (hab)”

Ayuntamiento	Nacimientos		Defunciones		Saldo vegetativo
	H	M	H	M	
<i>Abadín</i>	6	1	22	30	-45
<i>Begonte</i>	4	7	18	17	-24
<i>Castro de Rei</i>	11	13	52	54	-82
<i>Cospeito</i>	17	8	42	35	-5
<i>Guitiriz</i>	22	14	29	45	-38
<i>Muras</i>	1	0	15	5	-19
<i>Pastoriza, A</i>	6	6	23	31	-42
<i>Vilalba</i>	36	32	100	92	-124
<i>Xermade</i>	6	3	14	19	-24

(IGE, 2007)

H: Hombres; M: Mujeres.

9.4 Dependencia de la población.

El índice de dependencia de la población aporta una mayor claridad al envejecimiento de comarca. El índice de dependencia senil se obtiene calculando el porcentaje de ancianos con respecto a la población de edad media (Tabla II.12).

Tabla II.12. “Índice de dependencia senil”

Ayuntamiento	Índice dependencia senil
<i>Abadín</i>	69,4
<i>Begonte</i>	63,6
<i>Castro de Rei</i>	56,6
<i>Cospeito</i>	63,3
<i>Guitiriz</i>	55,2
<i>Muras</i>	71,3
<i>Pastoriza, A</i>	58,1
<i>Vilalba</i>	47,2
<i>Xermade</i>	70,2

(IGE, 2007)

Los datos aportados corroboran que el ayuntamiento con menor dependencia es Vilalba, presentando valores muy superiores en Muras y Xermade. Los altos índices de dependencia senil condicionan el futuro desarrollo de la comarca.

9.5 Ocupación por sectores.

La distribución de las distintas actividades desarrolladas en la Comarca, se muestran en la Tabla II.13.

Tabla II.13. “Número y tipología de la actividad desarrollada por ayuntamiento”

Ayuntamiento	Total actividades	Industria	Construcción	Servicios
<i>Abadín</i>	117	8	17	92
<i>Begonte</i>	160	21	39	100
<i>Castro de Rei</i>	336	25	67	244
<i>Cospeito</i>	310	32	50	228
<i>Guitiriz</i>	339	44	59	236
<i>Muras</i>	28	2	5	21
<i>Pastoriza, A</i>	177	19	45	113
<i>Vilalba</i>	1.067	92	143	832
<i>Xermade</i>	94	8	12	74

(IGE, 2007)

La actividad desarrollada mayoritariamente es la de servicios, seguida de la construcción y, por último, la industria.

Analizando la ocupación por sectores (Tabla II.14), los sectores a los que se dedica claramente la Comarca es al sector servicios y a la agricultura. Este último sector resulta mayoritario en los ayuntamientos de Abadín, Cospeito, Muras, A Pastoriza y Xermade.

Tabla II.14. “Ocupación por sectores”

Ayuntamiento	Agricultura		Pesca		Industria		Construcción		Servicios	
	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M
<i>Abadín</i>	213	342	1	1	111	28	167	4	204	173
<i>Begonte</i>	120	174	0	2	229	38	168	2	303	234
<i>Castro de Rei</i>	580	516	1	1	182	69	249	7	422	709
<i>Cospeito</i>	376	513	0	0	188	56	248	7	403	311
<i>Guitiriz</i>	449	415	0	2	351	58	281	15	472	442
<i>Muras</i>	59	62	1	0	65	8	52	0	38	46
<i>Pastoriza, A</i>	515	575	2	0	94	20	126	5	248	209
<i>Vilalba</i>	578	877	2	3	631	191	850	12	1.472	1.348
<i>Xermade</i>	128	208	0	0	103	5	130	5	163	130

(IGE, 2007)

H: Hombres; M: Mujeres.

La máxima actividad se centra, lógicamente, en Vilalba, estando la totalidad de los sectores considerados representados. No ocurre de igual forma en Cospeito y Xermade en donde la pesca no existe. Destaca la escasa incursión de la mujer en determinados sectores, tal es el caso de la industria o la construcción, siendo superior en la pesca.

10. Transformaciones en la agricultura de Terra Chá: La Colonización.

Para una mejor comprensión del regadío en Terra Chá, es obligatorio comentar la Colonización llevada a cabo en la zona. Su descripción se basa en su mayoría en estudios de López (1980) y Cardesín (1987).

La zona de colonización es el resultado de la actuación del *Instituto Nacional de la Colonización* (INC)¹⁴ en la época franquista, en torno a la reforma del sector agrario, en dos niveles, la política hidráulica y la reforma agraria.

En aquella época, años 50, la agricultura en Galicia era considerada como de subsistencia, basada en la pequeña producción. La acción colonizadora tenían dos orientaciones, por un lado “*productivista*”, de cara a aumentar la producción de materias primas mediante el reparto de tierras a fin de intensificar la producción frente a la gran propiedad y, por otro, “*social*”, aumentando la mano de obra en el medio rural, evitando el éxodo que se producía y buscando reforzar la capacidad de la gran propiedad de generar beneficios.

De esta forma, en 1954 arranca el “*Proyecto de desarrollo de Tierra Llana*”. Cerca de tres mil hectáreas de monte comunal perteneciente a los ayuntamientos de Castro de Rei y Cospeito fueron expropiadas por el INC. De las 2.768 ha roturadas, 1807 fueron puestas en regadío mediante la construcción de seis estaciones elevadoras en los ríos Miño, Támoga, Anllo y Lea, con una red de acequias de 52 km. Se parceló la zona y se formaron 189 unidades familiares de explotación, agrupadas en los llamados “*pueblos o núcleos de colonización*” o “*Centros Cívico-Cooperativos*”, constituidos por una iglesia, una escuela y un parque, distribuyéndose las diferentes explotaciones entorno al mismo. Estos centros se localizan en Matodoso, A Espiñeira, Arneiro y Veiga de Pumar (Fig. II.3). No obstante, aunque inicialmente se pretendía la repartición de la totalidad de las tierras expropiadas, un tercio se dedicó a la repoblación forestal, explotación directa por parte del INC y arrendamiento. Se constituyeron 76 explotaciones de 14 ha, 14 de 8 ha y 99 de 6 ha, con lotes complementarios de 0,5-2 ha.

Frente al proyecto inicial, disminuye tanto el número de colonos a asentar, la superficie repartida y el número de concesionarios, aumentando el tamaño de los lotes a distribuir. Inicialmente, en 1954, se plantea distribuir 600 lotes de 5 ha cada uno con una quinta parte de superficie en regadío. Al redactar el “*Plan General de Colonización*”, en 1956, el número de lotes se reduce a 400 de 5,6 u 8 ha, mixtos, de secano y riego, o bien exclusivamente de secano, suponiendo en los mixtos el riego un tercio de la superficie.

¹⁴ El INC se transformaría posteriormente en el Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) tras su fusión con el Servicio Nacional de Concentración Parcelaria y Ordenación Rural.

Se constituyen tres sectores, I, II y III. El sector III es el primero en poblarse, entre 1959 y 1962. Los otros dos sectores se poblaron a partir de 1966. Durante este periodo se va reduciendo el número de lotes a la par que aumenta su superficie hasta cerca de 14 ha, superándose la proporción de secano-regadío que de 2-1 pasa a 3-4 y en el Sector I a 2-5. En el Sector III se decide extender el regadío a la totalidad de los lotes.

La orientación buscada se centra en la ganadería especializada en la producción lechera, dotando a los colonos de tierras preparadas mediante nivelación, encalado, etc, y dotadas de red de riego y saneamiento. Las superficies de cultivos son amplias y unificadas en dos parcelas bien comunicadas y dotadas de las dependencias agrícolas necesarias, tal es establo, silos, etc, y con una red viaria que comunica las explotaciones con las tierras.

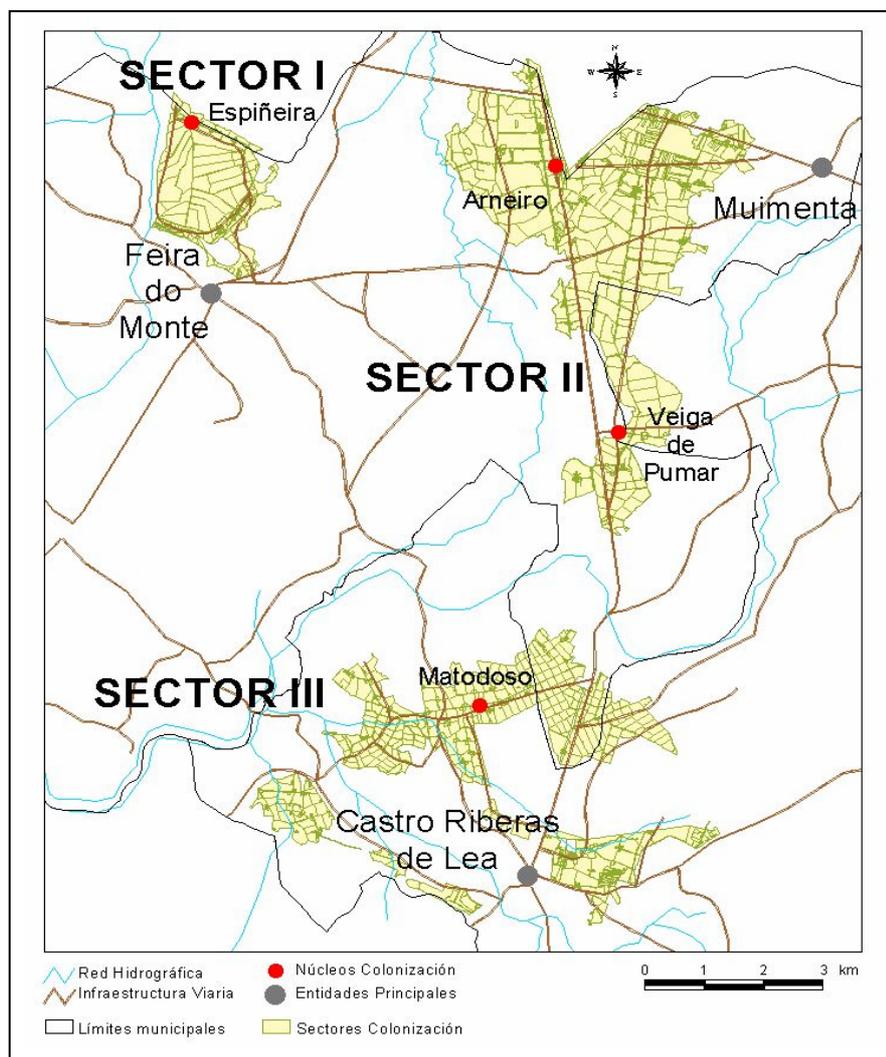


Figura II.3. “Localización de los núcleos de colonización”

La cabaña ganadera con orientación lechera es aportada por el INC, generalmente novillas preñadas de siete meses de raza frisona a amortizar por los colonos.

La mecanización en cada sector se lleva a cabo mediante la constitución de “Parques de maquinaria Cooperativos”, gestionados por INC y dotados de maquinaria diversa, dado que la mecanización individual por los escasos recursos de los colonos resultaba inviable.

De esta forma el INC acomete unas innovaciones técnicas fundamentadas en la ampliación del terrazo mediante roturación de montes, mejora de los suelos mediante abonado y laboreo mecánico, realizando una red de riego y drenaje, utilizando fertilizantes, pesticidas, semillas seleccionadas y generalizando la pradera artificial permanente. Se producen diferentes modificaciones con el transcurrir del tiempo sobre la rotación de cultivos, pasando por cereal/nabos-patata en rotación bianual, pradera artificial y varias forrajeras, abastecimiento y orientación comercial.

En 1968 se crea, con gran éxito, una *Cooperativa Autónoma* generada por los colonos para la comercialización de leche, terneros cebados y adquisición de piensos, de modo que en el plazo de un año agrupa a 400 socios e integra a colonos de los cuatro pueblos, adjuntando vecinos no colonos. Actualmente, esta cooperativa sigue en funcionamiento, no obstante se ha visto mermado tanto el número de socios como el de colonos integrantes.

Es importante señalar que se ha producido en la zona de Colonización una paulatina pérdida de población y que esta tendencia no ha sufrido cambios a día de hoy.

11. Sectores de riego.

En la zona de Colonización de Terra Chá se localizan tres sectores de riego: Sectores I, II y III (Fig. II.3).

Dentro de cada sector se establecieron “Comunidades de Regantes” (CCRR) para facilitar la organización y gestión del regadío. Sus características se muestran en la tabla II.15 (Cancela *et al.*, 2006b).

La CR de “*Franqueira*” se abastece del río Anllo, “*Río Lea*” del río homónimo, “*A Espiñeira*” del Támogo y las restantes CCRR del río Miño.

Los cultivos que se encuentran en las tierras de colonización son la pradera y el maíz forrajero, este último con menor peso en superficie. No obstante, su cultivo se ha incrementado en los últimos años, rondando el 20% de la superficie productora actual (Neira *et al.*, 2004). El riego se realiza por gravedad en 881,71 ha y por aspersión en 895,22 ha. (Cancela, 2004).

Las características técnicas de las CCRR se describen en trabajos de Fernández-Lavandera y Pizarro (1980), entre otros. Asimismo, diversos estudios se han realizado sobre las CCRR y el regadío en la zona de Colonización, destacar Casal, 1982; Álvarez y González, 1989; Neira *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2003; Fandiño *et al.*, 2003; Gómez *et al.*, 2003; Cancela *et al.*, 2004; Álvarez *et al.*, 2005; Cancela *et al.*, 2006a.

Tabla II.15. “Características de los sectores resultantes de la Colonización”

Sector	Municipios	Fecha de inicio	Nº pueblos colonización	Nº Colonos/ pueblo	Superficie (ha)	Sistema de riego	Comunidades regantes
I	Cospeito	1966	1	12	351	Superficie	A Espiñeira
II	Castro de Rei Cospeito	1967- 1968	2	44 / 22	1502	Superficie Aspersión	Franqueira (o Río Anllo)/ Río Miño-Río Pequeno ¹⁵
III	Castro de Rei Cospeito	1958- 1962	1	124 ¹⁶	1039	Aspersión Aspersión/Superficie Superficie Superficie	Loentia-Costa Moura Carballosa Matodoso Río Lea

12. Modernización del regadío.

La Directiva Marco del Agua (DMA), los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) y el Plan Nacional de Regadíos (PNR) hacen hincapié en la necesidad de la modernización del regadío para la gestión del agua en su uso agrario.

Con esa finalidad, actualmente se está acometiendo la modernización y mejora de las infraestructuras de las que se encuentra dotada la CR “Río Miño-Río Pequeno”. Esta comunidad ha surgido por la fusión de las dos CCRR existentes en el Sector II, “Franqueira” y “Río Miño-Río Pequeno” (Tabla II.15).

El proyecto promovido por la SEIASA (*Sociedad Estatal de Infraestructuras Agrarias*) del Norte y la Dirección General de Desarrollo Rural del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) conlleva la modernización de la CRR, dividiendo la zona en dos sectores de riego interconectados:

- ✓ *Sector A*: incluye la zona de riego de “Río Miño-Pequeno” de 667 ha, y toma agua del río Pequeno (454,08 l/s) tras un trasvase a este desde el río Miño.
- ✓ *Sector B*: incluye la zona regable de “Franqueira” de 110,5 ha, y toma agua del río Anllo (74 l/s).

Se prevén las siguientes actuaciones:

- Acondicionamiento del trasvase del río Miño al Pequeno.
- Acondicionamiento de la captación de aguas en el río Pequeno.
- Acondicionamiento de la captación de aguas en el río Anllo.

¹⁵ Ambas comunidades se han unificado bajo la denominación de la segunda.

¹⁶ Las tierras fueron repartidas entre 114 agricultores con viviendas en el propio sector y 10 agricultores externos.

- Dos estaciones de bombeo y filtrado con su correspondiente sala de control.
- Red de riego a base de tuberías de fundición y polietileno de aproximadamente 24 km, con válvulas, desagües, ventosas e hidrantes.

El MAPA, a través de SEIASA del Norte ha encomendado a la empresa pública TRAGSA la ejecución de las obras de modernización para 760 ha, 70 propietarios y un ahorro de agua estimado en 2,43 hm³, con un importe de 3.904.133 euros¹⁷.

En las restantes CCRR, por el momento, no se ha tomado ninguna medida de modernización.

13. Referencias bibliográficas.

Álvarez, A.; González, M. 1989. Mecanización agraria en las explotaciones de “Terra Chá”. Serie Agraria 1. Diputación Provincial de Lugo.

Álvarez, C.J., Cancela, J.J., Fandiño, M. 2005. Characterization of irrigation holdings in the Terra Cha region of Spain: a first step towards a water management model. *Water Resources Management*. **19** (1): 23-36.

Álvarez, C.J.; Cancela, J.J.; Gómez, A.; Neira, X.X. 2003. Evaluación económica de proyectos de riego en explotaciones de ciclo cerrado. Aplicación a un caso práctico: “C.R. Río Miño- Río Pequeno” (Lugo). VII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Pamplona.

Cancela, J.J. 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.

Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Fandiño, M.; Martínez, E.M.; Neira, X.X. 2006b. Caracterización de las zonas regables de la provincia de Lugo. Artículo Técnico. Riegos y Drenajes XXI. Año XXII. Nº 148. Mayo / Junio.

Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X.; Pereira, L.S. 2006a. Modelling for improved irrigation water management in a temperate region of northern Spain. *Biosystems Engineering*. **91** (1): 151–163.

Cancela, J.J.; Neira, X.X.; Cuesta, T.S.; Álvarez, C.J.; Crecente, R. 2004. Socio-economic evaluation of the Terra Chá irrigators community by using a Geographic Information System-Spain. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript LW 04 003. July, 2004.

Cardesín, J.M. 1987. Política agraria y transformaciones en la agricultura gallega: la zona de colonización de Terra Chá (1954-1973). *Agricultura y Sociedad*. **44**: 243-280.

¹⁷ <http://www.geoscopio.com/escaparate/portada.cgi?idempresa=26510>

- Casal, B.** 1982. A Terra Chá luguesa. Estudio da súa realidade agrária. Cuadernos da Área de Ciencias Agrárias. Publicacións do Seminario de Estudos Galegos.
- Castelao, A.M.; Díaz-Fierros, F.** 1992. Os solos da Terra Chá. Tipos, xénese e aproveitamento. Servicio de Publicacións da Deputación Provincial de Lugo. Lugo
- Elías, F.; Castellví, F.** 1996. Agrometeorología. MAPA. Mundi-Prensa. Madrid.
- Fandiño, M.; Cancela, J.J.; Álvarez, C.J.** 2003. Aspectos sociales de las explotaciones de regadío en la provincia de Lugo-Galicia (España). V Coloquio Hispano-Portugués de Estudios Rurais. ESAB-Escola Superior de Bragança.
- Fernández-Lavandera, O.; Pizarro, A.** 1980. El suelo, el desagüe, el riego y la economía. II. Terra Chá. IRYDA. Ministerio de Agricultura.
- Gómez, A.** 2002. Mejora de las infraestructuras de la red de riego de la comunidad de regantes río Miño-Pequeno de 670 ha en Cospeito (Lugo). Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Santiago de Compostela. EPS. Lugo.
- Gómez, A.; Cancela, J.J.; Neira, X.X.; Cuesta, T.S.** 2003. Desarrollo rural en torno al regadío en la comarca de Terra Chá. V Coloquio Hispano-Portugués de Estudios Rurais. ESAB-Escola Superior de Bragança.
- Gran Enciclopedia Gallega.** 1974. Terra Chá. Ed. Silverio Cañada. pp: 78-79.
- I.G.E.** 2006. Principales datos de Galicia, información comarcal y municipal. Instituto Gallego de Estadística. Fecha de consulta: 04/04/08. Disponible en:
<http://www.ige.eu/web/index.jsp?paxina=001&idioma=gl>
- I.G.E.** 2007. Principales datos de Galicia, información comarcal y municipal. Instituto Gallego de Estadística. Fecha de consulta: 04/04/08. Disponible en:
<http://www.ige.eu/web/index.jsp?paxina=001&idioma=gl>
- López, J.M.** 1980. Estructura y morfología agraria en la Terra Chá. Monografías de la Universidad de Santiago de Compostela. Nº 55. Departamento de Geografía. Universidad de Santiago de Compostela.
- López, R.** 1997. Estudio socioeconómico da Terra Chá. Diputación Provincial de Lugo.
- Macías, F.; Calvo, R.** 2001. Los suelos. En: Atlas de Galicia I. Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal de Galicia. Consellería de Presidencia. Xunta de Galicia. pp: 174-217.
- Marín, A.** 2003. Propuesta de indicadores ambientales de evaluación para el agua en la comarca de Terra Chá (Lugo). Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Santiago de Compostela. EPS. Lugo.

- Neira, X.; Cuesta, T.; Cancela, J.** 2004. Evolución de las grandes superficies regables. *Boletín informativo Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Galicia*. **6**: 2-4.
- Neira, X.; Cuesta, T.; Cancela, J.; Dafonte, J.; Paz, A.** 2002. Indicadores ambientales y rehabilitación del regadío en Terra Chá. III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas. Sevilla.
- Neira, X.X.** 1994. Desenrolo de técnicas de manexo de auga axeitadas a un uso racional de regadíos. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Ramil, P.; Vazquez, L.; Gómez-Orellana, L.; Rodríguez, M.A.; Rubinos, M.; Cillero, C.** 2005. LIC Parga-Ladra-Támoga. Terras de pedra e auga. INLUDES-Deputación Provincial de Lugo.
- Río, F.J.** 1962. Notas para el estudio de la economía ganadera de la Terra Chá. *Revista de economía de Galicia*. Ed. Galaxia.
- Río, F.J.** 2000. Galicia, esa desconocida. Hércules de Ediciones, S.A.
- Rodríguez, A.** 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Departamento de Ingeniería Agroforestal (EPS). Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.
- Romero, M.I.; Ramil, P.; Amigo, J.; Rodríguez, M.A.; Rubinos, M.** 2004. Notas sobre la flora de humedales del noroeste ibérico. *Botanica Complutensis*. **28**: 61-66.
- Santé, I.** 2005. Diseño de una metodología y de un sistema de ayuda a la decisión espacial para la planificación de los recursos del suelo rural. Aplicación a la Comarca de Terra Chá. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Xunta de Galicia.** 1993. Plan de Desenvolvemento Comarcal. Terra Chá. Gabinete de Planificación e Desenvolvemento Territorial. Presidencia. Xunta de Galicia.
- Xunta de Galicia.** 2004. Anuario de estatística agrária. Consellería de Medio Rural.

Referencias páginas web.

<http://www.terrachanaturalmente.com/principal.htm> Portal informativo de la Comarca de Terra Chá. Fecha de consulta: 03/02/08.

<http://www.geoscopio.com/escaparate/portada.cgi?idempresa=26510> Comunidad de regantes Río Miño-Pequeño-Terra Chá. Fecha de consulta: 03/02/08.

III

FUNDAMENTOS DEL ESTUDIO DEL AGUA EN EL SUELO

CAPÍTULO

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS DEL ESTUDIO DEL AGUA EN EL SUELO

“La teoría es algo bueno, pero un buen experimento queda para siempre”
Piotr Leonidovich Kapitsa (1894-1984). Físico ruso.

ÍNDICE

Resumen	55
1. Introducción.....	57
2. Composición del suelo	57
3. Estudio del agua del suelo	58
4. Propiedades básicas que influyen en las características hidrodinámicas de los suelos ..	59
4.1. Materia orgánica.....	59
4.2. Textura.....	60
4.3. Estructura.....	60
4.4. Densidad.....	61
4.5. Porosidad.....	61
4.6. Profundidad radicular	62
4.7. pH.....	62
4.8. Carbono orgánico	62
5. Estados y contenido del agua en el suelo. Importancia del potencial.....	62
5.1. Contenido del agua del suelo.....	62
5.2. Potencial del agua del suelo	64
5.3. Estados del agua en el suelo	66
6. Cuantificación del agua en el suelo a través de las propiedades hídricas definitorias ..	67
7. Reserva de agua útil del suelo	67
8. Nivel de agotamiento permisible.....	68
9. Curva de retención de agua	68
10. Medición del potencial de agua en el suelo.....	70
11. Referencias bibliográficas	72

RESUMEN

La cuantificación y seguimiento del agua del suelo adquiere una gran relevancia en numerables aspectos, desde la propia necesidad del cultivo para su supervivencia hasta, algo tan importante como es la gestión del agua para el riego. Se requiere, por tanto, de un conocimiento interno del suelo a nivel físico, profundizando en su composición y propiedades definitorias, tanto físicas, químicas como hidráulicas. Todo ello combinado con la diversa metodología existente para la determinación tanto del contenido de agua en el suelo como su potencial, permitirá establecer la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC) y la cuantificación de la reserva de agua útil (*available water content*) (AWC) para el cultivo. A partir de este punto, siguiendo la concepción clásica, se estará en condiciones de determinar la dosis neta de riego, considerando la fracción de agotamiento, y establecer un riego que no resulte ni excesivo ni deficitario, ajustándose a las necesidades del cultivo, desde la vertiente edáfica.

1. Introducción.

La cuantificación y seguimiento del agua del suelo adquiere una gran relevancia en el sector agrícola, por tratarse de un principio de vida, siendo un elemento ineludible en todo organismo vivo. Desde otras perspectivas, su conocimiento permite realizar predicciones de inundación en Climatología y Meteorología, efectos relacionados con las oscilaciones de los regímenes de humedad del suelo e interacciones del medio con la atmósfera (Fernández, 2003). Es por ello que diversas disciplinas se han interesado, como la Bioquímica, la Climatología, la Ecología, la Hidrología, entre otras, y como no, la Agronomía. Dentro de esta disciplina, el suelo sirve de reservorio de agua para el cultivo, a la vez que le proporciona nutrientes y oxígeno. No se trata de elementos aislados, sino íntimamente relacionados, estableciendo el sistema suelo-planta-atmósfera. De esta forma, el agua del suelo forma parte del ciclo hidrológico, compuesto por una serie de compartimentos, uno de ellos el suelo. El conocimiento de las respuestas del cultivo a la diferente disponibilidad de agua permitirá establecer una programación de riegos que acarreará en muchas ocasiones el ahorro de agua en función de los diferentes estados del cultivo. Partiendo del elemento base, el suelo, su estudio y la determinación de las propiedades definitorias del mismo, facilitarán y agilizarán el proceso.

2. Composición del suelo.

El suelo proporciona un anclaje mecánico a los cultivos. Se trata de una mezcla compleja constituida por piedras, minerales característicos, raíces y restos vegetales, microorganismos vivos y muertos y huecos o poros (Moya, 1986), encontrándose constituido por tres fases: fase sólida, fase líquida y fase gaseosa. La fase sólida se encuentra compuesta por partículas minerales y materia orgánica (MO) de diferentes formas, tamaños y arreglos, y constituyen el esqueleto o matriz del suelo, constituyéndose entre ella los poros del suelo, ocupados estos por las dos fases restantes, la fase líquida y la fase gaseosa (Pizarro, 1987). Las proporciones en que estas se encuentran dependerán del estado de humedad, no obstante un suelo cultivado presenta como promedio un 45% de minerales, 5% de materia orgánica, 15 a 35% de agua y un 15 a 35% restante ocupado por aire (Narro, 1994).

La distribución por tamaños y ordenación de las partículas del suelo determinan sus relaciones con el aire y el agua (López y López, 1985), así como también de forma colectiva, la disposición de los distintos horizontes y el material de que consisten afectan tanto al crecimiento de la raíz como al movimiento y retención del agua del suelo.

La frecuencia de los poros es función de la textura, de modo que en suelos arcillosos, al estar constituidos por partículas muy pequeñas y numerosas, dejan entre sí un volumen muy grande de poros pudiendo retener gran cantidad de agua pese al reducido tamaño que estos presentan. No obstante, los poros que primero se vacían son los de tamaño grande (Tarjuelo, 1995), con un comportamiento dinámico, presentando el agua en el suelo variaciones a escala diaria (Porta *et al.*, 2003).

3. Estudio del agua del suelo.

El agua del suelo forma parte del ciclo hidrológico siendo el suelo el medio donde se llevan a cabo los procesos vitales de las plantas. Estas pueden absorber algunos principios nutritivos minerales en cantidades que superen sus necesidades inmediatas y crecer posteriormente durante semanas sin ninguna absorción adicional, pero la mayoría necesitan agua constantemente, dado que sino en los periodos de crecimiento activo en caso de no recibir el agua necesaria, se puede producir una disminución del crecimiento (Black, 1975).

Se trata, por tanto, del mayor suministrador de agua para las plantas, debido a la capacidad que posee de captar el agua procedente de la lluvia o el riego, almacenarla y cederla a medida que el cultivo lo requiere (Porta *et al.*, 2003). Por efecto de la evaporación el suelo verá aumentada su salinidad a la vez que disminuye la humedad, sobre todo en superficie.

En contraste con la mayoría de los nutrientes, que son retenidos por la planta, la característica del agua es su flujo desde el suelo a través de las raíces y los tallos a las hojas y de ahí al aire. De esta forma, las plantas utilizan grandes cantidades de agua durante su crecimiento y un cultivo en crecimiento activo puede utilizar cada día varias veces su masa de agua. Dicha cantidad es por tanto determinante para la vida de la planta, sin considerar agua adicionada, y que es básica para establecer tanto el volumen como la frecuencia del riego requerido para asegurar el desarrollo del cultivo¹⁸.

Por tanto, el objetivo que se persigue con el riego es satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos de forma que la mayor parte del agua aplicada uniforme y eficientemente quede almacenada en la zona radicular y consecuentemente se encuentre disponible para el cultivo (Tarjuelo, 1995). Así mismo, la determinación de la dosis de riego adecuada puede también ayudar eficientemente a proteger la calidad del agua subterránea reduciendo la cantidad de productos químicos que son llevados a mayor profundidad por las aguas de recarga (Trautmann y Poter, 1998).

La cantidad de agua que puede retener un suelo, dependerá de las propiedades físicas que este posea, destacando el área superficial de sus partículas, el volumen de las mismas y la distribución del tamaño de poros.

En el suelo, el agua desempeña varias funciones de importancia, pudiendo destacar:

- Se encuentra íntimamente relacionada con el crecimiento y la producción de cosecha, siendo la demanda de agua alta por la mayoría de las especies vegetales cultivadas. El exceso o deficiencia de esta en el suelo afectará adversamente a los cultivos, de modo que el exceso provoca una disminución de la aireación y su déficit provoca la caída de flores, hojas y frutos, llegando incluso a provocar la muerte del vegetal.

¹⁸ Servicio de Conservación de Suelos. 1976. Relación entre suelo-planta-agua. Departamento de Agricultura de USA.

- Se trata del medio de donde las plantas toman los nutrientes.
- Aumenta la plasticidad del suelo y reduce la resistencia a la penetración de las raíces y al crecimiento de órganos vegetales subterráneos.
- Facilita la descomposición de residuos orgánicos y su liberación de nutrientes.
- Es un agente amortiguador de los cambios de temperatura, manteniendo un ambiente más estable para el desarrollo vegetal (Narro, 1994).

4. Propiedades básicas que influyen en las características hidrodinámicas de los suelos.

Existen determinadas propiedades básicas que influyen en las características hidrodinámicas del suelo. Estas son: MO, textura, densidad, porosidad, estructura, profundidad (Z), pH y carbono orgánico (CO).

4.1 Materia orgánica.

Si bien gran cantidad de las características que presenta un suelo vienen determinadas por el tamaño de las partículas minerales y por el área superficial que presentan, estas pueden ser modificadas por la MO de los siguientes modos:

- ✓ Favoreciendo la formación de agregados y de estructura del suelo, debido a su acción cementante, incrementando la agregación de partículas sólidas y mejorando la estabilidad estructural. Todo ello ocasiona una reducción de la densidad aparente, incremento de la porosidad total del suelo, incremento de la aireación del suelo facilitando la penetración de aire y agua, incrementando la humedad disponible para las plantas y mejorando el uso del agua, modificando la velocidad de infiltración del agua y la conductividad hidráulica, aumenta la facilidad de laboreo y disminuye la conductividad térmica del suelo haciéndolo más resistente a los cambios bruscos de temperatura.
- ✓ Produciendo cambios en la superficie del suelo, tales como: oscurecimiento del color, amortiguamiento del impacto de las gotas de lluvia y del viento aumentando la resistencia a la erosión, reduce o evita la formación de costras, reduce las pérdidas de agua por evaporación empleándose como “acolchado” y favorece el almacenaje de agua aprovechable y el humedecimiento del perfil del suelo a mayor profundidad.
- ✓ Mejora la fertilidad natural del suelo a través de diversos tipos de acción: como fuente de nutrientes para plantas, microorganismos y otros seres vivos del suelo, liberando nutrientes durante su descomposición y produciendo ácidos orgánicos capaces de disolver minerales poniéndolos en forma aprovechable por las plantas, aumentando la capacidad de intercambio catiónico del suelo, elevando la capacidad

amortiguadora de cambios en el pH y formando compuestos orgánico-minerales que favorecen la absorción de nutrientes por las plantas (Narro, 1994).

4.2 Textura.

El tamaño relativo de las partículas de un suelo se expresa en el término “*textura*”, refiriéndose esta a la mayor o menor finura del suelo, es decir, a la proporción relativa de los distintos tamaños de grupos de partículas minerales en un suelo determinado (Foth, 1986). Es por ello que las clases de textura de un suelo se basen en las diferentes combinaciones de arena, limo y arcilla que se den, quedando estas recogidas en el “*triángulo textural*”.

El número de combinaciones posibles de arena (ARE), limo (LIM) y arcilla (ARC) es muy grande, no obstante en el triángulo textural se recogen 12 “*clases texturales*”. Los suelos de cada clase poseen aproximadamente la misma superficie específica y diversas características comunes.

Las partículas se definen en función de su diámetro, considerando que las partículas no esféricas presentan un diámetro equivalente cuya dimensión se sitúa entre la máxima y la mínima, de modo que la fracción de ARE está constituida por partículas minerales cuyo diámetro está comprendido entre 0,05 y 2 mm, la fracción de LIM entre 0,002 y 0,05 mm y la ARC aquella cuyo tamaño es inferior a 0,002 mm.

La textura es una característica importante porque influencia la fertilidad y ayuda a determinar la velocidad de consumo de agua, el almacenaje de agua en el suelo, la laborabilidad y la amplitud de aireación. Se trata de una de las cualidades más estables del suelo, pudiendo ser modificada ligeramente por prácticas de manejo, las cuales originarían la mezcla de las distintas capas del suelo (USDA, 2004)¹⁹.

Los suelos donde predomina la ARC son capaces de almacenar mucha agua, que queda retenida en los microporos, mientras que en un terreno arenoso el agua circula más fácilmente y su retención es mínima.

4.3 Estructura.

La estructura del suelo es la ordenación de las partículas individuales para formar unidades mayores y resulta de la tendencia que experimentan las partículas más finas de unirse formando agregados (Thompson y Troeh, 1988). Estos presentan planos débiles entre sí. Se trata de una de las características físicas del suelo con una mayor importancia agrícola, siendo no obstante, una de las menos entendidas y mal manejadas, destruyéndose en muchas ocasiones los agregados por efecto de la labranza y provocando el

¹⁹ <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>

empobrecimiento de suelo. Se encuentra fuertemente afectada por cambios en el clima, la actividad biológica y las prácticas de manejo (USDA, 2004)²⁰.

La estructura modifica la influencia de la textura respecto a las relaciones de humedad y aireación (Foth, 1986), velocidad de infiltración del agua, conductividad hidráulica, resistencia a la penetración de las raíces, facilidad de emergencia y nacimiento de plántulas, densidad aparente (DAP), porosidad, retención de agua, temperatura del suelo y configuración de los poros.

La estabilidad estructural permite una mayor velocidad de infiltración y una mayor consistencia a la erosión, siendo los agregados no resistentes los responsables de la formación de costras superficiales. Esta inestabilidad se deberá al tipo de arcilla y al pH entre otros factores (Narro, 1994).

4.4 Densidad.

La *densidad aparente* (DAP) es la relación de la masa al volumen macroscópico ocupado por las partículas del suelo más el espacio poroso. Se expresa como el peso del suelo seco dividido por el volumen de dicho suelo.

La *densidad real* (DR) es la relación de la masa total de las partículas sólidas a su volumen total, excluyendo el volumen ocupado por los poros entre las partículas. Se expresa como el peso del suelo seco dividido por el volumen de las partículas sólidas (López y López, 1985).

4.5 Porosidad.

La porosidad del suelo es la fracción de su volumen ocupado por los poros, tanto si están llenos de agua, como si lo están de aire o una mezcla de ambos (Conesa, 1988). Para su determinación se puede emplear la ecuación III.1:

$$P = 1 - \frac{DAP}{DR} \quad (\text{III.1})$$

siendo:

P: porosidad.

DAP: densidad aparente (g/cm³).

DR: densidad real (g/cm³).

²⁰ <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>

4.6 Profundidad radicular.

La profundidad de los suelos agrícolas susceptible de ser explorada por el sistema radicular de los cultivos, permitirá no solamente ejercer una función de anclaje, sino también optimizar manejo y rendimientos. No obstante, se trata de una propiedad que generalmente sufre cambios poco significativos en condiciones naturales. Es importante destacar que en función del riego aplicado y/o la disponibilidad de agua que tengan los cultivos, la profundidad radicular se verá modificada (Warkentin, 1991)

4.7 pH.

Mediante el pH se determina el grado de alcalinidad o acidez de un suelo, indicado en función de la concentración de iones de hidrógeno que posea. La amplitud de los niveles oscila del 0 al 14 de modo que a 0 se encuentra la mayor acidez y a 14 la mayor alcalinidad. El pH afecta tanto a nivel de cultivo (elección, desarrollo...) como a nivel de las reacciones químicas y disponibilidad de nutrientes en dicho suelo.

4.8 Carbono orgánico.

El contenido de CO se relaciona con el contenido de MO, fertilidad y capacidad de soporte del cultivo (Zúñiga y Palacio, 2005). La incorporación de CO en suelos con poco contenido en ARC ayuda a estabilizar los agregados. De esta forma, incrementar la incorporación de CO a los suelos de textura franco-arenosa y/o arenosa-franca, por medio de la selección de cultivos y de la implantación de pastos, es una opción importante para el mejoramiento y/o mantenimiento de su condición estructural²¹. Diversas investigaciones se centran en su estudio (Cruz, 2008).

5. Estados y contenido del agua en el suelo. Importancia del potencial.

5.1 Contenido del agua del suelo.

De forma simplificada, el agua del suelo puede considerarse agrupada en tres tipos, en función del grado de unión con las distintas partículas (Tarjuelo, 1995; Conesa, 1988):

- *Agua higroscópica*, que es el agua fuertemente fijada por las partículas de suelo y que no está disponible por las plantas.
- *Agua capilar*, que es el agua retenida en los poros del suelo venciendo la acción de la gravedad y siendo: una parte más móvil y por tanto aprovechable por la planta y una parte más unida a las partículas del suelo y por tanto no aprovechable.

²¹ http://www.concienciarural.com.ar/Articulos/Suelos/La_Estructura_del_Suelo/Art13.aspx

- *Agua libre o agua de gravedad*, que es la que inicialmente llena los poros del suelo y que posteriormente es arrastrada por la acción de la gravedad;

si bien algún autor (Porta *et al.*, 2003) considera que estas categorías resultan arbitrarias y que consideran al suelo como algo discontinuo. Por ello, el estado del agua en el suelo se debe describir en términos de cantidad de agua (contenido de agua) y de la energía asociada a las fuerzas que sostienen el agua en dicho suelo (potencial del agua) (Bilskie, 2001).

El *contenido de agua* en el suelo se refiere a la cantidad de agua que se haya en cada posición de un suelo en un momento determinado. Dicha cantidad se puede expresar en términos de masa o volumen, tal como se detalla a continuación (Miccuci *et al.*, 2003):

- *Contenido másico o gravimétrico de agua*: Es la masa de agua por masa de suelo seco (Ec. III.2).

$$\theta_g = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100 \quad (\text{III.2})$$

siendo:

θ_g : humedad gravimétrica (%).

M_w : masa de agua (Kg).

M_s : masa de suelo seco (Kg).

- *Contenido volumétrico de agua*: Es el volumen de agua líquida por volumen de suelo (Ec. III.3).

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} \cdot 100 \quad (\text{III.3})$$

siendo:

θ_v : humedad volumétrica (%).

V_w : volumen de agua en un momento dado (m^3).

V_t : volumen total del suelo (m^3).

Ambos contenidos están relacionados por la ecuación III.4:

$$\theta_v = \theta_g \frac{\rho_d^b}{\rho_w} \quad (\text{III.4})$$

siendo:

ρ_a^b : Densidad aparente del suelo seco (kg/m^3).

ρ_w : Densidad del agua (1000 kg/m^3).

El empleo del contenido volumétrico presenta ciertas ventajas frente al gravimétrico, al encontrarse directamente relacionado con la porosidad llena de agua y a las situaciones reales, sean estas en campo o laboratorio (Porta *et al.*, 2003).

De esta forma, el contenido de agua indica cuánta agua está presente en el suelo y que puede ser utilizada para estimar la cantidad de agua almacenada en un perfil o la dosis de riego requerida para alcanzar la cantidad de agua deseada.

5.2 Potencial del agua del suelo.

El potencial del agua del suelo es la expresión del estado de la energía del agua en el suelo y se debe saber o estimar para describir el flujo del agua y conocer la energía con la que está retenida. Representa la energía necesaria para separar una unidad de peso de agua (de masa o de volumen) de la matriz del suelo. Las moléculas de agua están sometidas a numerosas fuerzas adhesivas y cohesivas. Por tanto, puede decirse que el agua en el suelo está sometida a una presión, con varios componentes, algunos de los cuales tienden a expulsar el agua del medio (presión positiva) y otros tienden a retenerla (presión negativa), siendo la suma de todos ellos el potencial total.

El estado energético y el movimiento del agua en el suelo vienen determinados por su energía potencial en cada punto, expresada como una diferencia de potencial, no requiriéndose conocer el valor absoluto de la misma en cada punto, sino un valor relativo respecto a un estado de referencia arbitrariamente definido.

El potencial de agua del suelo se puede considerar como la cantidad de trabajo que es preciso aplicar para transportar reversible e isotermicamente la unidad de cantidad de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto considerado (Livingston, 1993). Dicho estado de referencia fue establecido por el Comité de Terminología de la Comisión de la *International Society of Soil Science* como un depósito hipotético de agua pura, libre, a presión atmosférica, a igual temperatura que el agua del suelo y a una elevación de referencia dada y fija (Porta *et al.*, 2003), en cuyo caso se toma potencial cero.

Las unidades en que se mide son las de presión, empleando en esta investigación MPa.

El potencial tiene cuatro componentes (Baver y Gardner, 1972) (Ec. III. 5):

Ψ_{mt} : potencial matricial.

Ψ_o : potencial osmótico.

Ψ_g : potencial gravitacional.

Ψ_p : potencial de presión.

siendo:

$$\Psi = \Psi_{mt} + \Psi_o + \Psi_g + \Psi_p \quad (\text{III.5})$$

El *potencial matricial* es generado por los mecanismos de retención de agua por el suelo (adhesión y cohesión) y su denominación es debida a las fuerzas que crean este potencial, las cuales están asociadas a la matriz del suelo. Cuanto más seco está el terreno, más bajo será el potencial mátrico y mayor es la presión que habría que aplicar para extraer el agua del suelo.

El *potencial osmótico* se presenta como consecuencia de diferencias de concentración ante la presencia de membranas semipermeables, produciéndose un flujo hacia la solución más concentrada. La presión que origina este movimiento es la presión osmótica, que equivale en magnitud al potencial osmótico. En el suelo las membranas semipermeables son las membranas celulares de las raíces, de forma que cuando la solución del suelo tiene un alto contenido en sales, la planta debe realizar un esfuerzo suplementario para absorber el agua.

El *potencial gravitacional* es debido a la altura geométrica del punto considerado respecto al plano de referencia.

El *potencial de presión* sólo se presenta en el caso de suelos saturados y corresponde con la presión ejercida sobre el punto considerado por el agua que satura el suelo.

El potencial matricial y el de presión son excluyentes, por lo que se consideran en conjunto según ecuación III.6:

$$\Psi_m = \Psi_p + \Psi_{mt} \quad (\text{III.6})$$

Según la situación del suelo se presentan distintos valores:

- En un suelo saturado: $\Psi_p > 0$, $\Psi_{mt} = 0$, $\Psi_m > 0$.
- En un suelo subsaturado: $\Psi_p = 0$, $\Psi_{mt} < 0$, $\Psi_m < 0$.
- En la superficie de la capa freática: $\Psi_p = 0$, $\Psi_{mt} = 0$, $\Psi_m = 0$.

Para evitar que tome valor negativo Ψ_{mt} en los suelos subsaturados se le cambia el signo, surgiendo así el concepto de “*tensión de agua en el suelo*”.

El *potencial hidráulico* se expresa considerando el potencial mátrico y el potencial gravitacional (Ec. III.7):

$$\Psi_H = \Psi_g + \Psi_{mt} \quad (\text{III.7})$$

siendo:

Ψ_H : potencial hidráulico.

Ψ_g : potencial gravitacional.

Ψ_{mt} : potencial mátrico.

El agua se desplazará en el suelo en sentido de los potenciales hidráulicos decrecientes (Pizarro, 1987; Tarjuelo, 1995; Fuentes, 1998).

5.3 Estados del agua en el suelo.

Los estados del agua del suelo se pueden clasificar, considerando su utilización por las plantas, en (Peters, 1965):

- Saturación.
- Capacidad de campo.
- Punto de marchitamiento permanente²².

Un suelo se presenta “*saturado*” después de una lluvia copiosa o un riego abundante, o bien cuando existe un extracto impermeable a poca profundidad que impide el drenaje. De esta forma el suelo tiene todos sus poros ocupados por agua lo cual si se alarga en el tiempo ocasiona anoxia radicular. Es, por tanto, la capacidad máxima de retención de agua por parte de un suelo (Conesa, 1988), y en esa situación el agua ocupa los poros pequeños y el aire ocupa una gran parte de los poros grandes.

La “*capacidad de campo*” (*field capacity*) (FC) es el contenido de agua de la porción húmeda del suelo, después de que el exceso ha sido drenado y la velocidad de descenso ha disminuido en grado considerable (Black, 1975).

La dificultad impuesta por esta definición es la interpretación del tiempo necesario para que esto ocurra, siendo fijado inicialmente por diversos investigadores en un tiempo de dos o tres días después de un riego o una lluvia fuerte, pero en numerosos suelos, incluso de textura gruesa, continúan drenando durante varias semanas (Wild, 1992).

Es por ello que, para vencer esta dificultad, se ha definido el contenido de humedad a capacidad de campo en términos de tensión matricial.

El “*punto de marchitamiento permanente*” (*permanent wilting point*) (PWP) es el estado en el que las plantas ya no pueden absorber toda el agua que necesitan y se marchitan irreversiblemente, dado que a partir de la capacidad de campo, el agua del suelo se va perdiendo progresivamente por evaporación y/o porque ha sido absorbida por las plantas. Se puede definir como el porcentaje de humedad en el cual la fuerza de succión de

²² A la FC y al PWP se les denomina en sucesivos capítulos de esta memoria a partir del término anglosajón “*hydrolimits*” (Skalová *et al.*, 2000; Štekauerová *et al.*, 2002; Orfánus, 2005; Orfánus y Mikulec, 2005).

la planta es exactamente igual a la presión negativa que el suelo ejerce sobre el agua (López y López, 1985).

6. Cuantificación del agua en el suelo a través de las propiedades hídricas definitorias.

El contenido de agua en el suelo pasa por su cuantificación empleando para ello la metodología más genérica. Globalmente se considera que para la FC, aunque su valor es variable, un valor aceptable para la mayoría de los suelos oscila entre 10 a 33 kPa, siendo mayoritariamente considerado este último, 0,033 MPa, en caso de tratarse de suelos pesados²³.

Para el PWP, si bien su valor también es variable, se ha tomado como referencia 1500 kPa, es decir, cuando la tensión matricial tiene un valor de 15 atm, si bien al igual que ocurre con la FC este valor depende del tipo de suelo y de sus propiedades físicas (Tarjuelo, 1995; Gerakis y Zalidis, 1998; Porta *et al.*, 2003; Pineda y Vilorio, 1992)²⁴.

7. Reserva de agua útil del suelo.

El “*agua útil*” es una característica relacionada con la respuesta de la planta y se trata de la máxima cantidad de agua que puede extraerse por las plantas en un perfil de suelo. Se define como la cantidad de agua que retiene un suelo entre su situación a FC y su PWP (Wild, 1992).

En este contexto, la capacidad de retención de agua de un terreno se identifica con el agua disponible o agua útil²⁵.

La “*reserva útil*”, también denominada “*reserva de agua útil*” (*available water content*) (AWC), es la cantidad máxima de agua utilizable en el perfil del suelo explorable por las raíces (Ec. III.8).

$$AWC = (FC - PWP) \cdot DAP \cdot Z \quad (III.8)$$

siendo:

AWC: reserva agua útil (mm).

FC: humedad del suelo a capacidad de campo (gr/gr).

²³ <http://www.eda.etsia.upm.es/climatologia/aguasuelo/CRAD.htm>

²⁴ <http://www.eda.etsia.upm.es/climatologia/aguasuelo/CRAD.htm>

²⁵ <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/ES/GF0095ES.HTM>

PWP: humedad del suelo a punto de marchitamiento (gr/gr).

DAP: densidad aparente (gr/cm³).

Z: profundidad del suelo explorado por las raíces (mm).

8. Nivel de agotamiento permisible.

El nivel de agotamiento permisible es un porcentaje de la AWC que se establece como referencia en las programaciones de riego, siendo la base adoptada para la toma de decisiones en programaciones de riego cuando se pretende determinar la cantidad y el momento de riego, es decir, la dosis y la frecuencia de riego (Villar y Ferrer, 2005).

Si la AWC la multiplicamos por un coeficiente llamado “*fracción de agotamiento del agua disponible*” obtenemos la llamada “*reserva de agua fácilmente disponible*”, siendo la cantidad de agua que pueden absorber las plantas sin hacer un esfuerzo excesivo, y por tanto, sin que exista una disminución del rendimiento.

Tradicionalmente, se aplica el criterio de regar cuando se han consumido dos tercios del agua almacenada y en el suelo queda la tercera parte de la misma (Ec. III.9):

$$DN = \frac{2}{3} \cdot AWC \quad (\text{III.9})$$

siendo:

DN: dosis neta (cm³/cm³).

AWC: reserva agua útil (cm³/cm³).

pudiéndose particularizar en la cuantificación del nivel de agotamiento admisible en función del cultivo y las distintas fases de desarrollo presentadas en el ciclo reproductivo (Martin *et al.*, 2007).

9. Curva de retención de agua.

La relación entre el contenido en agua del suelo y la succión del agua del mismo es una parte fundamental de la caracterización de las propiedades hidráulicas de un suelo.

El contenido de agua en el suelo influye fuertemente en las distintas propiedades de este, entre ellas la consistencia, plasticidad y compactación (Ruiz *et al.*, 2002).

Para un mismo contenido de humedad, en función del tipo de suelo de que se trate, el agua va a ser retenida con una energía u otra, debido a la existencia de una relación entre la humedad y el potencial mátrico ($\theta_v - \Psi_m$) distinta. Dicha relación, tal y como se comentó con anterioridad, depende de la textura y la estructura, dado que ambas propiedades afectan al tamaño y al número de poros (Klute, 1986).

Los suelos con buena estructura tienen una mayor porosidad y por ello cuando están saturados ($\Psi_m = 0$), contienen más agua. Cuando el potencial mátrico se aproxima a cero, el efecto de la estructura predomina sobre el de la textura y viceversa para valores más negativos de Ψ_m .

El contenido de MO tiene una gran relevancia dada su naturaleza hidrófila y por su influencia en la modificación de la estructura, de forma que puede modificar el contenido de agua en el medio.

El proceso de desecación-humectación del suelo presenta el fenómeno de la “histéresis”, lo que provoca que para un mismo potencial existan dos contenidos de humedad, siendo esta mayor en el proceso de desecación (Hillel, 1998).

La curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC) relaciona el potencial de un suelo en particular con su contenido en agua²⁶. No existe una homogeneidad en la denominación de la relación: “*curva característica de retención de agua*”, “*curva característica de la humedad del suelo*” y “*curva de pF*” o “*curva tensión humedad*”, entre otras (Fig. III.1).

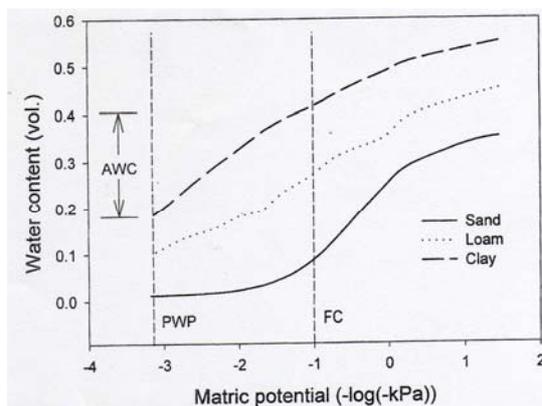


Figura III.1. “WRC en función de las propiedades del suelo” (Topp *et al.*, 1997)

La WRC es considerada como una de las propiedades hidráulicas más importantes y resulta imprescindible en los diferentes modelos de simulación del movimiento de agua en suelos no saturados (Ruíz *et al.*, 2002; Hunt y Skinner, 2005). Por ello, la medida de las WRCs características del suelo y la fiabilidad de los datos obtenidos son muy importantes para la caracterización adecuada de otras propiedades físicas del suelo y para describir la influencia de la labranza y de la compactación en la estructura del suelo (Topp *et al.*, 1993).

Existen un gran número de factores que limitan las mediciones, especialmente debido a que la relación entre el contenido de agua y el potencial mátrico no es reversible y presenta el citado fenómeno de la histéresis, lo cual ocasiona que a menudo sean difíciles

²⁶ <http://www.decagon.com/wp4/>

de interpretar las mediciones en campo a menos que las condiciones estén controladas. Es por ello que dichas curvas se midan generalmente en laboratorio en donde las condiciones están perfectamente definidas.

Estas curvas se han empleado extensamente para la predicción del flujo de agua y otros líquidos del suelo y se han realizado muchas tentativas de definir las funciones matemáticas adecuadas que caractericen la curva, probando modelos (Campbell y Campbell, 1982; Campbell, 1985) para estimar la retención de humedad a distintas tensiones, consistentes la mayoría en ecuaciones de regresión o en modelos de simulación (Walczack *et al.*, 2006).

Las muestras utilizadas para la determinación de la curva pueden ser alteradas o inalteradas. Inicialmente los estudios se hicieron con muestras inalteradas, para no modificar la estructura (Topp *et al.*, 1993), no obstante, en algunos casos dada la imposibilidad de conseguir muestras de este tipo, o porque no es conveniente invertir el esfuerzo requerido para obtenerlas, pueden realizarse los estudios con muestras alteradas, siendo deseable conocer inicialmente la densidad de dicha muestra (Cancela, 2004). Es importante mencionar que las muestras alteradas, al realizar las curvas estas van a ver modificado su trazado a potenciales altos (Fig. III.2):

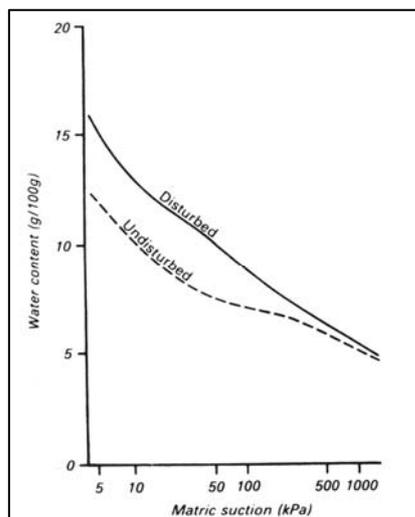


Figura III.2. “Efecto de las muestras alteradas en la WRC” (Townend *et al.*, 2001)

10. Medición del potencial de agua en el suelo.

El agua del suelo se puede cuantificar mediante métodos que determinan el contenido de agua o el potencial de agua de dicho suelo. Ambos parámetros se relacionan dentro de un mismo suelo, pero dada la gran variabilidad de los mismos se hace necesaria su determinación en cada caso en particular. De cualquier modo, resulta muy complicado realizar estimaciones fiables del contenido de humedad en el suelo para la zona radicular de una determinada área como consecuencia de las irregularidades que se presentan en la

distribución de las raíces, como en las variaciones espaciales de las propiedades físicas del suelo o defectos en la uniformidad de reparto del agua de riego.

Existen diferentes clasificaciones respecto a los métodos de medición (Fuentes, 1998; Tarjuelo, 1995; Villar y Ferrer, 2005), asemejándose los criterios de clasificación:

- ❖ *Métodos directos:*
 - Determinación del contenido de agua
 - Método gravimétrico
 - Determinación del potencial hídrico
 - Tensiómetros
- ❖ *Métodos indirectos:*
 - Determinación del contenido de agua
 - Método del aspecto y la sensación
 - Técnicas nucleares
 - Método de la dispersión del neutrón
 - Atenuación de rayos gamma
 - Métodos basados en la medida de la constante dieléctrica del medio
 - Reflectometría en el dominio del tiempo (*time domain reflectometry*) (TDR)
 - Reflectometría en el dominio de la frecuencia (*frequency domain reflectometry*) o sensores de capacitancia
 - Métodos ópticos
 - Velocity differentiation domain (VDD)
 - Cells Weighable
 - Técnicas de detección alejada
 - Radar penetrante (GPR)
 - Disipación de calor
 - Determinación del potencial hídrico
 - Tensiómetros
 - Sensores de disipación de calor (conductividad térmica)
 - Resistencia eléctrica:
 - Sensores de bloques de yeso o bloques porosos
 - Sensores de matriz granular
 - Técnica del papel de filtro
 - Equilibrio del vapor
 - Placa de presión
 - Método osmótico
 - Psicrómetros de termopar
 - Método que combina instrumentos TDR/FD con sensores de medida del potencial mátrico
- *Métodos estimativos / predictivos:*
 - Funciones de pedotransferencia (PTFs)
 - Redes neuronales (*artificial neural network*) (ANN) ó (*neural network*) (NN)

La elección de una metodología u otra quedará a elección del investigador en función de diferentes criterios (intervalo de aplicación, coste, facilidad de manejo,

precisión, tiempo demandado...). Diversos autores han recogido las diferentes características de estas metodologías (Richards, 1949a; Campbell y Gee, 1986; Gardner, 1986; Fredlund, 1992; Phene *et al.*, 1992; Livingston, 1993; Rowell, 1994; Zazueta y Xin, 1994; Mullins, 2001; Salgado, 2001; Flint *et al.*, 2002; Shock, 2003 y 2004; Carrow *et al.*, 2004; Ley *et al.*, 2004; Scanlon *et al.*, 2002; Villar y Ferrer, 2005).

11. Referencias bibliográficas.

- Andraski, B.J.; Scanlon, B.R.** 2002. Thermocouple Psychrometry. En: Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. Ed. J.H. Dane & G.C Topp. Soil Science Society of America. Madison, Wis. pp: 609-642.
- Baver, L.D.; Gardner, W.H.** 1972. Soil physics. Fourth Edition. John Wiley and Sons, Inc. USA.
- Bilskie, J.** 2001. Soil water status: content and potencial. Campbell Scientific, Inc. Fecha de consulta: 02/03/2004. Disponible en:
<ftp://ftp.campbellsci.com/pub/outgoing/apnotes/soilh20c.pdf>.
- Black, C.A.** 1975. Relaciones suelo-planta. Tomo I. Ed. Hemisferio Sur, S.R.L. Argentina.
- Campbell, G.S.** 1985. Soil physics with basic. Developments in Soil Science. **14**. Elsevier. pp: 150.
- Campbell, G.S.; Campbell, M.D.** 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. En: Advances in irrigation. Daniel Hillel (Ed). New york. Academic Press. Vol I.
- Campbell, G.S.; Gee, G.W.** 1986. Water potential. Miscellaneous Methods. En: Methods of soil analysis. Part. I: Physical and Mineralogical Methods. Second Edition. Ed. A. Klute.
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Carrow, R.N.; Duncan, R.R.; Waltz, C.** 2004. Turfgrass irrigation Scheduling Techniques. Fecha de consulta: 09/04/2004. Disponible en:
http://commodities.caes.uga.edu/turfgrass/waterconservation/PDF_Files/Article-08.pdf.
- Conesa, V.** 1988. Riegos a presión media y alta frecuencia. Diseño, cálculo, instalación, elementos auxiliares. Prensa XXI, S.A. Barcelona.
- Cruz, C.O.** 2008. Distribución de las reservas de carbono orgánico en los suelos de México. Publicación *on line* del Instituto de Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Mexico. Fecha consulta: 23/03/2008. Disponible en:

http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/eventos/cng2007/resumen/SitioNew/dctos/rescruzetchevers_carbonoorganico.pdf

- Fernández, J.** 2003. Dinámica del agua en suelos con gravas. Tesis Doctoral. Estación Experimental del Zaidín. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Universidad de Granada.
- Flint, A.L.; Campbell, G.S.; Ellet, K.M.; Calissendorff, C.** 2002. Calibration and temperature correction of heat dissipation matric potential sensors. *Soil Science Society of America Journal*. **66**: 1439-1445.
- Foth, H.D.** 1986. Fundamentos de la ciencia del suelo. Compañía Editorial Continental, S.A. de CV. México.
- Fredlund, D.G.** 1992. Background, theory, and research related to the use of thermal conductivity sensors for matric suction measurements. En: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Soil Science Society of America. Special publication. **30**: 249-261.
- Fuentes, J.L.** 1998. Técnicas de riego. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Gardner, W.H.** 1986. Water content. En: Methods of soil analysis. Part. I: Physical and Mineralogical Methods. Second Edition. Ed. A. Klute. pp: 493-544.
- Gerakis, A.; Zalidis, G.** 1998. Estimating field-measured, plant extractable water from soil properties: beyond statistical models. *Irrigation and Drainage Systems*. **12**: 311-322.
- Hillel, D.** 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press.
- Hunt, A.G.; Skinner, T.E.** 2005. Hydraulic conductivity limited equilibration: effect on water retention characteristics. *Vadose Zone Journal*. **4**: 145-150.
- Klute, A.** 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute, A. (ed). Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Monograph Number 9 (Second Edition). (Klute, A. ed.). ASA, Madison, WI. pp: 635-686.
- Ley, T.W.; Stevens, R.G.; Topielec, R.R.; Neibling, W.H.** 2004. Soil water monitoring & measurement. *A Pacific Northwest Publication*. Washington State University. Fecha de consulta: 26/02/2004. Disponible en:
<http://cru.cahe.wsu.edu/CEPublications/pnw0475/pnw0475.html>
- Livingston, N.J.** 1993. Soil water potential. En: Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Carter, M.R. Lewis Publishers. pp: 559-567.
- López, J.; López, J.** 1985. El diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de campo y laboratorio. 4ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

- Martin, D.; Kincaid, D.; Lyle, W.** 2007. Design and operation of sprinkler systems. En: Design and operation of farm irrigation systems. Ed. Glenn J. Hoffman, Robert G. Evans, Marvin E. Jensen, Derrel L. Martin and Ronald L. Elliot. 2nd edition. ASABE, St. Joseph, MI, USA. pp: 557-631.
- Micucci, F.G.; Taboada, M.A.; Gil, R.** 2003. El agua en la producción de cultivos extensivos: El suelo como un gran reservorio eficiente. Fecha de consulta: 28/10/2003. Disponible en:
<http://www.elsitioagricola.com/articulos/micucci/ElAguaEnLaProduccionDeCultivosExtensivos-I.pdf>.
- Moya, J.A.** 1986. Riego localizado a goteo y a pie. Ed. J.A. Moya Talens. Benissa.
- Mullins, C.E.** 2001. Matric potential. En: Soil and Environmental Analysis: Physical Methods (2nd Edn). (Smith, K.A.; Mullins, C., eds). Marcel Dekker, New York, USA. pp: 65-93.
- Narro, E.** 1994. Física de suelos. Con enfoque agrícola. Ed. Trillas. España. pp: 195.
- Orfánus, T.** 2005. Regional processing of soil drought indicators: conditional hydrolimits and water storage capacity. En: INYS Workshop on Hydrology, Smolenice.
- Orfanus, T.; Mikulec, V.** 2005. Regionalization of potential water storage capacity of agricultural landscape-a quantification of soil accumulation function. *Geophysical Research Abstracts*. 7.
- Peters, D.B.** 1965. Water availability. En: Methods of soil analysis. Physical and mineralogical properties. Including statistic of measurement and sampling. Agronomy n° 9. Part. I. American Society of Agronomy. Ed. Black, C.A.; Evans, D.D.; White, J.L.; Ensminger, L.E. Clark, F.E. pp: 279-285.
- Phene, C.J.; Clark, D.A.; Cardon, G.E.; Mead, R.M.** 1992. Soil matric potential sensor research an applications. En: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Soil Science Society of America. Special publication. 30: 263-280.
- Pineda, C.; Viloría, J.** 1992. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la Cuenca del Lago de Valencia. *Revista Venesuelos*. 1-2: 39-44.
- Pizarro, F.** 1987. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, microaspersión, exudación. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España.
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C.** 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España.
- Richards, L.A.** 1949a. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*. 68: 95-112.

- Rowell, D.L.** 1994. Soil Science. Methods and applications. Longman, Scientific and technical. England.
- Ruiz, M.E.; Utset, A.; Medina, H.; Fleitas, E.** 2002. Algunos aspectos sobre la curva de tensión de humedad. Monografía Ciencias Básicas. Universidad Agraria de la Habana. Cuba.
- Salgado, E.** 2001. Curso: Relación suelo, agua, planta. Ed. Universitarias de Valparaíso. Universidad Católica de Valparaíso. Chile.
- Scanlon, B.R.; Andraski, B.J.; Bilskie, J.** 2002. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. En: Dane, J.H.; Topp, G.C. (eds.). Methods of soil analysis, part 4, physical methods. SSSA, Madison, WI. pp: 643-670.
- Servicio de Conservación de Suelos.** 1976. Relación entre suelo-planta-agua. Departamento de Agricultura de USA.
- Shock, C.C.** 2003. Soil water potential measurement by granular sensors. En: Encyclopedia of Water Science. pp: 899-903.
- Shock, C.C.** 2004. Instrumentation for soil moisture determination. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en:
<http://www.cropinfo.net/AnnualReports/1997/instrumentation.wq.html>
- Skalová, J.; Štekauerová, V.; Šútor, J.** 2000. Využitie pedotransferných funkcií na určenie hydrolimitov (Estimation of the hydrolimits using pedotransfer functions). Bioklimatológia a životné prostredie. En: XIII. Bioklimatologická konferencia SBkS a ČBkS. Košice, Eslovaquia.
- Štekauerová, V.; Skalová, J.; Šútor, J.** 2002. Using of pedotransfer functions for assessment of hydrolimits. *Rostlinná Výroba*. **48**: 407-412.
- Tarjuelo, J.M.** 1995. El riego por aspersion y su tecnología. Ed. Mundi-Prensa. España.
- Thompson, L.M.; Troeh, F.R.** 1988. Los suelos y su fertilidad. Ed. Reverté, S.A. Barcelona.
- Topp, G.C.; Galvanov, Y.T.; Ball, B.C.; Carter, M.R.** 1993. Soil water desorption curves. En: Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Carter, M.R. Lewis Publishers.
- Topp, G.C.; Reynolds, W.D.; Cook, F.J.; Kirby, J.M.; Carter, M.R.** 1997. Physical attributes of soil quality. En: Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science. **25**. Elsevier.
- Townend, J.; Reeve, M.J.; Carter, A.** 2001. Water release characteristic. En: Smith, K.A.; Mullins, C. (eds). Soil and Environmental Analysis: Physical Methods (Second Edition). Marcel Dekker, New York, NY. pp: 95-140.

- Trautmann, N.M.; Potter, K.S.** 1998. Water and the soil. Natural Resources Cornell Cooperative Extension. Cornell University.
- USDA.** 2004. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>.
- Villar, J.M.; Ferrer, F.** 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. pp: 23-86.
- Walczack, R.T.; Moreno, F.; Stawiński, C.; Fernandez, E.; Arrue, J.L.** 2006. Modelling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology*. **329**: 527-533.
- Warkentin, B.P.** 1991. Protección de la calidad del agua subterránea a través de un riego eficiente. Ceremonia Inaugural Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua. Fecha de consulta: 23/03/2008. Disponible en: www.unesco.org/uy/phi/libros/uso_eficiente/indice.html
- Wild, A.** 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Zazueta, F.S.; Xin, J.** 1994. Soil moisture sensors. Florida Cooperative Extension Service. Bulletin 292. April 1994. University of Florida.
- Zúñiga, F.B.; Palacio, A.G.** 2005. Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán. Instituto Nacional de Ecología. México.

Referencias páginas web.

- http://www.concienciarural.com.ar/Articulos/Suelos/La_Estructura_del_Suelo/Art13.aspx
La estructura del suelo. Revista Conciencia Rural. Fecha consulta: 01/12/2007.
- <http://www.eda.etsia.upm.es/climatologia/aguasuelo/CRAD.htm> Capacidad de retención de agua disponible. Fecha de consulta: 11/11/2003.
- <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/ES/GF0095ES.HTM> Humedad disponible del suelo. Fecha de consulta: 11/11/2003.
- <http://www.decagon.com/wp4/> Application notes. Decagon Device, Inc. Fecha Consulta: 04/02/2004-12/04/2008.

IV

TOMA DE MUESTRAS

CAPÍTULO

CAPÍTULO IV

TOMA DE MUESTRAS

“Las Ciencias tienen las raíces amargas, pero muy dulces los frutos”
Aristóteles (384-322 AC). Científico griego y filósofo.

ÍNDICE

Resumen	85
1. Introducción.....	87
2. Muestreo	87
2.1. Selección de los puntos de muestreo	87
2.2. Realización del muestreo.....	88
2.3. Condiciones de transporte	88
2.4. Operaciones previas	88
2.5. Tipos de análisis a realizar	89
2.6. Condiciones de realización.....	89
2.7. Almacenamiento y conservación de las muestras	89
3. Descripción de la totalidad de las muestras.....	90
3.1. Características generales para la zona de estudio.....	90
3.2. Características en función del sector considerado.....	92
3.3. Características en función del tipo de suelo considerado.....	94
4. Muestras consideradas en los diferentes ensayos.....	96
5. Referencias bibliográficas	97

RESUMEN

Debida a la gran heterogeneidad del suelo, el proceso de toma de muestras resulta una operación difícil que requiere de un protocolo y/o consideraciones varias que permitan que las muestras extraídas resulten representativas de la zona de estudio considerada. Para ello, se establecen unas etapas que abarcan desde la selección de los puntos de muestreo, hasta la forma de transporte y conservación, entre otras.

En este capítulo se describe todo este proceso y se presentan las características de las muestras consideradas en los diferentes ensayos contemplados en esta investigación, presentando las diferentes relaciones existentes.

1. Introducción.

El suelo, es un medio extremadamente heterogéneo, presentando características que se deben tanto a las condiciones ambientales, de manejo, estructurales, de composición, biológicas, etc. Todo ello provoca que cualquier estudio que se realice deberá ser lo más representativo del medio, siendo este punto bastante complejo de conseguir. El objetivo de la toma de muestras es recabar la máxima información sobre un suelo en particular y deberá seguir un protocolo que indique el método de selección de los puntos a muestrear, la forma de extracción de la muestra del suelo, condiciones de transporte de las muestras al laboratorio, tipo de operaciones previas a los análisis, tipos de análisis a realizar y condiciones de realización de los mismos, y, de forma complementaria, el almacenamiento de las muestras consideradas²⁷.

2. Muestreo.

2.1. Selección de los puntos de muestreo.

Considerando que las muestras seleccionadas y recogidas deberán permitir obtener información de la totalidad de la zona de estudio, se emplearán métodos de muestreo que permitan definir el “*tamaño muestral*”. A fin de que el proceso sea lo más objetivo posible se deberá emplear un método de muestreo aleatorio. Se trata de un muestreo probabilístico basado en la “*teoría de la probabilidad*” (Crépin y Johnson, 1993).

Los métodos de muestreo existentes son diversos. Para la zona de estudio se ha seguido el “*muestreo aleatorio estratificado*” (Petersen y Calvin, 1986), considerado por trabajos previos realizados en la zona de estudio (Cancela, 2004) como el más adaptado a la información de la que se dispone. Se fundamenta en la consideración de muestras seleccionadas a distancias regulares entre si, característica que permite garantizar la cobertura total de la zona. De esta forma se considera como uno de los métodos más precisos (Finney, 1948).

Se estableció una malla de 500x500 metros que cubriera la superficie de estudio, georeferenciada, constituida por 83 nodos de los cuales se seleccionaron 63, a los que se les calcularon las coordenadas UTM. En esta investigación se tomaron 43 muestras que son utilizadas en los ensayos de la Sección III.

Para la correcta ubicación de los puntos de muestreo se requirió del uso de un sistema de navegación (GPS), que en este caso es del modelo “*eTrex EURO de Garmin*”²⁸. Este sistema permite repetir medidas en la misma localización sin alterar la misma y localizando el punto exacto (Conklin, 2001). En aquellos casos en que existiese dificultad en acceder a los puntos, se tomaron las nuevas coordenadas consideradas a efectos de muestreo.

²⁷ Soil and Plant analysis Council Inc. 2000. Soil analysis. Handbook of reference methods. CRC. Press, USA.

²⁸ <http://www.garmin.com>

La recolección en campo de las muestras transcurrió durante dos periodos, del 27 de junio al 24 de julio de 2002 y del 24 de abril al 9 de mayo de 2003.

2.2. Realización del muestreo.

En campo se recogen dos tipos de muestras, una para el cálculo de la densidad aparente (DAP) y otra para los restantes análisis.

Esta última muestra inicialmente se toma inalterada con la finalidad de no perder información sobre la estructura real del suelo. Dichas muestras se toman a una profundidad de 20 cm, basándose en estudios precedentes (Cancela, 2004).

Para tomar muestras con estas características se diseñó una sonda constituida por un cilindro de 4 cm de diámetro, perfilado en la parte de contacto con el suelo y en cuyo interior se alojan alternativamente cuatro anillos de hierro de 0,5 cm de alto con tres de 4,5 cm de alto, siendo la profundidad explorada de 15,5 cm más los 4-5 cm de cubierta vegetal retirados antes del muestreo. Por tratarse de un método laborioso y lento, así como por los resultados obtenidos por Cancela (2004), se procedió a la toma de muestras alteradas utilizando la misma barrena, es decir, muestras completas de todo el horizonte.

Para la obtención de la DAP se emplea inicialmente el “*método del cilindro*”, que requiere de una muestra inalterada de los primeros 10 cm del suelo y con un volumen determinado, utilizando por ello una sonda especial. Dada las características de pedregosidad presentadas, este método se sustituye por el “*método del United States Department of Agriculture (USDA)*” (USDA, 2004), el cual es idóneo para suelos con elevada pedregosidad (Anexo III).

2.3. Condiciones de transporte.

Para la realización de los ensayos sobre muestras tomadas en campo, se transportan en bolsas de material plásticas de diferentes tamaños, dotadas de “*autocierre*”, y para facilitar su posterior identificación en destino, codificadas a tal efecto. Se procurará evitar durante el transporte la exposición de las bolsas a temperaturas extremas que puedan alterar las propiedades físico-químicas del material contenido.

2.4. Operaciones previas.

Las muestras se ponen a secar a fin de extraerles la humedad que de forma natural presentan y permitir realizar correctamente los diferentes ensayos. Dado que las muestras recogidas son alteradas y, por tanto, se modifican un poco sus características debido a que se altera la estructura, se opta por homogenizar la muestra para solventarlo y, a continuación, se tamiza a 2 mm, trabajando con la fracción fina. Este tipo de operación se realiza solamente para el material procedente de la barrena, no para la DAP.

2.5. Tipos de análisis a realizar.

De cada punto muestreado se determina:

- ✓ Densidad aparente (DAP)
- ✓ Textura
- ✓ % de materia orgánica (MO)
- ✓ % de carbono orgánico (CO)
- ✓ pH en agua y cloruro (PH_A, PH_CL)
- ✓ Profundidad de las raíces (Z)
- ✓ Punto de capacidad de campo (FC)
- ✓ Punto de marchitamiento (PWP)
- ✓ Reserva de agua útil (AWC)

Se observa, igualmente, el tipo de suelo y el tipo de cultivo existentes.

Para la determinación de la textura se emplea el análisis granulométrico, utilizando el “*método de la pipeta*” (MAPA, 1995), mientras que el porcentaje de MO y CO se obtiene empleando el “*método de Sauerlandt modificado*” (Gutián y Carballás, 1976) (Anexo III). El pH se determinó mediante medidor digital en agua y cloruro potásico 1M.

La Z se define en campo al tomar las muestras con la barrena. Una vez sacada la misma del suelo, se extraen con sumo cuidado los cilindros de su interior y se observa donde cambia el suelo a arcilla. Se fundamenta en considerar las raíces de los cultivos al llegar a la arcilla no son capaces de atravesarla para obtener agua en caso de necesidad y por lo tanto la absorción de la misma se producirá en los centímetros superiores, en donde las raíces sí pueden explorar en su búsqueda. Conociendo las dimensiones de la barrena y la localización del cilindro en el que se produce el cambio de material, se determina la profundidad explorable por las raíces.

La determinación de las propiedades hídricas se determina según capítulos V, VII y IX.

2.6. Condiciones de realización.

Todo ensayo requiere de un control de las condiciones tanto de ejecución, definidas por un protocolo de actuación, de manejo, controladas mediante la ejecución de los análisis por el mismo operario, y ambientales. Este último punto, no se considera que interfieran en la caracterización de las muestras desde el punto de vista de composición física y/o química, pero se considera determinante para las propiedades hídricas. Este aspecto se analiza en el capítulo X.

2.7. Almacenamiento y conservación de las muestras.

Las muestras tamizadas a 2 mm se disponen en tarrinas de aluminio, dotadas de tapa, que evita que las muestras se alteren en cantidad y/o calidad. Estas serán conservadas

y almacenadas hasta su utilización. Se considera que el almacenaje a bajos contenidos de humedad no altera la realización del análisis en muestras de suelo (Bates, 1993). Tras los ensayos a realizar, dadas las características destructivas de alguno de los métodos empleados, la porción de muestra empleada se desechará a la finalización del mismo, no pudiéndose reutilizar.

3. Descripción de la totalidad de las muestras.

3.1. Características generales para la zona de estudio.

Las características físico-químicas de la totalidad de las muestras consideradas se presentan en la tabla IV.1

Tabla IV.1. "Características físicas y químicas de los suelos analizados"

Muestras n=43	FG	FF	DAP	ARE	LIM	ARC	CO	MO	PH_A	PH_CL
Mínimo	1,56	56,57	0,66	29,47	15,12	13,50	1,93	3,32	4,30	3,80
Máximo	43,43	98,44	1,54	71,39	35,98	54,53	5,50	9,48	6,50	6,10
Media arit.	17,40	82,96	1,06	55,48	22,09	22,43	3,46	5,96	5,41	4,81
Desv. típica	10,25	10,25	0,21	9,47	4,74	7,60	0,93	1,60	0,43	0,49

FG: Fracción gruesa (%), FF: Fracción fina (%), DAP: Densidad aparente (gr/cm^3), ARE: Contenido en arena (%), LIM: Contenido en limo (%), ARC: Contenido en arcilla (%), CO: Contenido en carbono orgánico (%), MO: Contenido en materia orgánica (%), PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en Cl.

Se observa una mayor importancia de la fracción fina (FF) con un 82,96% respecto al total. El porcentaje de arena (ARE) presenta un 55,48% de media frente al limo (LIM) o la arcilla (ARC), con valores parejos de 22,09 y 22,43%, respectivamente. Se trata de suelos ligeramente ácidos, con un PH_A y PH_CL de media 6,50 y 6,10, presentando máximos en ocasiones neutros (6,50 para PH_A). La Z presenta un valor medio de 41,12 cm, con un máximo de 58,50 cm.

Los tipos de suelos son un 30,23% gleysoles, 48,28% cambisoles, representando los fluvisoles el 13,95% y los alisoles, de carácter minoritario, un 6,98%.

Los gleysoles son suelos con hidromorfía (por manto freático) permanente, o casi, (propiedades gleycas) en los primeros 50 cm, siendo horizontes grises, verdosos o azulados y desarrollándose sobre materiales no consolidados de textura no gruesa. El material original lo constituyen un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente sedimentos de origen fluvial, o lacustre. La mineralogía puede ser ácida o básica. Se

encuentran en áreas deprimidas o zonas bajas del paisaje, con mantos freáticos someros. El perfil es de tipo ABgCr o HBgCr, si bien el horizonte Bg puede no existir. Es característica la evidencia de procesos de reducción, con o sin segregación de compuestos de hierro dentro de los primeros 50 cm del suelo. La humedad es la principal limitación de los Gleysoles virgenes; suelen estar cubiertos con una vegetación natural pantanosa. Una vez drenados pueden utilizarse para cultivos, agricultura de subsistencia o huertas.

Los Cambisoles se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial. Aparecen sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación. El perfil es de tipo ABC. El horizonte B se caracteriza por una débil a moderada alteración del material original, por la ausencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica y compuestos de hierro y aluminio, de origen iluvial. Permiten un amplio rango de posibles usos agrícolas. Sus principales limitaciones están asociadas a la topografía, bajo espesor, pedregosidad o bajo contenido en bases.

Los fluvisoles se presentan a partir de materiales fluviales recientes, cerca de los ríos y con materia orgánica que decrece irregularmente o bien es abundante en zonas muy profundas²⁹. El material original lo constituyen depósitos, predominantemente recientes, de origen fluvial o lacustre. Se encuentran en áreas periódicamente inundadas, a menos que estén protegidas por diques, de llanuras aluviales, abanicos fluviales y valles pantanosos. Aparecen sobre una amplia distribución y cualquier zona climática. El perfil es de tipo AC con evidentes muestras de estratificación que dificultan la diferenciación de los horizontes, aunque es frecuente la presencia de un horizonte Ah muy conspicuo. Los rasgos redoximórficos son frecuentes, sobre todo en la parte baja del perfil. Los Fluvisoles suelen utilizarse para cultivos de consumo y huertas. Es habitual que requieran un control de las inundaciones, drenajes artificiales y que se utilicen bajo regadío.

Los Alisoles se forman sobre una amplia variedad de materiales con arcillas de elevada actividad como vermiculita o esmectitas. Principalmente lo hacen sobre rocas ácidas. La mayoría aparecen sobre viejas superficies con una topografía colinada a ondulada. El perfil es de tipo ABtC. El horizonte A puede desaparecer por truncamiento en las zonas muy erosionadas. El contenido en nutrientes para las plantas es bajo, solo el Mg puede ser abundante en algunos casos; además su elevado contenido en aluminio agrava el problema por su toxicidad. El encalado y una elevada fertilización pueden hacerlos utilizables para el cultivo, mientras que lo habitual es que se cultiven plantas con bajas necesidades nutritivas y con fuerte resistencia al aluminio³⁰.

Los tipos de cultivos que se presentan son tres, pradera natural, artificial y maíz.

La importancia de las características físico-químicas de las muestras y del tipo de cultivo se analiza en el capítulo XI.

²⁹ <http://edafologia.ugr.es/carto/tema02/amplia1.htm>

³⁰ <http://www.unex.es/edafo/FAO/>

3.2. Características en función del sector considerado.

En la tabla IV.2 se muestran las características en función del sector de riego considerado, sectores I, II y III.

Tabla IV.2. “Características físicas y químicas de los suelos en función del sector considerado”

Sector	Estadísticos	FG	FF	DAP	ARE	LIM	ARC	CO	MO	PH_A	PH_CL
I (n=2)	Mínimo	3,04	78,67	0,89	43,00	19,99	25,74	3,37	5,81	4,30	3,80
	Máximo	21,33	96,96	1,00	46,94	27,33	37,00	3,77	6,50	5,30	4,50
	Media arit.	12,19	87,82	0,95	44,97	23,66	31,37	3,57	6,15	4,80	4,15
	Desv. típica	9,15	9,14	0,05	1,97	3,67	5,63	0,20	0,35	0,50	0,35
II (n=21)	Mínimo	1,56	56,57	0,68	29,47	15,34	14,20	1,93	3,32	4,60	3,90
	Máximo	43,43	98,44	1,54	70,28	35,98	54,53	4,47	7,70	5,90	5,30
	Media arit.	15,60	84,40	1,11	55,03	20,56	24,41	2,94	5,06	5,30	4,63
	Desv. típica	10,65	10,65	0,22	11,43	5,13	9,24	0,72	1,24	0,32	0,31
III (n=20)	Mínimo	4,48	65,00	0,66	41,42	15,12	13,50	2,32	3,99	4,90	4,20
	Máximo	35,00	95,52	1,29	71,39	32,79	27,37	5,50	9,48	6,50	6,10
	Media arit.	19,03	80,97	1,02	57,00	23,54	19,46	4,00	6,89	5,59	5,07
	Desv. típica	9,48	9,48	0,19	6,45	3,81	3,23	0,85	1,46	0,43	0,51

FG: Fracción gruesa (%), FF: Fracción fina (%), DAP: Densidad aparente (gr/cm^3), ARE: Contenido en arena (%), LIM: Contenido en limo (%), ARC: Contenido en arcilla (%), CO: Contenido en carbono orgánico (%), MO: Contenido en materia orgánica (%), PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en Cl.

La Z media en el sector I se cifra en 28,50 cm, en el II en 40,86 cm y en el III, 42,65 cm, siendo el máximo de 32, 56 y 58,50 cm respectivamente. En el sector I, el tipo de suelo se corresponde exclusivamente con cambisoles, presentándose dos tipos de usos, pradera natural y maíz. El sector II los gleysoles representan un 47,62% y los cambisoles un 33,33%, apareciendo la totalidad de suelos posibles de la zona de estudio. Por el contrario en el sector III, no existen alisoles, y el tipo más frecuente son los cambisoles en un 60% (Fig. IV.1)

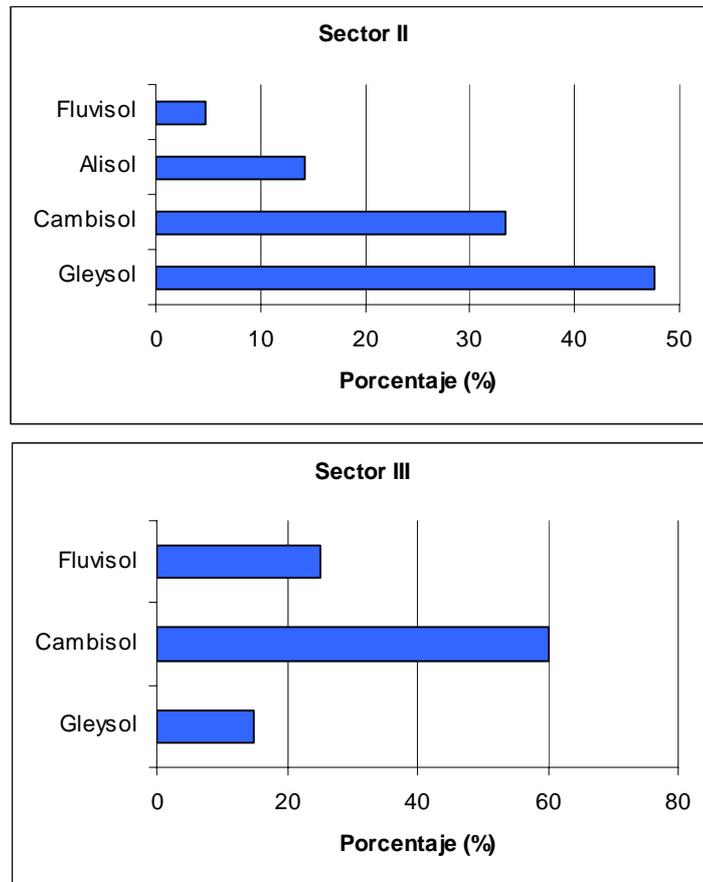
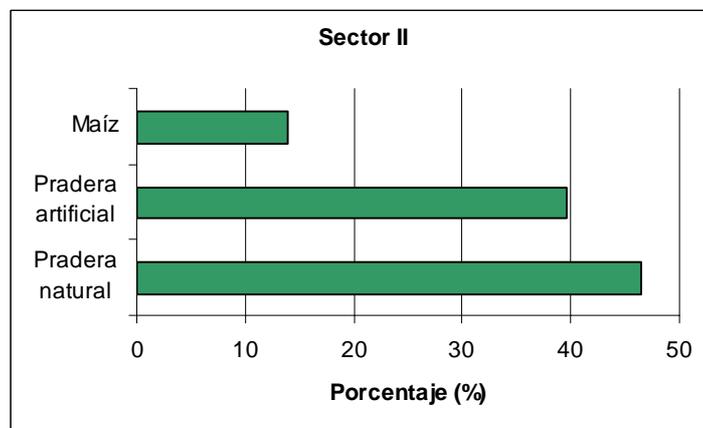


Figura IV.1. "Distribución del tipo de suelo en función del sector"

Respecto al tipo de cultivo, tanto en el sector II como el III, presentan exactamente la misma distribución de cultivos, siendo la pradera natural la más frecuente, con un 46,51%, que en caso de ser artificial, aparece en un 39,53% de los casos (Fig. IV.2).



(Continúa)

(Continúa)

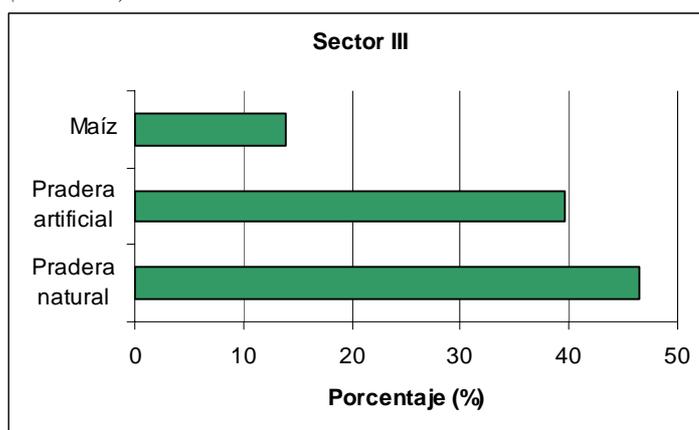


Figura IV.2. “Distribución del tipo de cultivo en función del sector”

3.3. Características en función del tipo de suelo considerado.

La tabla IV.3 muestra las características físico-químicas en función de la diferente tipología de suelos, sean estos cambisoles, gleysoles, alisoles o fluvisoles.

La Z media se cifra para los cambisoles en 38,81 cm, los gleysoles 43,04 cm, 43,86 cm para los alisoles y 42,17 cm los fluvisoles. Tanto en los cambisoles como en los gleysoles aparecen los tres tipos de cultivos existentes, destacando la pradera natural en un 52,38% de los casos en los cambisoles y la pradera artificial en un 61,54% en los gleysoles. En suelos de tipo alisoles no se presenta el maíz, y en fluvisoles la pradera artificial. Destaca la pradera artificial en un 66,67% de los casos en los alisoles y la pradera natural en un 83,33 % en fluvisoles (Fig. IV.3).

Tabla IV.3. “Características físicas y químicas en función de la tipología de suelo”

Tipo de suelo	Estadísticos	FG	FF	DAP	ARE	LIM	ARC	CO	MO	PH_A	PH_CL
Cambisol	Mínimo	3,04	67,56	0,66	43,00	15,34	15,06	1,95	3,36	4,30	3,80
	Máximo	32,44	96,96	1,39	64,87	31,46	37,00	5,50	9,48	5,90	5,50
	Media arit.	15,98	84,02	1,02	55,38	22,39	22,23	3,56	6,14	5,42	4,84
	Desv. típica	8,83	8,83	0,19	5,60	3,71	5,23	1,00	1,73	0,40	0,43

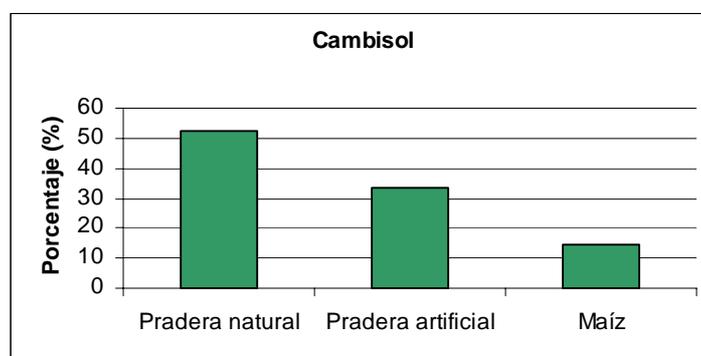
(Continúa)

FG: Fracción gruesa (%), FF: Fracción fina (%), DAP: Densidad aparente (gr/cm^3), ARE: Contenido en arena (%), LIM: Contenido en limo (%), ARC: Contenido en arcilla (%), CO: Contenido en carbono orgánico (%), MO: Contenido en materia orgánica (%), PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en Cl.

Tabla IV.3. (Continúa)

Tipo de suelo	Estadísticos	FG	FF	DAP	ARE	LIM	ARC	CO	MO	PH_A	PH_CL
Gleysol	<i>Mínimo</i>	1,56	58,94	0,68	29,47	16,00	14,26	1,93	3,32	4,60	3,90
	<i>Máximo</i>	41,06	98,44	1,54	69,48	32,79	54,53	4,88	8,42	6,00	5,70
	<i>Media arit.</i>	16,40	83,60	1,09	53,21	21,71	25,07	3,38	5,82	5,23	4,57
	<i>Desv. típica</i>	12,21	12,21	0,23	12,30	5,04	10,73	0,82	1,42	0,34	0,41
Alisol	<i>Mínimo</i>	13,67	56,57	1,17	56,03	15,52	14,20	1,97	3,39	5,10	4,50
	<i>Máximo</i>	43,43	86,33	1,31	70,28	20,32	23,66	3,94	6,79	5,70	5,00
	<i>Media arit.</i>	26,74	73,26	1,23	64,55	17,61	17,84	3,20	5,52	5,33	4,73
	<i>Desv. típica</i>	12,42	12,42	0,06	6,15	2,01	4,16	0,88	1,52	0,26	0,21
Fluvisol	<i>Mínimo</i>	11,41	73,19	0,79	34,56	15,12	13,50	2,32	3,99	5,20	4,60
	<i>Máximo</i>	26,81	88,59	1,26	71,39	35,98	29,46	4,48	7,72	6,50	6,10
	<i>Media arit.</i>	17,28	82,72	1,04	56,19	24,11	19,70	3,40	5,87	5,78	5,27
	<i>Desv. típica</i>	5,23	5,23	0,18	11,54	6,41	5,20	0,82	1,42	0,52	0,60

FG: Fracción gruesa (%), FF: Fracción fina (%), DAP: Densidad aparente (gr/cm³), ARE: Contenido en arena (%), LIM: Contenido en limo (%), ARC: Contenido en arcilla (%), CO: Contenido en carbono orgánico (%), MO: Contenido en materia orgánica (%), PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en Cl.



(Continúa)

(Continúa)

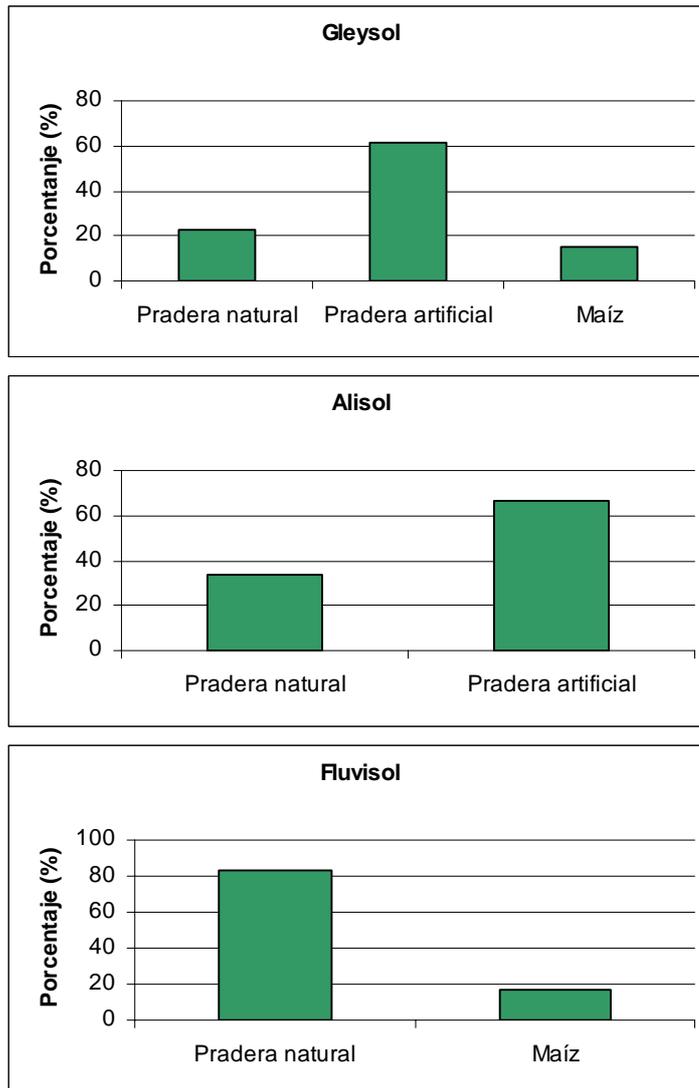


Figura IV.3. “Distribución del tipo de cultivo en función del tipo de suelo”

4. Muestras consideradas en los diferentes ensayos.

Para la realización de los diferentes ensayos contenidos en esta investigación, debido a la dificultad y/o laboriosidad de alguno de ellos, se eligieron distintos tamaños muestrales dentro de la totalidad de muestras consideradas. Es importante destacar que, en algún caso, debido a la tipología destructiva de alguno de los ensayos, la cantidad de muestra disponible se puede ver mermada y por tanto resultar más idóneo la elección de muestras de las que se disponga de mayor cantidad. No obstante, se considera que de esta forma, dado que en el conjunto de ensayos se ha incluido la totalidad de las muestras consideradas, los resultados resultan extensibles al tamaño muestral, y, por extensión, a la zona de estudio. El tamaño muestral considerado en cada ensayo y las características físico-químicas de las muestras incluidas se detallan en el correspondiente capítulo, dentro de la sección III.

5. Referencias bibliográficas.

- Bates, T.E.** 1993. Soil handling and preparation. En: Soil sampling and methods of analysis. Ed. M.R. Carter. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. pp: 19-24.
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Conklin, A.R.** 2001. New in measuring soil water. *Soil Sediment & Water. The Magazine of Environmental Assessment & Remediation*. December 2001.
- Crépin, J.; Johnson, R.L.** 1993. Soil sampling for environmental assessment. En: Soil sampling and methods of analysis. Ed. M.R. Carter. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. pp: 5-18.
- Finney, D.J.** 1948. Random and systematic sampling in timber surveys. *Forestry*. **22**: 64-99.
- Guitián, F.; Carballás, T.** 1976. Técnicas de análisis de suelos. Pico Sacro. Santiago de Compostela.
- MAPA.** 1995. Métodos oficiales de análisis de suelos y agua de riego. MAPA. Madrid, España.
- Petersen, R.G.; Calvin, L.D.** 1986. Sampling. En: Klute, A. (ed). Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Monograph Number 9 (Second Edition).(Klute, A. ed.). ASA, Madison, WI. pp: 33-51.
- Soil and Plant analysis Council, Inc.** 2000. Soil analysis. Handbook of reference methods. CRC. Press, USA.
- USDA.** 2004. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>.

Referencias páginas web.

- <http://www.garmin.com> eTrex Personal Navigator. Owner's Manual. Garmin Corporation. 2000.
- <http://edafologia.ugr.es/cartotema02/amplia1.htm> Grupos principales de suelos. Clave FAO y características distintivas. Fecha consulta: 05/01/2008.
- <http://www.unex.es/edafo/FAO/> Index of edafo FAO. Fecha consulta: 05/01/2008.

V

MÉTODOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS

CAPÍTULO

CAPÍTULO V

MÉTODOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS

“En principio la investigación necesita más cabezas que medios”

Severo Ochoa (1905-1993). Bioquímico español y Premio Nobel de Fisiología y Medicina (1959).

ÍNDICE

Resumen	105
1. Introducción.....	107
2. Método de referencia: Placa de presión.....	107
2.1. Elementos constituyentes	108
2.2. Principio de funcionamiento	109
2.3. Protocolo de medición.....	109
3. Método de medición: Medidor de actividad de agua	111
3.1. Características principales	111
3.2. Especificaciones	112
3.3. Elementos constituyentes	112
3.4. Principio de funcionamiento	113
3.5. Protocolo de medición.....	113
4. Referencias bibliográficas	114

RESUMEN

La elección de una metodología apropiada para la realización de un trabajo de investigación, se presenta como una tarea ardua y en ocasiones no clara, ni definitiva. La posibilidad de que el trabajo se vea comprometido o que los resultados no sean lo fiables y satisfactorios que en principio el método de medición aporta, conlleva, no en pocas ocasiones, el empleo conjunto de dos dispositivos de medición, un método de medición y uno de comparación o referencia. En esta investigación, en función de los objetivos planteados, el método de medición es un de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM) y como método de comparación, la placa de presión (*pressure plate*) (PP), por tratarse de un método altamente estudiado y que si bien en los últimos tiempos se ha visto cuestionada su idoneidad en algunos estudios, mayoritariamente su fiabilidad y precisión parecen demostradas y garantizadas. No obstante, su utilización permite a lo largo de esta investigación corroborar tal aspecto. A lo largo del capítulo se describen ambas metodologías.

1. Introducción.

La metodología para la determinación de las propiedades hídricas en muestras de suelo es muy variada (Capítulo III), lo cual en ocasiones dificulta la elección de la metodología a considerar cuando se comienza un estudio. En función de los objetivos planteados en esta investigación, el método de medición empleado es de tipo indirecto y dentro de este, se considera un psicrómetro de termopar (*thermocouple psychrometer*) (TCP), concretamente un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM). Partiendo de la hipótesis inicial de estar evaluando esta tipología de dispositivo se demanda el empleo de otro dispositivo que se emplee de método de comparación o referencia y a la vez complementario al WAM en la aportación de información. Se considera para ello la placa de presión (*pressure plate*) (PP).

Ambas metodologías presentan unas características que avalan su elección, permitiendo evaluar su idoneidad en la aplicación a las muestras consideradas en la zona de estudio.

2. Método de referencia: Placa de presión.

La PP fue creada por Richards y Fireman (1943). La denominación que recibe es heterogénea, "*pressure plate method*" (Tan, 1996), "*pressure plate technique*" (Zhang *et al.*, 2007), "*Richard's pressure plate*" (Abrisqueta *et al.*, 2006), "*ceramic pressure plate*" (Fernández-Gálvez y Barahona, 2005), "*pressure plate apparatus*" (Carminati *et al.*, 2007) "*Richard's method pressurized apparatus*" (Chahal y Yong, 1965) o "*pressure plate extrator*" (Pucket *et al.*, 1985). No obstante, a pesar de la evidente falta de un término único definitorio del método, las denominaciones son semejantes, basadas en el propio principio de funcionamiento del aparato, la "*presión*" empleando "*placas*", "*platos*" o "*membranas*". No obstante, este dispositivo de medida ha sufrido desde su creación mejoras importantes (Richards, 1949b).

Actualmente, existe una controversia sobre este tipo de dispositivo, siendo considerado por algunos autores como el instrumento más preciso de los que se dispone para mediciones de potenciales mátricos de suelos en laboratorio (Artigao y Guardado, 1993), y tradicionalmente con este fin se ha utilizado, si bien otros autores como Gee *et al.*, (2002) ponen de relieve la dificultad de alcanzar el adecuado equilibrio debido a que este se cifra, desde días hasta semanas, siendo más acuciante este efecto en muestras de textura fina. El coste elevado del equipamiento, el elevado tiempo demandado para la realización de las mediciones y no resultar representativo de las condiciones de campo, son parte de la problemática presentada (Otto y Alcaide, 2001). Sobre este particular, Gerakis y Zalidis (1998) consideran que el método no tiene en cuenta determinadas variables que pueden originar discrepancias entre el campo y las medidas en laboratorio, como son la no-heterogeneidad del perfil, la evaporación del suelo, la distribución de las raíces y las distintas especies vegetales. Sin embargo, produce potenciales bajos permitiendo operar tanto con muestras alteradas como inalteradas (Porta *et al.*, 2003).

Teniendo estas consideraciones presentes, se determina emplear la PP como método de referencia y/o complementario del WAM por no existir homogeneidad en los

investigaciones realizadas con la PP respecto a su fiabilidad, avalada esta por diversos estudios (MacLean y Yager, 1972; Klute, 1986; Andraski, 1996; Mariani *et al.*, 2007) o la repetibilidad del dispositivo, como Wraith y Or (2001), Fernández-Gálvez y Barahona (2005) o Zhang *et al.* (2007).

2.1. Elementos constituyentes.

Este método requiere de:

- ✓ Un envase que soporte las presiones requeridas y que recibe comúnmente los nombres de “olla” o “pota”. Serán dos, una para presiones bajas y otra para presiones altas (Fig. V.1).
- ✓ Placas de cerámica porosas de 1 y 15 bar.
- ✓ Una fuente de presión de aire, tal como un compresor o un tanque de aire o nitrógeno comprimido³¹.
- ✓ Reguladores de presión para reducir al mínimo la demanda de gas de la fuente a presión.
- ✓ Bascula para pesar las muestras.
- ✓ Cilindros para contener las muestras.
- ✓ El contacto hidráulico entre el suelo y la placa de cerámica se alcanza por una capa de mezcla de agua saturada con material de partículas finas tal como el caolín.
- ✓ Cámara de temperatura controlada o estufa.
- ✓ Horno para secar las muestras.

Las placas empleadas están constituidas por un plato cerámico poroso, cubierto por una cara con un fino diafragma de neopreno, precintado hacia la cima de la placa. Una pantalla interna existente entre el plato y el diafragma aporta un paso para el flujo de agua generado. La boquilla de salida que atraviesa la placa, conecta este paso con el accesorio del desagüe, conectando con el exterior de extractor (Rodríguez, 2004).

El modelo de PP empleada es fabricado por *Soilmoisture Equipment Corp.*



Figura V.1. “Olla extractora”³²

³¹ Se consideran ambas posibilidades igual de adecuadas, no obstante algunos autores se decantan por aire comprimido dado que es de más fácil control (Richards, 1948).

³² www.soilmoisture.com

2.2. Principio de funcionamiento.

En este método se dispone una muestra de suelo previamente saturada sobre una membrana permeable al agua y solutos, e impermeable al aire, encerrada en un recipiente y sujeta a una diferencia de presión a través de la placa. Esta diferencia de presión se produce ya sea por succión debajo de la membrana o por una presión de gas aplicado desde arriba, generalmente desde un cilindro de aire comprimido. Sobre la membrana se aplica la presión deseada y bajo la membrana existe presión atmosférica porque hay conexión con el exterior. Como consecuencia de esta diferencia de presión, parte de los poros del suelo ceden agua, es decir, se “vacían”.

Cuando cesa la salida del flujo de agua, indicando que se ha logrado el equilibrio entre el potencial mátrico y la presión impuesta, se retira la muestra y se determina gravimetricamente el contenido de agua medido en porcentaje de humedad (Dahiya, *et al.*, 2007) (Ec. V.1.):

$$\% Hu = \frac{P_H - P_S}{P_H - T} \cdot 100 \quad (V.1)$$

siendo:

$\% Hu$: humedad (%).

P_H : peso húmedo tras salir de la olla.

P_S : peso seco tras pasar 24 h en la estufa.

T : tara del recipiente.

La placa se utiliza para potenciales comprendidos entre -50 a -1500 kPa (Topp *et al.*, 1993), si bien algunos autores amplían dicho rango de medida de -10 a -2000 kPa (Porta *et al.*, 2003).

2.3. Protocolo de medición.

Inicialmente las muestras colocadas en la placa de cerámica se saturan con agua durante 24 horas. Las muestras se dispondrán en unos cilindros que las contengan, de material plástico consistente³³ de dimensiones aproximadas 5 cm de diámetro y 1-2 cm de altura (Plá, 1983). El tamaño de la muestra estará relacionado con el tiempo invertido en alcanzar el equilibrio, a mayor tamaño, mayor tiempo demandado. Asimismo, la humectación será realizada en las propias placas siguiendo la metodología de Klute (1986). Para evitar que las muestras se saturen inadecuadamente se mantendrán permanentemente con agua evitando, mediante dispositivos varios, que el reborde de la placa no la contenga en superficie (Fig. V.2), llegándose a sumergir la placa y la muestra hasta su superficie en agua si fuese necesario.

³³ En ocasiones se trata de anillos metálicos con una base de malla fina (Conant *et al.*, 2004).



Figura V.2. “Placa porosa con muestras durante el periodo de saturación o humectación”

No existe una indicación homogénea respecto al número de muestras a incluir en cada placa porosa simultáneamente, llegando a cifrarse en 20 muestras/placa (Artigao y Guardado, 1993). En otros estudios el número se reduce a 12 muestras por placa, tal es el caso de Cancela (2004) y Rodríguez (2004), aplicados sobre la misma zona de estudio. Siguiendo los estudios precedentes, en esta investigación se ha considerado el mismo número de muestras simultáneamente, como máximo. Considerando que en la olla empleada para la determinación de la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) caben dos placas, se determinarán 24 muestras simultáneamente, mientras que en el caso del punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP), en la olla solamente se puede disponer de una placa, de modo que solamente se determinarán 12 muestras en cada ocasión.

En toda circunstancia, deberá garantizarse un buen contacto entre la muestra y la placa cerámica (Topp *et al.*, 1993; Fernández-Gálvez y Barahona, 2005).

Así mismo, la elección de la tipología de muestras a considerar, alteradas o no, tampoco se presenta como una característica definitoria del dispositivo (Wraith y Or, 2001). El empleo de muestras alteradas minimiza la dificultad de obtener el óptimo contacto entre la placa y la muestra, además de eliminar las variaciones en las mediciones derivadas de la diferencia estructural dentro de las mismas muestras, pudiéndose extrapolar los resultados a muestras de texturas similares (Lal, 1979). Richards y Fireman (1943) discrepan sobre este particular a partir de ensayos realizados sobre muestras secas y húmedas sometidas a alteración de su estructura mediante efecto manual y/o tamizado, encontrando diferencias sobre ese particular. En esta investigación se consideran muestras alteradas, basándose en estudios precedentes (Cancela, 2004; Rodríguez, 2004).

Una vez ha transcurrido el tiempo necesario se introducen en la olla aplicándoles la presión gradualmente al nivel deseado hasta alcanzarse el equilibrio, según el “*procedimiento de equilibrado secuencial de la humedad y la tensión*” propuesto por Klute (1986).³⁴

³⁴ Conant *et al.* (2004) hacen referencia a un equilibrado de 24 horas para cada incremento de presión.

Considerando que las placas de presión están diseñadas para una presión aplicada máxima determinada, a determinados potenciales como el requerido para PWP, la placa se encuentra en el límite, de modo que deberá ajustarse con precaución para que no se provoque el efecto del burbujeo, alterando la medición (Chahal y Yong, 1965; Doering, 1965). La formación de burbujas en la superficie de la placa impediría un nuevo aumento de presión, no pudiéndose aplicar la verdadera presión solicitada (Richards, 1948).

El tiempo de permanencia en la placa dependerá de la propiedad hidráulica a estimar. Para la FC, correspondiente a 0,033 MPa, se considerarán 24 horas, mientras que para la determinación del PWP se elevará progresivamente la presión hasta alcanzar la presión de 1,5 MPa durante 24 horas, momento a partir del cual se dejará pasar un periodo de 48 horas, tiempo considerado suficiente por numerosos estudios (Plá, 1983; Black *et al.*, 1965). En el capítulo X se trata la idoneidad de la elección de estas características.

Alcanzado el tiempo de equilibrio adecuado a cada situación, las muestras se dispondrán en recipientes previamente tarados y, mediante secado en estufa a 105° C durante 24 horas y/o hasta peso constante, se determina gravimetricamente el contenido de agua correspondiente a la presión aplicada.

3. Método de medición: Medidor de actividad de agua.

El método empleado para la determinación del potencial de agua ha sido un WAM, considerándose dos tipologías de dispositivos: con y sin control de la temperatura, en función de las características demandadas por los diferentes ensayos. Globalmente las características que se exponen a continuación son comunes a ambos dispositivos. En el capítulo VIII se realiza un review de los TCPs en general y de los WAM, en particular.

Los WAM empleados son los modelos WP4 y WP4-T de Decagon Device, Inc.

3.1. Características principales.

Se trata de un TCP teóricamente versátil, pudiéndose emplear en muestras diversas, tales como suelo, hojas, semillas y soluciones acuosas. De funcionamiento sencillo y fácil calibración aporta medidas en breve espacio de tiempo. Complementariamente, el WP4-T permite comparaciones de potencial de agua entre muestras independientemente de la temperatura (Fig. V.3).



Figura V.3. “WAM empleado en las determinaciones psicrométricas”

3.2. Especificaciones.

- Tipo de sensor: Sensor del punto de rocío.
- Intervalo de funcionamiento: 0-60MPa.
- Resolución: $\pm 0,01$ MPa.
- Exactitud:
 - 0 a -10 MPa: $\pm 0,1$ MPa.
 - -10 a -40 MPa: $\pm 1\%$.
- Capacidad de las cápsulas: 15 ml (tamaño de muestra recomendado 7 ml).
- Material de las cápsulas: plástico a metálico.
- Condiciones ambientales de funcionamiento:
 - Rango de temperaturas: 5-43° C.
 - Humedad relativa: 20-85%.

3.3. Elementos constituyentes.

- Vista frontal:
 - ✓ LED indicador luminoso.
 - ✓ Teclas de funciones.
 - ✓ LCD.
 - ✓ Interruptor inicio de medición.
- Vista posterior:
 - ✓ Ventilador posterior.
 - ✓ Tornillo de apertura de la tapa.
 - ✓ Interruptor ON/OFF.
 - ✓ Conexión cable de alimentación.
 - ✓ Conexión cable al ordenador.
- Interior:
 - ✓ Espejo.
 - ✓ Sensor óptico.
 - ✓ Ventilador del compartimento.
 - ✓ *Thermopile*³⁵.

La localización de los distintos elementos se recoge en el anexo IV.

³⁵ “*Thermopile*” es un conjunto de termopares unido en serie, aportando el promedio de las lecturas de temperatura registradas. (<http://www.britannica.com/eb/topic-591691/thermopile>)

3.4. Principio de funcionamiento.

Para realizar las determinaciones de potencial el WAM se basa en el la “*chilled mirror dewpoint technique*”, siendo la muestra equilibrada con el espacio de cabeza que contiene el compartimento sellado en donde se introduce la muestra para la realización de las mediciones. El compartimento posee en su interior un espejo y un medio de detección de la condensación que se produce en el mismo. Cuando el equilibrio se alcanza, el potencial de agua del aire del compartimento es igual al potencial de agua de la muestra. En el WP4, la temperatura del espejo es controlada con precisión mediante el enfriamiento Peltier (*thermoelectric Peltier cooler*). Mediante una célula fotoeléctrica se detecta el instante en que la condensación en el espejo se empieza a producir. En ese instante un haz de luz se dirige al espejo y se refleja en la célula fotoeléctrica. El fotodetector percibe el cambio en la reflectancia cuando se produce la condensación en el espejo.

El dispositivo posee un ventilador en el interior del compartimento cuya función es hacer circular el aire con la muestra a fin de reducir el tiempo de equilibrio. Cuando la temperatura del punto de condensación (*dewpoint*) y la superficie de la muestra son medidas simultáneamente, ya no es necesario el completo equilibrio termal, lo cual reduce de la medición a menos de 5 minutos (teóricos). Una vez ocurre esto, el LCD muestra la temperatura y el potencial final de la muestra.

En caso de tratarse del WP4-T, se dispone de la opción de controlar la temperatura de la muestra, de modo que un módulo interno de control termoelectrico monitoriza y estabiliza el bloque de la muestra en función de la temperatura programada anteriormente por el operario. Esta posibilidad puede incluso acelerar las mediciones (Decagon Devices, 2003c).

3.5. Protocolo de medición.

El protocolo de medición aportado por el fabricante y distribuidor resulta confuso y poco detallado, no facilitándose con el manual de usuario del dispositivo. Al comienzo de esta investigación, no existía constancia de un protocolo de medición diferente de este, motivo por el cual se debieron realizar ensayos previos mostrados en el capítulo VII. No obstante, a fecha de entrega de esta memoria ya se encuentra disponible en la página oficial del distribuidor del dispositivo un protocolo de medición más conciso que el inicial³⁶, difiriendo del aportado en esta investigación e incluyendo algunas observaciones a destacar (en función de los resultados que se aportan en esta investigación):

- ❖ Si la temperatura del ambiente del laboratorio fluctúa $\pm 5^{\circ}$ C, las lecturas de potencial pueden variar $\pm 0,5$ MPa.
- ❖ Tiempo de lectura inferior a 5 minutos de 0 a -300 MPa.
- ❖ Comparaciones de potencial de agua entre muestras independientemente de la temperatura.
- ❖ Equipo apto para mediciones en campo.

³⁶ www.lab-ferrer.com

- ❖ Las muestras para medir se deben sellar con las tapas de las cápsulas.

Estas afirmaciones se analizan en los capítulos IX y X.

4. Referencias bibliográficas.

- Abrisqueta, J.M.; Plana, V.; Franco, J.A.; Ruiz-Sánchez, M.C.** 2006. Effect of tillage and water pressure head on the hydraulic properties of loamy soil surface. *Spanish Journal of Agricultural Research*. **4** (2): 180-186.
- Andraski, B.J.** 1996. Properties and variability of soil and trench fill at an Arid Waste-Burial site. *Soil Science Society of America Journal*. **60**: 54-66.
- Artigao, A.; Guardado, R.** 1993. El agua en el suelo. En: *Agronomía del riego*. Ed. Mundi-Prensa.
- Black, C.A.; Evans, D.D.; White, J.L.; Ensminger, L.E.; Clark, F.E.** 1965. Methods of soil analysis-Part 1: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Monograph N°9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Carminati, A.; Kaestner, A.; Hassanein, R.; Ippisch, O.; Vontobel, P.; Flüher, H.** 2007. Infiltration through series of soil aggregates: neutron radiography and modelling. *Advances in Water Resources*. **30**: 1168-1178.
- Conant, R.T.; Dalla-Betta, P.; Klopatek, C.C.; Klopatek, J.M.** 2004. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biology & Biochemistry*. **36**: 945-951.
- Chahal, R.S.; Yong, R.N.** 1965. Validity of the soil water characteristic determined with the pressurized apparatus. *Soil Science*. **99** (2): 98-103.
- Dahiya, R.; Ingwersen, J.; Streck, T.** 2007. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: experimental findings and modelling. *Soil & Tillage Research*. **96**: 52-63.
- Decagon Devices.** 2003c. Dewpoint Potential Meter Operator's Manual Version 2.2.
- Doering, E.J.** 1965. Soil-water diffusivity by the one-step method. *Soil Science*. **99** (5): 322-326.
- Fernández-Gálvez, J.; Barahona, E.** 2005. Changes in soil water retention due to soil kneading. *Agricultural Water Management*. **76**: 53-61.

- Gee, G.W.; Ward, A.L.; Zhang, Z.F.; Campbell, G.S.; Mathison, J.** 2002. The influence of hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. *Vadose Zone Journal*. **1**: 172-178.
- Gerakis, A.; Zalidis, G.** 1998. Estimating field-measured, plant extractable water from soil properties: beyond statistical models. *Irrigation and Drainage Systems*. **12**: 311-322.
- Klute, A.** 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Monograph Number 9 (Second Edition). (Klute, A. ed.). ASA, Madison, WI. pp: 635-686.
- Lal, R.** 1979. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma*. **21**: 209-223.
- MacLean, H.A.; Yager, T.U.** 1972. Available water capacities of Zambian soils in relation to pressure plate measurements and particle size analysis. *Soil Science*. **113** (1): 23-29.
- Mariani, L.; Jimenez, J.J.; Asakawa, N.; Thomas, R.J.; Decaëns, T.** 2007. What happens to earthworm cast in the soil?. A field study of carbon and nitrogen dynamics in Neotropical savannahs. *Soil Biology & Biochemistry*. **39**: 757-767.
- Otto, S.R.L.; Alcaide, M.** 2001. Utilização do método TDR-tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. **5** (2): 265-269.
- Plá, I.** 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Alcance*. Revista de la Facultad de Agronomía. UCV Maracay-Venezuela. **32**: 66-73.
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C.** 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España.
- Puckett, W.; Dane, J.H.; Hajek, B.F.** 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. **49**: 831-836.
- Richards, L.A.** 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*. **66**: 105-110.
- Richards, L.A.** 1949b. Methods of mounting porous plates used in soil moisture measurements. *Agronomy Journal*. **41**: 489-490.
- Richards, L.A., Fireman, M.** 1943. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science*. **56**: 395-404.

Rodríguez, A. 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Departamento de Ingeniería Agroforestal (EPS). Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.

Tan, K.H. 1996. Soil sampling, preparation and analysis. Marcel Dekker, Inc, USA. pp: 56- 72.

Topp, G.C.; Galvanov, Y.T.; Ball, B.C.; Carter, M.R. 1993. Soil water desorption curves. En: Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Carter, M.R. Lewis Publishers.

Wraith, J.M.; Or, D. 2001. Soil water characteristic determination from concurrent water content measurements in reference porous media. *Soil Science Society of America Journal*. **65**: 1659-1666.

Zhang, S.; Lövdahl, L.; Grip, H.; Tong, Y. 2007. Soil hydraulic properties of two loess soils in China measured by various field-scale and laboratory methods. *Catena*. **69**: 264-273.

Referencias páginas web.

www.soilmoisture.com Soilmoisture Equipment Corp. Fecha de consulta: 30/12/2003.

<http://www.britannica.com/eb/topic-591691/thermopile> Encyclopedia Britannica *online*. Fecha de consulta: 15/10/2007.

www.lab-ferrer.com Lab-Ferrer. Fecha de consulta: 05/05/2007.

VI

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN EMPLEADOS

CAPÍTULO

CAPÍTULO VI

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN EMPLEADOS

“Los científicos con imaginación creadora o creativos se caracterizan por su capacidad para encontrar ideas que conducen a soluciones originales e innovadoras y, al mismo tiempo, realistas y útiles”
Eduardo Primo Yúfera (1918-2007). Químico español.

ÍNDICE

Resumen	123
1. Introducción.....	125
2. Funciones de pedotransferencia.....	125
2.1. Fundamentos	125
2.2. Denominaciones	125
2.3. Variables implicadas	126
2.4. Tipos de enfoques.....	126
2.5. Clasificación de las PTFs	126
2.6. Propiedades y características físicas del suelo	128
2.7. Procedimiento de aplicación	129
2.8. Procedimiento de desarrollo de nuevas PTFs.....	130
2.9. Técnicas de desarrollo de nuevas PTFs.....	131
2.10.Ámbito de aplicación.....	131
2.11.Aparataje utilizado.....	131
2.12.Aplicaciones de las PTF	131
3. Aplicaciones informáticas	134
3.1. Fundamentos	134
3.2. Requerimientos.....	134
3.3. Estimaciones realizadas.....	134
3.4. Propiedades predictivas y estimadas	134
3.5. Software disponible.....	135
4. Referencias bibliográficas	135

RESUMEN

La preocupación acuciante existente en los últimos tiempos respecto a la determinación de propiedades para su inclusión en modelos que permitan la modelización del agua en la zona no saturada, ha provocado que se empleen métodos alternativos de carácter estimativo/predictivo, que faciliten el proceso en aquellas situaciones en que la aplicación de métodos indirectos y/o directos se ve comprometida. La aplicación de funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs) y aplicaciones informáticas, a tal efecto es avalada por numerosos estudios. En este capítulo se describen ambos métodos.

1. Introducción.

La determinación de las propiedades hídricas, no siempre se realiza empleando métodos de campo o laboratorio, mencionados en el capítulo III como métodos directos e indirectos. La causa de tal situación se debe a que las diferentes metodologías se caracterizan por unos requerimientos, en ocasiones, considerados como desventajas o inconvenientes, tal es el caso del alto coste, excesivo tiempo demandado, dificultad de manejo, condiciones de realización de las mediciones muy controladas, seguimiento continuado por parte del operario, toma de muestras difícil, etc.

Ante esta situación, en las últimas décadas han surgido diversas investigaciones encaminadas a la búsqueda de nuevos métodos, surgiendo así los métodos estimativos/predictivos. Se fundamentan en la estimación de las propiedades a partir de otras propiedades que caractericen el medio y que sean fácilmente obtenibles, basándose en la Estadística. En este capítulo se tratan dos de estos métodos, las funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs) y las aplicaciones informáticas.

2. Funciones de pedotransferencia.

2.1. Fundamentos.

En los últimos años es acuciante la necesidad de disponer de datos sobre propiedades hídricas de suelos para su incorporación en modelos en los que el componente hidrológico juega un papel importante (Soto *et al.*, 2001)

Los modelos con base estadística utilizados para inferir variables de determinación costosa a partir de variables de fácil obtención, se denominan “*funciones de pedotransferencia*” (*pedotransfer functions*) (PTFs). Son ecuaciones empíricas, obtenidas con técnicas de regresión, relacionando propiedades físicas básicas del suelo, con propiedades hidráulicas (Villar y Ferrer, 2005), es decir, son funciones en que sus argumentos básicos son datos que se emplean en la descripción de suelos y como resultados aportan funciones hidrológicas (Tietje y Tapkenhinrichs, 1993).

La ventaja fundamental del empleo de PTFs se fundamenta en el conocimiento preciso y fiable de atributos hídricos de suelos que son costosos y dificultosos de determinar, mediante el empleo de variables edáficas de determinación sencilla y/o fácilmente disponibles y localizables en bases de datos edafológicas (Martínez *et al.* 2004).

2.2. Denominaciones.

Las PTFs fueron propuestas por Bouma (1989), que las define como un procedimiento para transformar los datos que “*tenemos*” en los que “*necesitamos*”. Estas, se denominan igualmente “*funciones de edafotransferencia*” (Martínez y Ceballos, 2001) e incluso, en sus inicios, como “*funciones de transferencia*”.

2.3. Variables implicadas.

Se establecen dos tipos de variables implicadas en el proceso de estimación mediante PTFs: las “*variables predictoras*” y las “*variables estimadas*” (que se predicen). Estas últimas son las variables que se pronostican mediante el uso de las PTFs. Las variables predictoras aportan la información para el pronóstico, pudiendo venir esta información de distintas fuentes: datos del laboratorio, descripciones de campo y morfología del suelo, variables ambientales, espectro electromagnético del suelo y bases de datos existentes sobre los suelos.

2.4. Tipos de enfoques.

Cuando se trabaja con PTFs, Minasny *et al.* (2003) distinguen dos tipos distintos de enfoque:

- ✓ *Enfoque estático*, en el que las PTFs son utilizadas para estimar las propiedades del suelo.
- ✓ *Enfoque dinámico*, en el que se predice otras propiedades del suelo que serán utilizadas en la intersección de datos (inputs) en modelos de simulación o de soporte a la decisión. Estos modelos podrán ser empleados para establecer o crear escenarios sobre los distintos sistemas de manejo agrícola sobre la funcionalidad de los suelos.

2.5. Clasificación de las PTFs.

Las clasificaciones existentes son variadas y se realizan atendiendo a distintos criterios como (Pineda y Vilorio, 1992; Minasny *et al.*, 1999; Rubio y Llorens, 2003):

- En función de lo que se basen los modelos utilizados:
 - ✓ Modelos basados en ecuaciones de regresión (utilizados más frecuentemente). Dentro de estos se distinguen tres tipos distintos de aproximación:
 - Regresión lineal múltiple (*multiple linear regression*).
 - Regresión no lineal extendida (*extended nonlinear regression*).
 - Red neuronal (*artificial neural network*).
 - ✓ Modelos de simulación.

- En función del tipo de predicción que se realice con la aplicación de las PTFs:
 - ✓ las que predicen las propiedades hidrodinámicas a partir de modelos basados en las propiedades del suelo.
 - ✓ las que predicen determinados valores de la curva característica de humedad por su interés específico.
 - ✓ las que predicen los parámetros que permiten construir de forma completa la relación entre la humedad volumétrica y el potencial matricial.

- En función del tipo de información en que se base:
 - ✓ *PTFs básicas.*
 - ✓ *PTFs de clase:* predicen ciertas propiedades de los suelos con base en la clase textural a la cual pertenece el suelo. En ellas se utilizan propiedades del tipo de porcentaje de arcilla (ARC), porcentaje de materia orgánica (MO), etc.
 - ✓ *PTFs continuas:* predicen ciertas propiedades de los suelos como una función continua de las variables medidas (emplean el resto de las variables posibles). En ellas se emplea la designación del horizonte, el tipo de suelo, etc.

No obstante, Bouma (1989) y Wösten (1997) reconocen únicamente las PTFs “*de clase*” y “*continuas*” como posible clasificación a establecer.

Esta última clasificación se puede complicar, pudiéndose clasificar según Minasny *et al.* (2003) basándose en variables predictoras/estimadas, es decir, según el tipo de predictor y las variables estimadas. Las variables predictoras/estimadas pueden ser una clase definida (“*hard class*”) o difusa; y variables continuas y mixtas; lo cual provoca que existan diferentes combinaciones posibles que se detallan en la tabla VI.1, pero no todas ellas pueden considerarse como PTFs.

Tabla VI.1. “Diferentes combinaciones de las variables predictoras/estimadas” (Adaptada de Minasny *et al.*, 2003)

		Variables predictoras			
		Clase definida (“hard class”)	Clase Difusa	Continua	Mixta
Variables predecidas	Clase definida (“hard class”)	PTF	-	-	-
	Clase difusa	PTF	PTF	-	-
	Clase continua	PTF	PTF	PTF	PTF
	Clase mixta	PTF	PTF	PTF	PTF

- En función del tipo de abordaje empleado para desarrollar las PTFs:
 - ✓ *Enteramente empíricos*: tratan de lograr relaciones entre las variables predictoras y las estimadas usando un análisis de regresión u otros modelos matemáticos.
 - ✓ *Fisico-empíricos*: las propiedades de los suelos son derivadas con base a algunos principios físicos.
- Considerando el tipo de datos que se desea predecir:
 - ✓ *PTFs por puntos simples*: predicen una propiedad del suelo.
 - ✓ *PTFs paramétricas*: predicen parámetros de un modelo, es decir, la relación entre una variable dependiente (x) y variables independientes (y), asumiendo que un modelo del tipo $y=f(x,p)$, ecuación con “p” parámetros, puede representar los datos adecuadamente. Este tipo suele ser preferida frente a las de puntos simples, por producir una función continua de relación. La función paramétrica más formulada es el cálculo de los parámetros de un modelo de retención de agua. Para su determinación se calculan los parámetros del modelo por el ajuste de este a los datos, formando relaciones empíricas entre las propiedades básicas de los suelos, lo cual se puede lograr mediante métodos matemáticos como regresión lineal múltiple o “*artificial neural networks*”, entre otros.

Considerando que la clasificación de las PTF se puede realizar en función de innumerables aspectos, se provoca que las distintas subclasificaciones se encuentren íntimamente relacionadas entre ellas.

2.6. Propiedades y características físicas del suelo.

Rawls *et al.* (1991) recogen las distintas propiedades y características del suelo que se utilizan para caracterizar la capacidad de retención de un suelo. Estas fueron clasificadas en cuatro grandes categorías:

- *Características del tamaño de partícula del suelo*: porcentajes de arena (ARE), limo (LIM) y ARC y referidos al tamaño de partícula la distribución, la media geométrica y la desviación estándar, así como también los agregados estables al agua.
- *Características hidráulicas*: el agua a -33 kPa y a -1500 kPa y curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC) de referencia.
- *Propiedades morfológicas*: la densidad aparente (DAP), carbono orgánico (CO), MO, porosidad, horizonte, estructura, orden, color, consistencia y tipo de ARC.

- **Propiedades químicas:** el ratio de adsorción de sodio, capacidad de intercambio catiónico, carbonato cálcico y hierro.

A lo largo de las innumerables investigaciones realizadas sobre el tema, la elección de las variables utilizadas ha sido diversa. No obstante, se recomienda que el número de propiedades implicadas en la estimación deberá ser reducido y de fácil medición dado que en caso contrario el método resultaría excesivamente incómodo (Jaynes y Tyler, 1984).

Pineda y Vilorio (1992) consideraron como variables independientes aquellas características con mayor coeficiente de correlación. Estos fueron altamente significativos para ARE y ARC, proponiendo ecuaciones de predicción de la retención de agua del suelo a capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP) a partir de la textura y del contenido de MO. Más simple es el caso de Jaynes y Tyler (1984) estimando la conductividad hidráulica a partir de ARE para suelos gruesos.

De Medeiros-Silveira *et al.* (2004) aplicaron estadística al contenido de ARE, LIM y ARC y a la DAP y porosidad con dos métodos distintos: *correlación simple*, observando correlaciones negativas para la DAP (mayor retención en suelos menos densos), la ARE, ARE/ARC y LIM/ARC y positiva para LIM y ARC y *correlación múltiple* con opción de selección de variables, siendo la ARE, porosidad total y microporosidad los mejores estimadores de la retención de agua. Con estos dos métodos, Rossato *et al.* (2002) obtuvieron una mayor asociación de la ARE, ARC, ARC dispersa en agua y DAP del suelo con los valores de humedad a estimar (FC, PWP y un punto intermedio a -100 kPa) con correlación simple, mientras que con la correlación múltiple los atributos de ARE, MO, ARC dispersa en agua y proporción de algunas clases de agregados fueron los mejores estimadores de la retención de agua. En este caso, recomendaban que la elección de las variables se deberá basar en aquellas variables de las cuales se sepa de antemano que afectan en la propiedad hídrica a calcular.

Una gama más amplia de propiedades fueron consideradas en el caso de Solano *et al.* (2002), tomando propiedades físicas, químicas y mineralógicas.

2.7. Procedimiento de aplicación.

Existen dos estrategias de aplicación en zonas de estudio donde no se dispone de información:

- Investigaciones encaminadas a la obtención de las PTFs a partir de datos edáficos de una determinada zona, a fin de determinar datos de otros puntos incluidos en la misma área.
- Búsqueda y utilización de PTFs preestablecidas y adecuación a la zona de estudio considerada.

2.8. Procedimiento de desarrollo de nuevas PTFs.

Dada la complejidad de generación de funciones, se sugiere en un primer acercamiento el uso de PTFs ya existentes, no obstante se deberá considerar que estas no deben interpolarse o extrapolarse más allá del ambiente pedológico y del tipo de suelo en que fueron desarrolladas. Los pasos a seguir en su uso son: estratificación, calibración y testado. La estratificación permitirá separar adecuadamente las PTFs con base en el tipo de suelo y la información de entrada, pudiéndose realizar atendiendo a diversos criterios: los horizontes del suelo, clases de suelos según FAO, horizontes hidráulico-funcionales, etc. La calibración permite ajustar las propiedades de acuerdo a los datos de entrada, siendo necesaria debido a los diferentes criterios y medidas de PTFs existentes. El testado se podrá realizar a partir de datos disponibles, pudiendo verificar la adecuación del uso de las mismas a las distintas condiciones de manejo concretas de estudio que se realice.

Minasny *et al.* (2003) proponen un esquema para la generación de nuevas PTFs (Fig. VI.1):

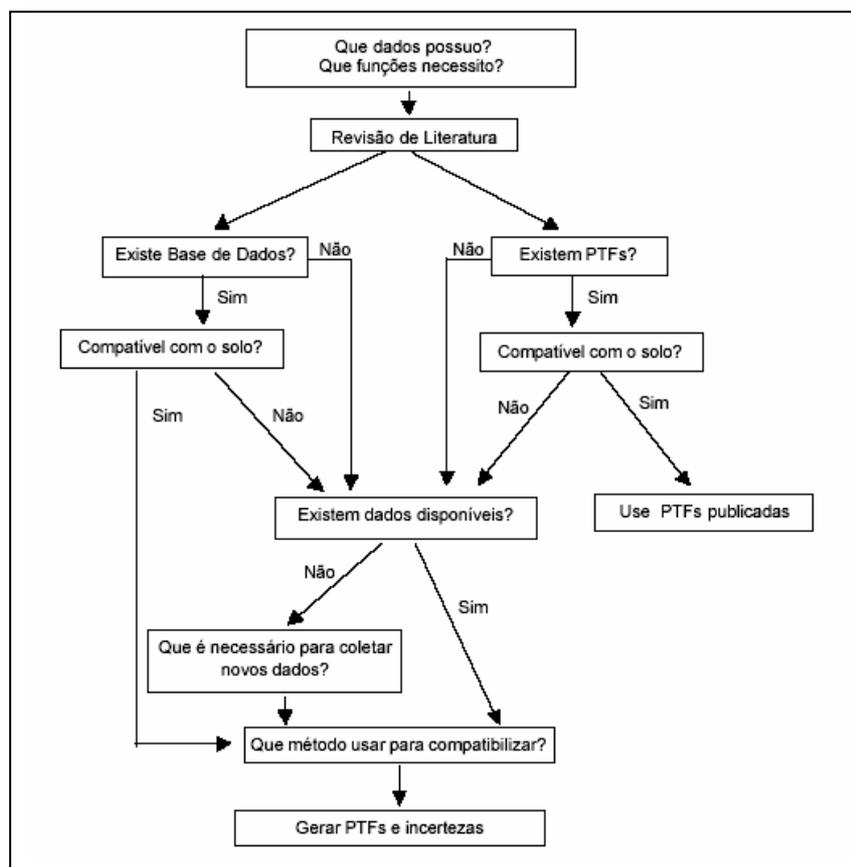


Figura VI.1. "Esquema de generación de PTFs" (Minasny *et al.*, 2003)

Los estudios conducentes a la evaluación de este tipo de funciones presentan una clara limitación basada en la carencia de claridad sobre las causas principales de error entre

los modelos que aportan PTFs, diferencias entre los algoritmos de desarrollo de PTFs o diferencias entre los predictores que se adecuan a una PTF mejor que otros (Nemes, 2003).

2.9. Técnicas de desarrollo de nuevas PTFs.

Numerosas técnicas han sido empleadas para la obtención de PTFs. Recientemente se han desarrollado análisis mediante “*artificial neural networks*” (artificial NNs). Este tipo de análisis está avalado por diversos estudios que han encontrado que la capacidad predictiva de las NNs PTFs es equivalente e incluso superior a los diferentes tipos de PTFs obtenidas mediante diversos tipos de regresión (Nemes, 2003).

2.10. Ámbito de aplicación.

En los modelos basados en ecuaciones de regresión hay que considerar que cada ecuación describe adecuadamente la relación entre las variables dependiente e independientes consideradas únicamente dentro del conjunto de suelos considerados y representados por la/s muestra/s considerada/s (Pineda y Vilorio, 1992), no siendo, por tanto, posible la extrapolación a otros tipos de suelos sin realizar la validación previa del modelo con las nuevas condiciones.

2.11. Aparataje utilizado.

Solano *et al.* (2002) y Rossato *et al.* (2002) emplearon para la determinación del potencial un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM), utilizándolo posteriormente De Medeiros-Silveira *et al.* (2004) en una metodología combinada del WAM para potenciales de -1500 y -500 kPa y la cámara de Richards para los potenciales comprendidos entre -6 y -100 kPa. Considerando a mayores la “*mesa de tensión*” Barreto *et al.* (2004) determinaron las WRCs y la conductividad hidráulica insaturada, esta última con ayuda de un permeámetro de Guelph y Rubio y Llorens (2003) determinaron las propiedades hídricas para cada muestra con el recipiente de tensión hídrica para potenciales mátricos de saturación, empleando la membrana de presión para los restantes valores.

2.12. Aplicaciones de las PTFs.

A continuación se describen algunos ejemplos de la aplicación de las PTFs.

✓ *Estimación de la DAP.*

En los comienzos del uso de las PTF, momento en el cual la capacidad predictiva de las mismas aún no estaba totalmente explotada siendo necesaria una ampliación en la explotación de la misma, las estimaciones eran sencillas. Así, Rawls (1983) desarrolló un método de predicción de la DAP en suelos inalterados naturales basado en información

rutinaria que habitualmente se recoge en suelos, como el tamaño de partícula y la MO. El efecto de esta última sobre la DAP fue igualmente comprobada.

✓ *Predicción de la capacidad de retención de agua útil.*

El conocimiento de la capacidad de retención del agua (*available water content*) (AWC) del suelo se requiere para la realización de las investigaciones e interpretaciones de las relaciones suelo-agua, afectando directamente a la infiltración, el flujo de agua, el drenaje, el transporte de solutos, la trabajabilidad del suelo, el manejo del riego y la disponibilidad de agua de los cultivos.

Pineda y Viloria (1992) desarrollaron un modelo basado en dos ecuaciones de regresión lineal multivariada para predecir la AWC en suelos aluviales, comparando su capacidad predictiva con varios modelos. Con cada uno de ellos, el error cuadrático medio obtenido resultó ser mayor para la estimación de la FC que para el PWP, estimando con mayor exactitud su modelo que los considerados de la bibliografía existente.

En 1999, Trouche y Morlon cartografiaron la AWC con un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la región francesa de Migennes (Yonne), no disponiendo de valores de la misma procedentes de estudios edáficos previos y requiriendo el uso de PTFs para su estimación. Se basaron tanto en ecuaciones de regresión como sobre las clases texturales, obteniendo en ambos caso un sobreestimación de la AWC, especialmente con el primer método citado.

Nemes (2003) desarrolló PTFs para la estimación de la AWC utilizando dos bases de datos internacionales (HUNSODA database e HYPRES database) y desarrolló PTFs similares y específicas para Hungría, testando estas últimas de forma independiente.

✓ *Elaboración de WRCs.*

Para la obtención de las WRCs, De Medeiros-Silveira *et al.* (2004) desarrollaron un modelo con aplicación a suelos brasileños, con una tendencia clara a la subestimación en determinados valores de humedad. Algo similar fue realizado por Rubio y Llorens (2003) al calcular las WRC para suelos franco-limosos mediante la aplicación del programa Rosetta empleando dos tipos distintos de PTFs, una de clase y varias continuas, encontrándose con que la H5 es la que presenta valores más cercanos a los medidos sobre todo en la zona cercana a la FC, existiendo una subestimación a valores próximos a saturación y al PWP. Barreto *et al.* (2004) compararon los resultados con diferentes manejos del suelo, achacando las diferencias observadas entre los mismos a la modificación del tamaño de los poros del suelo como consecuencia del diferente manejo, dado que cualquier modificación en los mismos ocasiona una modificación en el potencial con el que el agua es retenida en su interior y por tanto, la tensión necesaria para su vaciado.

✓ *Caracterización de la conductividad hidráulica saturada.*

Para la evaluación del uso potencial del suelo en diversas prácticas, sean estas agrícolas o no, es necesario conocer la conductividad hidráulica del suelo, determinación que se requiere a menudo para caracterizar el medio debido a la variabilidad espacial de esta característica. Desde hace unos cuantos años se vienen desarrollando métodos alternativos para su determinación, calculando la conductividad hidráulica directamente a partir de características del suelo, asumiendo, la mayor parte de estos métodos, la existencia de una relación matemática entre la conductividad, el contenido de agua y el potencial, pudiéndose expresar la conductividad en función de las otras dos variables.

Jaynes y Tyler (1984) establecieron una ecuación, dentro de un rango de potencial de 0-10 kPa, basándose en el contenido de ARE para suelos de textura gruesa, siendo preferible incluir un mayor número de variables ARE, LIM, DAP en otros casos en que predomine la fracción fina (FF). La propuesta inicial se basa y justifica considerando que ARE se relaciona con la distribución eficaz de los poros de suelo, dado que cuanto más ARE exista en el suelo, más grandes será el tamaño de los poros, lo cual ocasiona que se de un mayor valor de la conductividad.

Barreto *et al.* (2004) fundamentaron su investigación en la caracterización de la conductividad hidráulica insaturada en suelos sometidos a diferentes manejos, siendo la conductividad obtenida superior en suelos en los cuales se remueve el terreno frente a los que no se hace, atribuyéndose a la menor DAP de los suelos removidos.

✓ *Determinación de la FC y el PWP.*

Solano *et al.* (2002) centraron sus trabajos en la determinación del PWP para suelos en el Estado del Río Grande do Sul (Brasil), estableciendo las PTFs para los distintos tipos de suelo, concluyendo que la MO y la granulometría desempeñan un papel fundamental en la estimación del PWP. El uso de las PTFs fue ampliado por Rossato *et al.* (2002) para estimar la retención de agua a -1500, -100 y -33 kPa en argisol rojo.

Soto *et al.* (2001) estimaron el PWP a partir de datos del porcentaje de ARC y a partir del contenido de ARC, LIM, porosidad y CO, no mejorando sensiblemente las buenas estimaciones en este último caso. Para FC emplearon inicialmente el contenido de ARC y de LIM, la DAP, el pH en agua (PH_A) y el contenido de CO, para posteriormente reducirlo simplemente a contenido de ARC, LIM y CO, siendo en este caso el coeficiente de correlación sensiblemente inferior. Intentaron determinar los parámetros de la ecuación de van Genuchten, pero no obtuvieron nada destacable atribuyendo el hecho a la escasa significación física de los parámetros de la función.

Estos son sólo un ejemplo de los estudios realizados con PTFs que confirman la fiabilidad y bondad de sus estimaciones. Son igualmente de destacar los estudios de Haverkamp y Parlange (1986), Saxton *et al.* (1986), McKeague (1987), Franzmeier (1991), Danalatos *et al.* (1994), Salchow *et al.* (1996), Sinowski *et al.* (1997), Tomasella y Hodnet, (1998) y Pachepsky y Rawls (2004), entre otros.

En la investigación desarrollada se emplean PTFs en los capítulos XI y XII.

3. Aplicaciones informáticas.

3.1. Fundamentos.

Las aplicaciones informáticas se fundamentan en el empleo de modelos propuestos por diversos autores para la estimación de propiedades hídricas, basándose en la aplicación combinada de dos disciplinas, la Estadística, mediante la aplicación de PTFs en los modelos propuestos, y la Informática, mediante el uso de programas disponibles a tal efecto.

Son aplicaciones de fácil manejo, rápidas en la aportación de resultados y cuya fiabilidad se ve condicionada por la idoneidad del modelo considerado en su aplicación a las características concretas de la zona de estudio.

3.2. Requerimientos.

Los requerimientos son mínimos, demandando las propiedades básicas que caracterizan a las muestras en los aspectos físico-químicos e hídricos. Las propiedades físico-químicas se demandan para introducirlas en el modelo como datos y las propiedades hídricas se requieren como elemento de comparación de la bondad de las estimaciones realizadas. Se hace, por tanto, necesario de un método de medición directo o indirecto complementario, para el estudio para la fase de prueba del modelo.

3.3. Estimaciones realizadas.

En función del modelo que se aplique con el programa las estimaciones pueden ser diferentes:

- Estimaciones de parámetros o coeficientes de modelos de estimación.
- Estimaciones de propiedades hídricas.
- Estimaciones de propiedades físico-químicas.
- Estimación del contenido de agua a potenciales concretos, para estimar la curva de retención de agua completa, entre otras.

3.4. Propiedades predictivas y estimadas.

Ambos tipos de propiedades están relacionadas por el modelo aplicado a través del programa. De modo genérico, las propiedades predictivas demandadas son las propiedades

texturales según diversas clasificaciones, el contenido de MO y CO, el pH, DAP, porosidad, profundidad radicular (Z), entre otras.

Las estimaciones realizadas son propiedades fisicoquímicas (p. ej. DAP), coeficientes de modelos de estimación (a, b de Campbell; alpha, m, n, theta residual de Van Genuchten, etc.), contenidos de agua a diferentes presiones y propiedades hídricas (FC, PWP, AWC, conductividad hidráulica, etc).

3.5. Software disponible.

La elección de un software vendrá condicionada tanto por las propiedades predictivas como estimadas. No obstante, antes a su aplicación sobre las muestras consideradas se deberá realizar una evaluación previa de la adecuación del modelo aplicado a la zona de estudio, debido a que todo modelo ha sido generado a través de PTFs sobre muestras y zonas de estudio concretas, con unas características determinadas, que pueden diferir notablemente de las muestras consideradas por el usuario y no realizar estimación fiables.

Los programas disponibles para la estimación de propiedades hídricas, por citar algunos, son:

- *SOILPAR*
- Rosetta
- RETC
- SWlimits & Ksat
- SWRC
- Pedon-SEI

Estudios de Schaap *et al.* (2001), Acutis y Donatelli (2003), Rubio y Llorens (2003), Vanderlinden *et al.* (2003) y Wang *et al.* (2003), entre otros, avalan la fiabilidad de las estimaciones realizadas con este tipo de aplicaciones.

Por los requisitos demandados, adecuación a la información disponible, fácil manejo y características de esta investigación, se opta por emplear *SOILPAR*. En el capítulo XI se describe y aplica.

4. Referencias bibliográficas.

Acutis, M.; Donatelli, M. 2003. *SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. European Journal of Agronomy. 18: 373-377.*

Barreto, U.F.; Rossato, G.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J. 2004. Curvas de retenção de agua e condutividade hidráulica do solo em sistemas de manejo do feijoeiro. XV Reunião brasileira de manejo e conservação de solo e água. Santa Maria. 25-30 julho.

- Bouma, J.** 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*. **9**: 177-213.
- Danalatos, N.G.; Kosmas, C.S.; Driessen, P.M.; Yassoglou, N.** 1994. Estimation of draining soil moisture characteristic from standard data as recorder in routine soil surveys. *Geoderma*. **64**: 155-165.
- De Medeiros-Silveira, F.; Santi, G.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Calesso, R.; Gubiani, P.I.; Collares, G.L.** 2004. Estimativa da retenção de água através de pedofunções para alguns solos brasileiros. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Santa María. 25 a 30 julho 2004.
- Franzmeier, D.P.** 1991. Estimation of hydraulic conductivity from effective porosity data for some Indiana soils. *Soil Science Society of America Journal*. **55**: 1801-1803.
- Haverkamp, R.; Parlange, Y.J.** 1986. Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*. **142** (6): 325-339.
- Jaynes, D.B.; Tyler, J.** 1984. Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. *Soil Science*. **138** (4): 298-305.
- Martínez, J.; Ceballos, A.** 2001. Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafotransferencia. En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. pp: 45-50.
- Martínez, J.; Ceballos, A.; Casado, S.; Moran, C.** 2004. Estimación de propiedades hidrológicas de suelos y formaciones superficiales de dehesa mediante funciones de edafotransferencia. Benito, G., Díez Herrero, A. (eds.). Contribuciones recientes sobre Geomorfología. Actas de la VII Reunión Nacional de Geomorfología. SEG y CSIC, Toledo, España.
- McKeague, J.A.** 1987. Estimating air porosity and available water capacity from soil morphology. *Soil Science Society of America Journal*. **51**: 148-152.
- Minasny, B.; McBratney, A.B.; Bristol, K.L.** 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*. **93**: 225-253.
- Minasny, B.; McBratney, A.B.; Mendonça-Santos, M. de L.; Gonçalves dos Santos, H.** 2003. Revisão sobre funções de pedotransfêrencia (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos – CNPS, Rio de Janeiro.
- Nemes, A.** 2003. Multi-scale pedotransfer functions for Hungarian soils. Doctoral Thesis. Wageningen University. The Netherlands.

- Pachepsky, Ya.; Rawls, W.J.** 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. *Developments in Soil Science*. **30**.
- Pineda, C.; Vilorio, J.** 1992. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del Lago de Valencia. *Venesuelos*. **5** (1-2): 39-44.
- Rawls, W.J.** 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science*. **135** (2): 123-125.
- Rawls, W.J.; Gish, T.J.; Brakensiek, D.L.** 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Advances in Soil Science*. **16**: 213-234.
- Rossato, G.; Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Paulette, E.A.; Spinelli, L.F.** 2002. Estimativa de retenção e água a partir de atributos do solo. En: IV Reunião Sul brasileira de Ciencia do solo. Porto Alegre, Brasil.
- Rubio, C.; Llorens, P.** 2003. Evaluación del uso de funciones de edafotransferencia para la determinación de propiedades hidrodinámicas en suelos franco-limosos (Cuencas experimentales de Vallcebre, Alt Llobregat). En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. pp: 137-142.
- Salchow, E.; Lala, R.; Fausey, N.R.; Ward, A.** 1996. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. *Geoderma*. **73**: 165-181.
- Saxton, K.E.; Rawls, W.J.; Romberger, J.S.; Papendick, R.I.** 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 1031-1036.
- Schaap, M.G.; Leij, F.J.; van Genuchten, M.T.** 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. **251**: 163-176.
- Sinowski, W.; Scheinost, A.C.; Auerswald, K.** 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function. *Geoderma*. **78**: 145-159.
- Solano, J.E.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Santón, G.; Sequinatto, L.** 2002. Equações de pedotransferência para estimativa do ponto de murcha permanente (PMP) em solos do rio Grande do Sul. XIV Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água. Cuiabá, M.T. 21-26 julho.
- Soto, B.; Arias, M.; Diaz-Fierros, F.** 2001. Desarrollo de una función de pedotransferencia para los suelos de Galicia (NW Spain). *Agrochimica*. **XLV** (5-6): 178-188.
- Tietje, O.; Tapkenhinrichs, M.** 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Science Society of America Journal*. **57**: 1088-1095.

- Tomasella, J.; Hodnet, M.G.** 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*. **163** (3): 190-202.
- Trouche, G.; Morlon, P.** 1999. Comparaison de diferentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (RU) dans le périmètre de l'OGAF. Environnement de la zone de Migennes (Yonne). *Étude et Gestion des Sols*. **6** (1): 41-54.
- Vanderlinden, K.; Giradles, J.V.; van Meirvenne, M.** 2003. Evaluación de la capacidad de retención de agua de los suelos de Andalucía mediante el análisis del balance medio anual del agua. En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, España. pp: 131-136.
- Villar, J.M.; Ferrer, F.** 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. pp: 23-86.
- Wang, F.; Fraisse, C.W.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.** 2003. Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri clypan soils. *Agricultural Systems*. **76**: 985-1005.
- Wösten, J.H.M.** 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. En: E.G. Gregorich, M.R. Carter (Eds). Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science. **25**. Elsevier.

VII

ENSAYOS PREVIOS DE LABORATORIO

CAPÍTULO

CAPÍTULO VII

ENSAYOS PREVIOS DE LABORATORIO

“Si uno no puede comunicar lo que ha estado haciendo, su trabajo carecerá de valor”
Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961). Físico austriaco.

ÍNDICE

Resumen	145
1. Introducción.....	147
2. Protocolo de medición inicial	147
3. Determinación de las propiedades hídricas	150
4. Idoneidad del empleo de un WAM para la determinación de la FC y la AWC	151
5. Referencias bibliográficas	152

RESUMEN

Complementariamente a los ensayos contenidos en esta investigación, han sido realizados otros ensayos previos que han permitido establecer unas hipótesis iniciales adecuadas respecto a la no idoneidad del medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM) para la determinación de la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y la reserva de agua útil (*available water content*) (AWC), siendo preciso el empleo de un método complementario, la placa de presión (*pressure plate*) (PP).

1. Introducción.

El comienzo de toda investigación se fundamenta en unas hipótesis iniciales, que no siempre son fáciles de establecer, y unos conocimientos previos, que pueden no encontrarse a disposición del investigador. Por tanto, se hace necesario la realización de unos ensayos previos y la búsqueda de asesoramiento en trabajos de otros investigadores.

En esta investigación, debido a lo novedosa en la aplicación de un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM) para la determinación de propiedades hídricas en la zona de estudio, se han realizado ensayos previos de laboratorio que se detallan a continuación y que se han visto complementados por los trabajos de Cancela (2004) y Rodríguez (2004).

Los ensayos se encaminaron a la determinación de la idoneidad del empleo de un WAM para la determinación de dos propiedades hídricas, capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y reserva de agua útil (*available water content*) (AWC), a partir de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC), dado que la propia resolución del dispositivo 0,10 MPa, genera una controversia inicial.

2. Protocolo de medición inicial.

Como se menciona en el capítulo V, el fabricante del WAM no facilita un protocolo pormenorizado de las operaciones que hay que realizar para la determinación de propiedades hídricas con este tipo de dispositivos. Los primeros estudios realizados con un WAM en Galicia son derivados del trabajo de Cancela (2004), los cuales se toman como fuente inicial de información. El protocolo propuesto consta de siete etapas: secado de las muestras, tamizado, humectación, lectura, secado posterior, pesado y determinación de la curva de retención de agua. Por la importancia del mismo, se detalla a continuación:

➤ *Secado de muestras.*

1. Vaciar el suelo en la bandeja.
2. Poner a secar hasta eliminación completa de la humedad.

➤ *Tamizado.*

1. Pesar el suelo antes de tamizar.
2. Pasar el suelo por el tamiz de 2 mm.
3. Deshacer los agregados de tierra que no pasan por el tamiz, utilizando una botella de cristal.
4. Pasar de nuevo el suelo por el tamiz de 2 mm.
5. Repetir los puntos 3 y 4 hasta que no existan agregados.
6. Pesar la fracción que no pasa por el tamiz de 2 mm.
7. Pasar la fracción fina a una bandeja.
8. Poner a secar.
9. Repetir los pasos 2 a 8 con las bandejas restantes.

➤ *Humectación.*

1. Llenar el vaso de precipitados con agua destilada.
2. Recortar 24 trozos de “Parafilm” para tapar los vasos tras la humectación.
3. Pesar las bandejas que contienen la fracción fina (< 2 mm) si es posible.
4. Tomar 20 gramos de suelo tamizado a 2 mm e introducirlo en un vaso de plástico.
5. Preparar la pipeta graduada en la escala correcta.
 - 5.1.1. Humectar con diferentes cantidades en cada vaso.
 - 5.1.2. Los niveles de humectación deben ser los siguientes (Tabla VII.1):

Tabla VII.1. “Niveles de humectación”

% en peso	Agua por bote (ml)
5	1
10	2
15	3
20	4
25	5
30	6
35	7
40	8

6. Tapar con “Parafilm”.
7. Repetir los pasos 3 a 5 en los 23 vasos restantes.
8. Dejar reposar hasta el día siguiente (si es necesario agitar para homogenizar)

➤ *Lectura.*

1. Encender el psicrómetro 30 minutos antes de realizar la primera lectura.
 - 1.1.1. Encender el ordenador. Conectar el Hyperterminal WP4 y abrir una hoja de cálculo.
 - 1.1.2. Tomar 10 gr. de cada bote y pasarlos a una cápsula. Se deben de tener 8 cápsulas.
2. Comprobar la calibración del psicrómetro. Para lo cual se vierte la disolución de calibración en una cápsula, de modo que esta quede mediada, nunca llenarla.
3. Introducir la cápsula que contiene la disolución en la cámara de lectura, teniendo especial cuidado por tratarse de un líquido, pues podría derramarse y ensuciar el psicrómetro. Realizar dos lecturas en modo simple. Comprobar si las mediciones son correctas. En caso negativo realizar la calibración, sino pasar a realizar las mediciones (punto 5)
4. Para calibrar se debe acceder al menú de calibración (botón inferior izquierdo y posteriormente botón superior derecho), seguir las instrucciones que nos aparecen en la pantalla. Ajustar el valor final al apropiado.
5. Una vez calibrado o comprobada la calibración del psicrómetro, se comienza con las lecturas (modo simple).

- 5.1. Introducir la cápsula.
- 5.2. Comprobar la diferencia de temperatura entre la cámara y la cápsula (botón inferior derecho).
 - 5.2.1. Si el valor que aparece en el display es mayor que cero, retirar la cápsula inmediatamente de la cámara, esperar aproximadamente 1 minuto y repetir la operación.
 - 5.2.2. Si el valor es menor que -1 , esperar a que el psicrómetro disminuya la diferencia de temperaturas, estando entonces en las condiciones del punto 5.3.
 - 5.2.3. Si el valor está entre 0 y $-0,99$ se puede realizar la lectura.
- 5.3. Realizar cuatro lecturas para cada cápsula. Trasladar los resultados del Hyperterminal a la hoja de cálculo. Entre lectura y lectura repetir los pasos 5.1 y 5.2.
- 5.4. Tras la cuarta lectura retirar la cápsula medida e introducir la siguiente, teniendo en cuenta lo dicho en los puntos 5.2 y 5.3.
- 5.5. Pesar cada cápsula inmediatamente a la salida del aparato.
6. Comprobar la calibración del psicrómetro tras la medición de 8 cápsulas y al final de las lecturas del día. Pudiendo ser necesario repetir los puntos 3 a 4.
7. Apagar el psicrómetro y el ordenador.

➤ *Secado posterior.*

Finalizada la lectura de las 8 cápsulas que constituyen cada punto de muestreo, se debe trasladar las cápsulas al horno a 105°C durante 24 horas, siendo 24 cápsulas en total.

➤ *Pesado.*

Pesar las cápsulas introducidas el día anterior, siempre que hayan pasado 24 horas (utilizar la misma báscula).

➤ *Determinación de la curva de retención de agua.*

Se representa el potencial de agua, en (-MPa), frente al contenido de agua, en (g/g), y se calcula la línea de potencial que mejor se ajusta a cada nube de puntos, calculando el coeficiente de ajuste (r^2), para cada regresión, el cual nos da una idea del ajuste de la misma. Las ecuaciones a las que se ajustan las nubes de puntos son del tipo: $y = ax^{-b}$, correspondiente al modelo de Campbell (1985) (recomendación del fabricante).

Para el cálculo de la FC y el punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP) se consideran los valores de 0,033 MPa y 1,55 MPa. Se interpola en la gráfica y se obtienen los valores de FC y PWP. Así se determina el contenido gravimétrico de humedad, utilizando la densidad aparente previamente calculada para su transformación a volumétrico. La AWC se obtiene por diferencia entre la FC y el PWP expresados en volumen.

El protocolo descrito es el empleado para la realización de los ensayos previos. En capítulos posteriores se analiza la idoneidad del mismo (Sección III).

3. Determinación de las propiedades hídricas.

Para clarificar el proceso de análisis de datos se procede a detallar los cálculos de una de las muestras consideradas.

Las características definen la muestra son:

- *Fecha en que se tomó la muestra:* 22 de julio del 2002.
- *Tipo de suelo:* Fluvisol.
- *Cultivo plantado:* Maíz.
- *Profundidad explorada por las raíces:* 47,50 cm.
- *Densidad aparente:* 0,79 gr/cm³.
- *Porcentaje de FF:* 88,59%.
- *Porcentaje de FG:* 11,41%.
- *Porcentaje de M.O:* 5,78 %.

Tras realizar las correspondientes lecturas a los 8 estados de humedad anteriormente definidos, se pesaron las cápsulas y se obtuvo la WRC (Fig. VII.1):

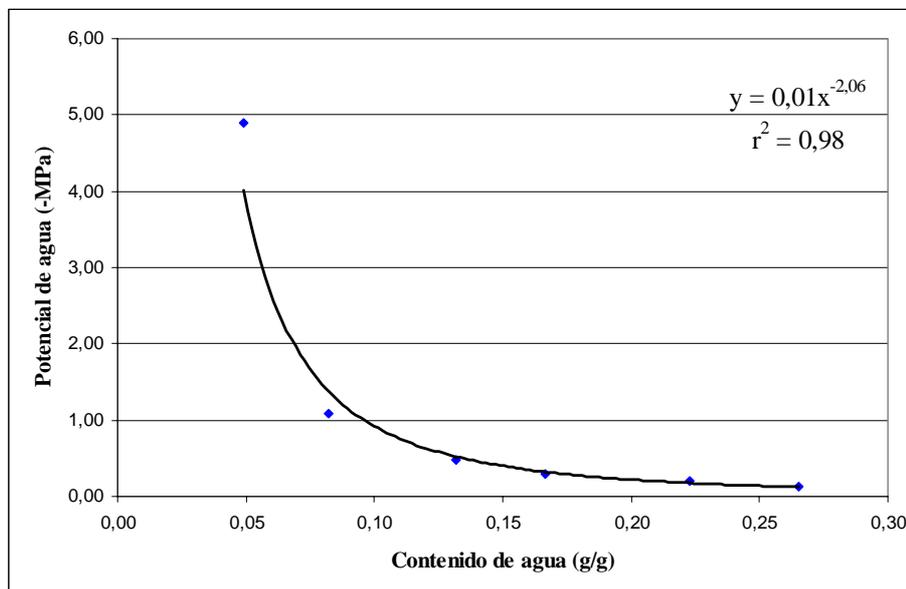


Figura VII.1. “WRC de la muestra C15”

Interpolando en la ecuación de la WRC, se obtienen los valores de FC y PWP:

$$\begin{aligned} \text{FC} &= 0,39 \text{ gr/cc} \\ \text{PWP} &= 0,06 \text{ gr/cc} \end{aligned}$$

La AWC se calcula de la siguiente forma:

$$AWC = (0,39 - 0,06) \times 475 \text{ mm} = 156,75 \text{ mm}$$

El procedimiento aquí descrito es el seguido con todas las muestras.

4. Idoneidad del empleo de un WAM para la determinación de la FC y la AWC.

Se tomaron 24 muestras de la zona de estudio y se realizaron las lecturas de potencial según el protocolo expuesto. De cada muestra se realizaron dos determinaciones y se representaron los resultados obtenidos para las dos lecturas para la FC y la AWC. De esta forma se puede comprobar la repetibilidad del WAM (Fig. VII.2).

Los resultados en ambos casos muestran una nube de puntos con una tendencia no definida, obteniéndose unos ajustes muy pobres para ambas propiedades, lo cual confirma la hipótesis inicial de que debido a la propia resolución del dispositivo, 0,10 MPa, no se puede determinar la FC y por tanto se hace necesario de otro dispositivo que, combinado con el WAM, permita la determinación de la AWC.

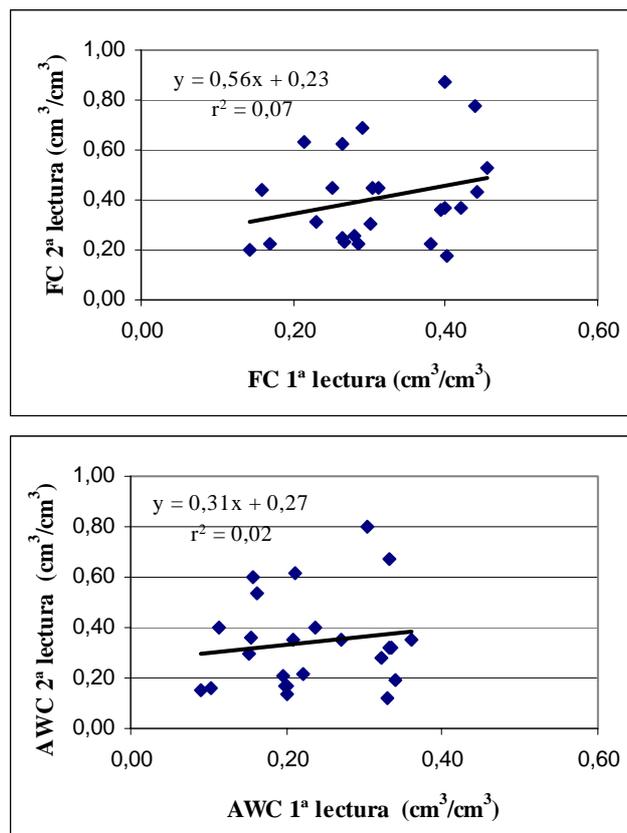


Figura VII.2. “Comparación de las dos lecturas realizadas para la determinación de la FC y la AWC”

En el capítulo IX se parte de estos ensayos previos y se toma como método de comparación del WAM, la placa de presión (*pressure plate*) (PP). La determinación de la FC y la AWC en capítulos posteriores, se realiza igualmente con esta metodología, o bien empleando metodología combinada WAM-PP, en función de los estudios realizados por Rodríguez (2004).

5. Referencias bibliográficas.

Campbell, G.S. 1985. Soil physics with basic. Developments in Soil Science. **14**. Elsevier. pp: 150.

Cancela, J.J. 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.

Rodríguez, A. 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Departamento de Ingeniería Agroforestal (EPS). Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.

III

INVESTIGACIÓN Y RESULTADOS

SECCIÓN

**DISEÑO, TÉCNICAS DE MEDIDA Y APLICACIONES
DE LOS PSICRÓMETROS DE TERMOPAR: REVISIÓN HISTÓRICA**

CAPÍTULO

CAPÍTULO VIII

DISEÑO, TÉCNICAS DE MEDIDA Y APLICACIONES DE LOS PSICRÓMETROS DE TERMOPAR: REVISIÓN HISTÓRICA

“La Ciencia, a pesar de sus progresos increíbles, no puede ni podrá nunca explicarlo todo. Cada vez ganará nuevas zonas a lo que hoy parece inexplicable. Pero las rayas fronterizas del saber, por muy lejos que se eleven, tendrán siempre delante un infinito mundo de misterio”
Gregorio Marañón (1887-1960). Médico y escritor español.

ÍNDICE

Resumen	161
1. Introducción.....	163
2. Psicrómetros de termopar	164
2.1. Definición.....	164
2.2. Clasificación de los psicrómetros. Rango de medida.....	166
2.2.1. Nonequilibrium.....	166
2.2.2. Dewpoint	168
2.2.3. Isopiestic.....	169
3. Técnicas de medida, componentes y accesorios.....	170
3.1. Principio de funcionamiento	170
3.1.1. Técnica psicrométrica.....	170
3.1.2. Técnica isopiestic	175
3.1.3. Técnica higrométrica	175
3.2. Materiales de construcción y diseños.....	176
3.3. Tipos de soldaduras utilizadas.....	183
3.4. Aparataje para la medición simultánea de varias muestras.....	183
3.5. Registro de salidas.....	184
4. Ajustes para la puesta en marcha.....	185
4.1. Limpieza y calibración	185
4.2. Tiempo de equilibrio	186
4.3. Factores que pueden introducir errores en las lecturas.....	187
4.4. Instalación en campo	188
5. Mediciones en material vegetal	188
5.1. Corrección de errores	191
5.2. Mediciones del potencial de agua en hojas	194
5.3. Determinación del potencial de agua en tallos, frutos, raíces y semillas	197
5.4. Valoración del potencial en el sistema suelo-planta-atmósfera	198
5.5. Medición continuada del potencial de agua	199
5.6. Medición del potencial osmótico	200
5.7. Comparación de metodologías en Psicrometría <i>per se</i>	201
5.8. Comparación de la Psicrometría con otras metodologías	204
5.9. Otros estudios.....	207
6. Mediciones realizadas en suelos.....	208
6.1. Medición separada de potenciales.....	210
6.2. Determinación de las causas de error producidas durante las mediciones.....	211
6.3. Medición del potencial de agua.....	214
6.4. Determinación de la conductividad hidráulica insaturada	217
6.5. Comparación de metodologías en Psicrometría <i>per se</i>	218
6.6. Comparación de la Psicrometría con otras metodologías	218
7. Conclusiones.....	220
8. Referencias bibliográficas	222

RESUMEN

La determinación del potencial de agua del suelo a fin de establecer pautas de riego en las prácticas de gerencia de las cosechas agrícolas requiere del uso de métodos diversos como es el caso de psicrómetros de termopar (*thermocouple psychrometers*) (TCPs) cuyo uso ha sido muy extendido. No obstante, se trata de una técnica complicada en cuanto a su entendimiento y manejo del aparataje demandado para ello, siendo, por tanto, necesario un conocimiento exhaustivo de los distintos aspectos que engloba y que en las publicaciones existentes no se ha tratado con suficiente profundidad. En este review sobre los TCPs desde su surgimiento en los años cincuenta, se recoge la distinta nomenclatura y clasificación de estos aparatos totalmente actualizada dado que esta es un tanto difusa y poco clara, abordando las técnicas de funcionamiento de los mismos para la medición del potencial. Dentro de estas son tres las existentes, psicrométrica, hidrométrica e isopiestic, quedando patente que esta última se relega a escasos estudios y aplicaciones puntuales. Se hace una descripción de la evolución de los distintos modelos y del aparataje empleado en las determinaciones tanto en campo como en laboratorio destacando los problemas encontrados en cada uno de ellos durante su utilización (gradientes y fluctuaciones de temperatura, tamaño y conservación de la muestra, obtención del tiempo de equilibrio, absorción de vapor en las paredes del compartimento, contaminación del instrumental...) y las mejoras que se han propuesto para solventarlos. Las aplicaciones de los TCPs realizadas en el ámbito de la agronomía se detallan tanto en campo como en laboratorio y en muestras tan dispares como material vegetal, suelos o frutos, entre otras. Se realiza una clasificación de los estudios en las aplicaciones y comparaciones con otros métodos de medición pudiendo estar estos basados en la Psicrometría o no. Dentro de estos últimos, son de destacar la placa de presión (*pressure plate*) (PP), el método del tinte (*dye method*), o la cámara de presión (*pressure chamber*), entre otros; permitiendo establecer las discrepancias encontradas entre los mismos y las posibles causas que las provocan. Con ello, se aporta una visión crítica sobre el tema y se proponen futuras líneas de investigación desde un punto práctico e investigador, cuyo interés radicaría en la evaluación de las distintas causas de error que se producen en los últimos modelos surgidos de TCPs y que por su reciente aparición no han sido todavía estudiados. De esta forma se establecen las pautas de trabajo a seguir en los capítulos posteriores de esta investigación.

1. Introducción.

Durante años una de las mayores preocupaciones de los agrónomos viene siendo el estudio de cómo las variaciones en el entorno del cultivo pueden afectar a su correcto desarrollo. Son diversos los factores a considerar, abarcando desde las condiciones climáticas, el suelo o la propia genética del vegetal, eso sin considerar los aspectos directamente dependientes del hombre como son la tecnología aplicada o la mano de obra. Todos estos factores deben convivir en perfecta armonía, consiguiendo que un recurso escaso y generalmente mal utilizado como es el agua, pueda ser empleado de forma racional asegurando su existencia y disponibilidad en un futuro próximo.

Las prácticas de gerencia del agua para las cosechas agrícolas requieren del conocimiento de las necesidades de agua de la planta (Hoffman y Splinter, 1968; Doorenbos y Pruitt, 1975) y la respuesta productiva a su aplicación, para conseguir utilizar racionalmente este recurso de manera más eficiente durante el riego. La determinación del potencial de agua en un suelo o en una planta es probablemente el índice más eficaz para valorar la disponibilidad de agua para los cultivos (Merril y Rawlins, 1972), siendo los psicrómetros de termopar (*thermocouple psychrometers*) (TCPs) una herramienta versátil y valiosa en las investigaciones referentes al sistema suelo-agua-planta (Zollinger *et al.*, 1966).

Desde comienzos de los años cincuenta, los TCPs se vienen utilizando para medir el estado del agua del suelo y de las plantas (McAneney *et al.*, 1979; Wiebe, 1984; Brown y Oosterhuis, 1992), permitiendo su determinación en diversas localizaciones dentro del sistema utilizando la misma técnica de medición (Hoffman y Splinter, 1968). Esta adaptabilidad de los TCPs frente a otras técnicas, conjuntamente con la aportación de una respuesta rápida y confiable, ha permitido estudiar y caracterizar el sistema o la resistencia de los cultivos al estrés hídrico, esto sin olvidar los distintos gradientes de potencial que se producen y como influyen estos en el desarrollo del cultivo. Todo ello se ha logrado mediante mediciones, continuadas o no, del potencial en localizaciones tan diversas como raíces, tallos/troncos, hojas, semillas o suelos.

El potencial de agua medido será considerado en este caso como la suma del potencial mátrico y el potencial osmótico (Hillel, 1998; Villar y Ferrer, 2005), de modo que los cambios producidos en la lectura del TCP pueden representar un cambio en cualquiera o en ambos de los citados componentes. También es posible que los cambios en uno de ellos queden enmascarados por los cambios en la dirección opuesta del otro componente (Campbell y Gardner, 1971). Por lo cual, para su correcto funcionamiento se deberán tener en cuenta una serie de precauciones que incluyen el conocimiento de la técnica, los tipos de TCPs y su idoneidad para los distintos usos y la calibración y limpieza apropiadas de estos instrumentos.

Diversos textos tratan sobre el tema (Barrs, 1968; Boyer, 1969; Brown y van Haveren, 1972; Brown y Oosterhuis, 1992; Savage y Cass, 1984b; Boyer, 1995; Mullins, 2001; Andraski y Scanlon, 2002; Scanlon *et al.*, 2002), en un intento de clarificar un sistema de medición tan complejo como el de la Psicrometría. Estos suelen tratar de aplicaciones concretas (Barrs, 1968, Boyer, 1969) y/o en unas condiciones determinadas (Savage y Cass, 1984b), existiendo una carencia de reviews actualizados que realicen una

revisión histórica de la Psicrometría profundizando en sus diversas vertientes y aplicaciones, dado que si bien inicialmente las investigaciones son encaminadas a la construcción del aparataje empleado y su posterior aplicación, en las últimas décadas se recurre a sensores comerciales, centrándose más en sus posibles aplicaciones.

Este capítulo aporta una visión global de los estudios e investigaciones realizados sobre la Psicrometría desde sus inicios, estableciendo unas bases claras sobre los fundamentos de las distintas técnicas de medición, recopilando la diversa denominación existente y actualizada de los distintos tipos de TCPs y realizando la correspondiente clasificación, incluyendo las distintas denominaciones. Asimismo, se detallan las investigaciones realizadas en su aplicación a la agronomía, de forma que todo ello permita clarificar un campo tan complejo y, por momentos, heterogéneamente definido. Con todo ello, se pretende contribuir al esbozo de las pautas futuras de uso de los TCPs para la determinación del estado del agua en el sistema, desde un punto de vista práctico e investigador. Considerando que el objetivo de esta investigación se fundamenta en el empleo de un tipo de TCP, es importante describir su ubicación y características frente a otros tipos de dispositivos en el ámbito de la Psicrometría, presentando las diferentes problemáticas presentes en su constitución y aplicación. De esta forma, este review establece las hipótesis iniciales de la investigación realizada en capítulos de esta memoria.

2. Psicrómetros de termopar.

2.1. Definición.

Los TCPs son instrumentos usados para determinar el estado energético del agua en tejidos de plantas y animales, suelos, nieve y otros medios (van Haverent y Brown, 1972), aplicándose incluso a microorganismos (Gardner *et al.*, 1972). No obstante, un tipo concreto de psicrómetros, se utiliza para la determinación de las condiciones de humedad en atmósferas abiertas como es el caso de cubiertas vegetales (Caldwell y Caldwell, 1970). Se trata de un método de lo más versátil, que permite la medición en cualquier medio/sustancia que contenga agua (Boyer, 1995).

Etimológicamente el término “*psicrómetro*” procede del griego, formado por la unión de *psychrós* (sufijo que significa frío) y *metrón* (que significa medida). Su utilización abarca conjuntamente tanto las lecturas basadas en técnicas psicrométricas (disminución de la temperatura del bulbo húmedo “*wet-bulb temperature depression*”³⁷), higrométricas (disminución de la temperatura del punto de condensación “*dew-point temperature depression*”) (Turner, 1981) como *isopiestic*, para determinar el potencial del agua, si bien la técnica psicrométrica se utiliza más frecuentemente (Andraski y Scanlon, 2002).

Inicialmente, se restringía el uso de esta técnica al laboratorio dado que era necesario un control preciso de la temperatura. Estos usos se han visto ampliados con la

³⁷ En el capítulo se hará referencia a la doble nomenclatura, la anglosajona, empleada a nivel internacional y la española, traducida literalmente por la autora siempre que sea posible, debido a la no existencia de traducciones previas.

aparición de diseños mejorados y el desarrollo de una instrumentalización electrónica aportando mediciones rápidas y no destructivas *in situ* del potencial de agua en el suelo y en cultivos (Packer, 1972; Xanthopoulos, 2002).

Con las primeras investigaciones sobre estas técnicas durante los años 50 surgen los primeros tipos de TCPs. Estos consisten en un par de uniones de termopar³⁸ situadas dentro de un compartimiento cerrado. Una de ellas se denomina “*unión medidora*” (*measuring junction*), “*unión sensitiva o sensora*” (*sensing junction*), “*unión libre*” (*free junction*) o “*unión mojada*” (*wet junction*), según autores, la cual, tal y como indica la última acepción, se encuentra mojada. La otra se denomina “*unión de referencia*” (*reference junction*), la cual se encuentra seca y a la temperatura del baño en el que se introducen los TCPs.

De forma genérica, como se muestra en la figura VIII.1, los TCPs utilizados habitualmente [salvo los medidores de actividad de agua “*water activity meters*” (WAMs)] consisten en una estructura principal a través de la cual pasan los alambres del plomo o plomos (*lead wires*) y en cuyo interior se encuentra un taco de Teflón y resina epoxi. El termopar consta de dos alambres (*wires*) de distinto material, unidos por uno de sus extremos, formando así la unión medidora. Estos alambres a su vez se unen por el extremo opuesto a los terminales de los plomos formando las uniones de referencia. Dichos termopares se localizan en la cabeza de detección, la cual suele estar protegida por una cubierta protectora comúnmente denominada “*cápsula*” (*cup*), y que permite la transferencia de vapor pero previene el contacto del material de la muestra con los termopares.

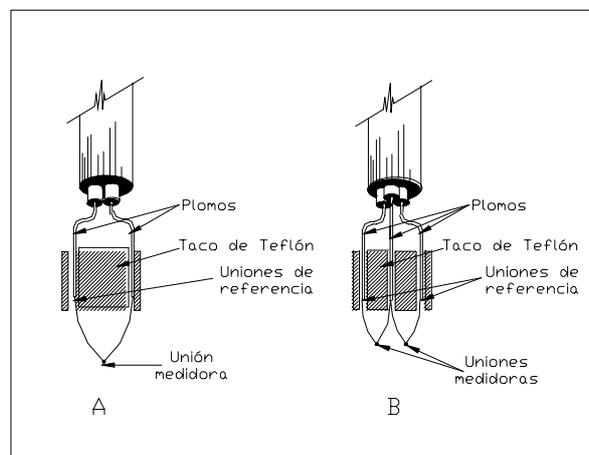


Figura VIII.1. “Elementos estructurales de TCPs “*simple junction*” (A) y “*double junction*” (B)”
(Adaptado de van Haveren y Brown, 1972)

Los alambres del termopar se pueden disponer formando un lazo (*simple loop*) o bien formando dos lazos (*double loop*) (Figura VIII.1). En el primer caso el TCP constará de una sola unión medidora (*simple junction*) y un termopar y el segundo constará de dos uniones medidoras (*double junction*) y dos termopares.

³⁸ Un *termopar* se realiza mediante la unión de dos metales distintos.

2.2. Clasificación de los psicrómetros. Rango de medida.

Mullins (2001) clasifica los TCPs en tres grandes grupos: *nonequilibrium*, *dewpoint* e *isopiestic*. La conveniencia del empleo de un tipo u otro de TCP, dentro de los modelos existentes, dependerá, entre otras cuestiones, de su rango de medida. Los límites superiores e inferiores de las mediciones se verán condicionados por el diseño del sensor, el protocolo empleado para su realización y la resolución del voltímetro, estableciéndose un límite superior sobre -0,03 a -0,2 MPa (Andraski y Scanlon, 2002), siendo el límite inferior variable dependiendo del tipo de sensor del que se trate.

2.2.1. Nonequilibrium.

Los primeros TCPs, considerados como tales³⁹, son los *nonequilibrium*, que engloban al de Richards y Ogata (1958) de tipo “*wet-loop*” y el “*tipo Peltier*” de Spanner (1951), si bien con anterioridad existieron termopares tipo “*wet loop*” que presentaban una buena sensibilidad pero con dificultades en su calibración y el mantenimiento de la muestra (Richards y Ogata, 1958). Los dos tipos de TCPs se denominan comúnmente como “*tipo Richards*” (*Richards type*) y “*tipo Spanner*” (*Spanner type*) respectivamente, aunque actualmente reciban también la denominación conjunta de “*Peltier psychrometers*” (Boyer, 1995) ó “*water potencial meter*” (Zou *et al.*, 2001).

Ambos consisten en un par de uniones de termopar situadas dentro de un compartimiento cerrado, siendo la principal diferencia entre ambos tipos la forma en que es aplicada el agua a la unión medidora. Dicha unión, para el tipo Richards, es mojada por una gotita de agua destilada (Bingham *et al.*, 1972), aproximadamente 3-5 μl (Boyer, 1969), introducida mecánicamente y situada en un anillo de plata soldado a ella o en una cuenta de cerámica (*ceramic bead*), mientras que para el tipo Spanner, es mojada refrescándola por debajo del punto de condensación por el principio termoeléctrico basado en el efecto Peltier antes de cada medida (Andraski y Scanlon, 2002) (Figura VIII.2). Esto provoca que en ocasiones al tipo Richards se le denomine “*psicrómetro de anillo*” (*ring psychrometer*) (Boyer, 1972a; Stevens y Acock, 1976).

La consecución de un funcionamiento correcto en los TCPs tipo Spanner resulta más laboriosa (Gounot y Monteny, 1967), requiriendo de un cierto tiempo para que se produzca el equilibrio entre la temperatura y la presión de vapor del agua⁴⁰ presente en el aire y el potencial de la muestra. Mediante el efecto Peltier se altera el equilibrio inicial de temperatura y la concentración de vapor de agua por un pequeño periodo de tiempo de enfriamiento de la unión medidora, produciéndose como resultado la condensación de una pequeña cantidad de agua. La temperatura de la unión se mide durante la evaporación de dicha agua, después de que haya dejado de producirse la corriente de enfriamiento, y se

³⁹ Es importante destacar que el término TCP empleado como tal se recoge anteriormente en trabajos de Powell (1936) haciendo mención a estudios previos, no obstante su uso se reducía a características ambientales no conducentes a un interés agronómico.

⁴⁰ El equilibrio de la presión de vapor se alcanza cuando la presión de vapor dentro de la cabeza de detección está en equilibrio dinámico con el de la muestra bajo las condiciones isotérmicas establecidas (Brown y Oosterhuis, 1992).

relaciona el índice de evaporación⁴¹ y la disminución de la temperatura con la humedad de la cámara o con el potencial (Lopushinsky, 1990). Entre lecturas húmedas, cuando la unión se encuentra seca, el sensor podrá ser utilizado para comparar la temperatura del bulbo seco dentro del compartimiento con la del baño en el que se introducen (Barrs, 1964). En este caso el termopar se posiciona dentro de la cámara de la muestra (Turner, 1981).

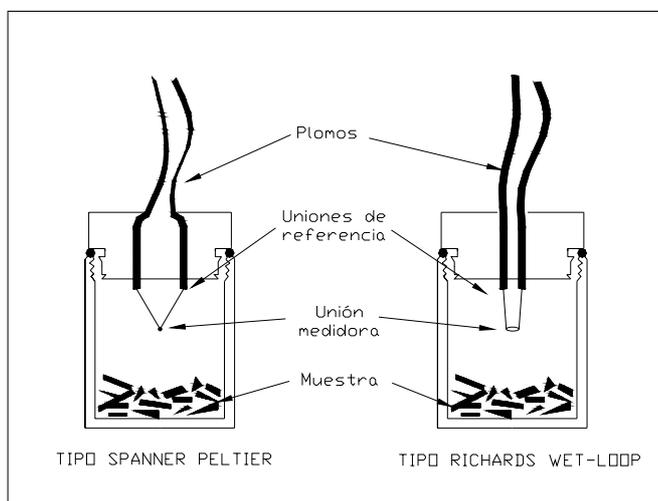


Figura VIII.2. “Comparación del TCP de Spanner frente al de Richards y Ogata”
(Adaptado de Lopushinsky, 1990)

Por el contrario, el TCP tipo Richards mide la evaporación producida en un “estado constante” durante la evaporación de una gotita introducida en la proximidad de la muestra (Peck, 1968). Inicialmente fue concebido únicamente para medir el agua en muestras de suelo, pero se adoptó enseguida para la medición del potencial en plantas. Su funcionamiento consiste en poner una gota de agua en el anillo de plata o en un lazo de alambre (*wire loop*) (Turner, 1981) situado en la unión medidora y tomar las lecturas del voltaje cuando el índice de evaporación de la gotita de agua alcanza un valor constante indicado por la disminución constante de la temperatura del termopar (Lopushinsky, 1990). En este caso no es posible observar temperaturas del bulbo seco dentro del compartimiento debido a que la unión se encuentra permanentemente mojada (Barrs, 1964).

Cuando estos dos tipos de TCPs son utilizados para medir la presión relativa de vapor en un pequeño volumen de aire en equilibrio con la muestra, puede producirse una modificación de la presión de vapor a causa de la adicción o extracción de vapor de agua. En efecto, la condensación de agua sobre el termopar por el efecto Peltier provoca la disminución de la presión de vapor de la atmósfera en la proximidad del termopar, lo que tiende a dar una fuerza electro motriz (f.e.m.) más elevada en el tipo Spanner. En cuanto al tipo Richards, la gotita de agua colocada en la unión del termopar es una fuente suplementaria para el sistema, aportando una f.e.m. inferior a la que realmente existe

⁴¹ Índice de evaporación es la velocidad a la que un líquido pasa a estado de gas a una temperatura y presión dadas. De acuerdo al índice de evaporación, el termopar aporta un voltaje eléctrico y dado que la salida es pequeña, esta deberá ser amplificada antes de que pueda ser enviada al voltímetro (dispositivo de lectura de salida) (Boyer, 1995).

(Gounot y Monteny, 1967). Así, con ambas técnicas el equilibrio entre la presión de vapor con la muestra se ve alterado, aportando lecturas más secas el tipo Spanner y más húmedas el tipo Richards (Campbell y Wilson, 1972). Para muestras de suelos muy húmedas no existe diferencia entre ambos tipos, pero cuanto más secas estén, más se percibe la misma. Por el contrario en muestras vegetales encontraron que los valores de potencial hídrico son comparables entre ambos (Gounot y Monteny, 1967), mientras que Shackel (1984) observó que tales valores dependían en todo caso de la resistencia del tejido al intercambio del vapor y gradientes de temperatura en el interior del psicrómetro.

El sensor tipo Richards se utiliza solamente con la técnica psicrométrica de medida, mientras que el de Spanner de tipo Peltier se puede utilizar con técnicas de medida tanto psicrométrica como higrométrica (Andraski y Scanlon, 2002). De los dos, solamente el tipo Spanner se puede utilizar en campo.

Su límite más bajo de aplicación se encuentra en los TCPs tipo Richards en -300 MPa y en el tipo Spanner en -8 MPa. Esta diferencia la explican Andraski y Scanlon (2002) basándose en que en los de tipo Richards el tamaño de gota más grande puesta en la unión medidora aporta lecturas más estables durante más tiempo después de dicha aplicación. Es por ello que Mullins (2001) recoge el rango de medida para el tipo Richards de 0 a -300 MPa ($\pm 5-10\%$) y para el tipo Spanner de 0 a -7 MPa ($\pm 5-10\%$), si bien estos límites son un tanto difusos, discrepándose en ocasiones respecto a la amplitud de los mismos, tal es el caso de Gee *et al.* (1992) que limita el rango de medida para el tipo Richards de 0 a -200 MPa y para el tipo Spanner de -0,2 a -8 MPa.

2.2.2. Dewpoint.

Los TCPs *dewpoint* se basan en la técnica higrométrica, la cual es introducida por Neumann y Thurtell (1972). Este tipo de TCPs engloba dos subtipos: los “*higrómetros*”, que en estructura son similares a otros TCPs pero se denominan así por su modo de operación (Mullins, 2001) y los “*medidores de actividad de agua*” (*water activity meters*) (WAMs) cuyo funcionamiento y elementos constitutivos difieren de los TCPs en general.

Los higrómetros detectan la disminución de la temperatura del punto de condensación del vapor de agua en el interior del compartimento de la muestra y por lo tanto el título⁴², en contraste con los TCPs *nonequilibrium*, los cuales responden a la temperatura del bulbo húmedo. Por otro lado, su utilización no requiere del empleo de un baño con temperatura controlada resultando ser instrumentos relativamente insensibles a factores como el tamaño y la forma de la superficie mojada en la unión, las cuales afectan al índice de intercambio de vapor (Neumann y Thurtell, 1972).

En ellos la muestra se mantiene en un envase aislado térmicamente con un termopar que se mantiene en el punto de condensación. Esta es la temperatura a la cual el vapor comienza a condensar en la unión del termopar y se relaciona con el potencial del agua de

⁴² El título de un vapor representa la fracción de vapor saturado que existe en una masa unitaria de líquido y vapor saturado.

la muestra. La temperatura en la unión de detección es controlada mediante un dispositivo electrónico.

Sin embargo son sensores que aún siendo sensibles a los gradientes de temperatura, lo son mucho menos que los TCPs *nonequilibrium*, de modo que no requieren una corrección de la misma (Livingston, 1993). En cualquier caso, se caracterizan por tener requisitos de manejo sencillos, no obstante, en alguno de los modelos (*electrolytic-resistance hygrometers*) no se recomienda su uso en muestras donde la humedad sea superior al 99% debido a los problemas respecto al excesivo tiempo de respuesta y la carencia de aportación de lecturas reproducibles (Richards y Decker, 1963). Su rango de aplicación se encuentra comprendido de 0 a -40 MPa ($\pm 0,10$ MPa) (Mullins, 2001).

Gee *et al.* (1992), Scanlon *et al.* (1997), Mullins (2001), Scanlon *et al.* (2002), Petry y Jiang (2003), Cancela (2004), Perfect *et al.* (2004) y Rodríguez (2004), entre otros, describen y aplican un reciente progreso en la instrumentación *dewpoint* utilizada para la medición del potencial. Se trata de los WAM, también denominados "potenciómetros de punto de rocío" (*Dewpoint PotentiaMeter*) (Villar y Ferrer, 2005), basados en la "chilled mirror dewpoint technique" (Leong *et al.*, 2003). Por ello, que también se denominen "chilled-mirror hygrometers" (Izbicki *et al.*, 2002). Esta técnica implica equilibrar la muestra del suelo húmedo con el vapor de agua del aire que se encuentra en el interior del compartimiento sellado. Cuando se alcanza el equilibrio, un fotodetector unido a un espejo enfriado cuya temperatura es controlada por el enfriamiento Peltier, detecta cuando comienza la condensación en el mismo mediante un cambio en la reflexión de dicho espejo. En la técnica se asume que las sales disueltas en el suelo son insignificantes respecto a las fuerzas mátricas, de modo que se puede calcular el potencial mediante la ecuación de Kelvin (Ec. VIII.2), tardando teóricamente aproximadamente 5 minutos en aportar una lectura. Scanlon *et al.* (1997) establecieron su rango de medida en un intervalo de 0 a -312 MPa. No obstante, la obtención de valores próximos a 0 MPa se ve limitada por la propia precisión de los dispositivos y a la relación temperatura-humedad relativa.

Por su especial modo de funcionamiento, en las clasificaciones existentes no siempre son incluidos como un subtipo de los TCPs *dewpoint*, llegándose a considerar como un instrumento independiente a los TCPs de antaño (Villar y Ferrer, 2005). Debido al auge alcanzado por este tipo de dispositivos, recientemente Campbell *et al.* (2007), han intentado describir su utilización para la determinación de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC), no obstante se limitan al análisis del modo de funcionamiento de los mismos y la forma de preparación de las muestras, sin profundizar en criterios a considerar de mayor envergadura.

2.2.3. Isopiestic.

El tercer tipo de TCPs existente son los *isopiestic*, en principio similares a los *dewpoint* (Baughn y Tanner, 1976a). Funcionan poniendo una solución de potencial conocido en un anillo que contiene la unión del termopar, incluido todo ello en un envase aislado térmicamente sobre la muestra. Si dicha unión está a una temperatura diferente a la que están sometidos los metales en su unión con otro metal, como los terminales del voltímetro, se genera un pequeño potencial que puede ser relacionado con la diferencia de

temperatura. Cualquier situación en la que el agua se evapore o se condense será interpretada por el TCP como una diferencia de temperatura. Si todo ello se realiza con soluciones de potencial conocido que estén cerca del de la muestra, se puede determinar el potencial de una solución que daría la misma lectura que un termopar seco, el cual será igual al potencial de la muestra (Mullins, 2001).

Se trata de un tipo de sensores modificación del tipo Richards (Boyer, 1972b; 1972c), cuya aplicación no ha sido tan difundida reduciendo su aplicación a material vegetal (Boyer, 1966; Knipling y Kramer, 1967; Boyer, 1967; Boyer, 1972c; Boyer y Potter, 1973; Nelsen *et al.*, 1978; Cavaliere y Boyer, 1982; Gollan *et al.*, 1985; Turner *et al.*, 1984a). Su rango de utilización comprende de 0 a -40 MPa (± 10 kPa) (Mullins, 2001). Una descripción de los mismos es recogida por Boyer (1995).

Independientemente del tipo de TCP utilizado, debido al coste y a las dificultades de instalar los sensores en campo, generalmente se obtiene la información del potencial del agua en base a medidas llevadas a cabo en laboratorio, en donde destacan los WAM (Scanlon *et al.*, 1997), contemplando además el hecho de que los TCPs de laboratorio generalmente funcionan mejor que los de campo (Jones *et al.*, 1990).

3. Técnicas de medida, componentes y accesorios.

3.1. Principio de funcionamiento.

De forma genérica, los TCPs trabajan en un amplio rango de contenidos de agua y dado que miden en condiciones de fase gaseosa, no requiere de una fase líquida continua para las determinaciones, siendo el único requerimiento que el agua sea capaz de evaporarse desde la muestra al aire (Boyer, 1985).

3.1.1. Técnica psicrométrica.

Tanto la técnica psicrométrica como la higrométrica se basan en el mismo principio de funcionamiento, utilizando para ello termopares. Cuando entre las dos uniones implicadas en el proceso (medidora y de referencia) existe una diferencia de temperatura, una corriente eléctrica fluirá entre ellas en una dirección tal que tenderá a equilibrar dicha diferencia. Éste fenómeno se conoce con el nombre de “*efecto Seebeck*”. Por otro lado, si ambas uniones se encuentran a la misma temperatura inicialmente, debido al paso de la corriente eléctrica a su través, se producirá el calentamiento de una de ellas, mientras que la otra se enfriará, lo cual se trata del llamado “*efecto Peltier*”⁴³. La dirección en la que fluye la corriente determinará qué unión se encuentra a mayor temperatura y cual a menor (Barrs, 1968) (Figura VIII.3).

⁴³ La liberación de calor en la “*unión medidora*” del termopar del TCP durante el flujo de corriente se conoce como “*Efecto Peltier*” y mientras esto sucede la unión de referencia del termopar absorbe la misma cantidad de energía térmica, que es el “*Calentamiento de Joule*”. Por lo tanto la temperatura de las uniones de referencia será estable e isotérmica, solamente la unión medidora se alterará durante el efecto Peltier (Brown y Oosterhuis, 1992).

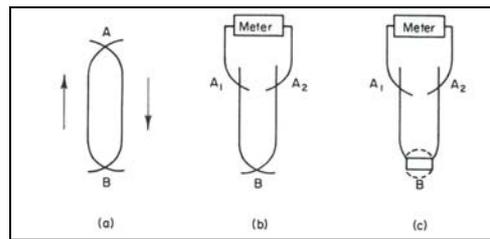


Figura VIII.3. "Efectos termoeléctricos producidos en un TCP"⁴⁴ (Barrs, 1968)

Al condensar el agua alrededor de la unión medidora por el efecto Peltier, después de un tiempo fijado en 15-60 segundos, el agua se evapora dentro de la atmósfera alrededor de la muestra, lo cual provoca que se refresque la unión medidora en función de la presión de vapor en equilibrio en el compartimiento. El grado de enfriamiento es función del índice de evaporación, de modo que a altos índices de evaporación (baja presión de vapor y potencial) se produce el máximo enfriamiento y el mínimo se produce a bajos índices de evaporación (alta presión de vapor y potencial). Cuando disminuye la temperatura de la unión medidora por debajo de la de la unión de referencia, se altera el equilibrio isotérmico entre los termopares del TCP, de modo que la diferencia de temperatura es lo que permitirá determinar el potencial (Brown y Oosterhuis, 1992).

Una vez concluye la condensación, se determina el voltaje que corresponde a la temperatura del bulbo húmedo, pero a veces esta determinación es un tanto subjetiva. A potenciales altos, o si el tiempo requerido para el enfriamiento ha sido largo, se determina fácilmente, pero si la muestra se encuentra demasiado seca o con tiempos de condensación cortos su determinación puede resultar inexacta y complicada (Savage y Wiebe, 1987).

Los medios para estimar la magnitud del periodo de enfriamiento adecuado fueron mostrados por Peck (1969). Para que la medida sea exacta es importante que la atmósfera de la cámara sea perturbada lo menos posible, es decir que se condense el mínimo rocío sobre el alambre. Cuando se produce la condensación existe una desecación local de la atmósfera y entonces la evaporación es más rápida, siendo la f.e.m. observada más elevada que la efectiva (Campbell *et al.*, 1966). Por el contrario si el rocío es muy poco abundante, se corre el peligro de que se evapore antes de ser registrado el cambio, obteniendo entonces un valor inferior al verdadero (Gounot y Monteny, 1967).

La f.e.m. del TCP es por tanto una medida de la disminución de temperatura en la unión medidora, expresada en la ecuación VIII.1 según Rawlins (1966):

$$E = \alpha\theta \quad \text{(VIII.1)}$$

siendo:

⁴⁴ a) El efecto Seebeck, ocurre cuando una corriente circula entre dos uniones distintas A y B. b) Medición de la diferencia de temperatura entre A y B. B puede inicialmente estar enfriado por el efecto Peltier (TCP tipo Spanner). c) Mantenimiento permanente de la unión mojada en B (TCP tipo Richards) (Barrs, 1968).

E : fuerza electromotriz (μV).

α : energía termoeléctrica del termopar ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

θ : disminución de temperatura de la unión medidora ($^\circ\text{C}$).

Los TCPs detectan la humedad relativa (HR) del vapor en equilibrio con la fase líquida en suelos y plantas (Zollinger *et al.*, 1966; Mullins, 2001), por lo que es necesario encontrar la relación existente entre la disminución de temperatura de la unión medidora y, por lo tanto, la f.e.m. con la HR del aire en equilibrio con la muestra.

Sería Rawlins (1966) quien partiendo de la premisa de que el compartimiento del TCP es cilíndrico, con radio " r_c " y altura " $2r_c$ " y con la unión medidora situada en el centro del mismo, describió las ecuaciones para la salida del TCP en función de la temperatura, la presión y la geometría.

El potencial del agua (Ψ) se relaciona con la HR (P/P_o) por la ecuación VIII.2 propuesta por Kelvin (Richards, B.G., 1965; Rawlins, 1972; Zanstra y Hagenzieker, 1977; Turner, 1981; Joly, 1985) asumiendo en ella que el vapor de agua se comporta como un gas ideal:

$$\Psi = \text{energía/volumen} = \left(\frac{R \cdot T}{M}\right) \cdot \ln\left(\frac{P}{P_o}\right) \quad (\text{VIII.2})$$

siendo:

Ψ : Potencial del agua (suma de potencial mátrico y osmótico) (MPa)

R : Constante de los gases ideales ($8,314 \cdot 10^{-6}$ MJ/molK).

M : Peso molecular del agua ($1,8 \cdot 10^{-5}$ m³/mol).

T : Temperatura de la fase líquida (K).

P : Presión de vapor en equilibrio con la fase líquida (MPa).

P_o : Presión de vapor saturado de la fase líquida (MPa) a la temperatura T .

La ecuación ha presentado diferentes variantes, recogidas por Durner y Or (2005).

Dentro del rango de potenciales de agua que se encuentran comúnmente en suelos agrícolas, se puede aproximar que: $\ln(P/P_o) = (P/P_o - 1)$. Por ello, la ecuación (VIII.2) expresada en JKg^{-1} , queda (Rawlins y Campbell, 1986):

$$\Psi = 461 \cdot T \cdot \left(\frac{P}{P_o} - 1\right) \quad (\text{VIII.3})$$

En 1966 Rawlins desarrolla la "teoría del estado constante" (*steady state theory*) que será crucial para posteriores investigaciones y que aporta una mayor comprensión del funcionamiento de los TCPs del tipo Richard, no estando justificado su uso en otro tipo de TCPs. Sería Peck (1968) quien estudiaría el caso concreto de los TCPs tipo Spanner, demostrando que la teoría propuesta con anterioridad por Rawlins puede aplicarse también

a este tipo de TCP con ligeras modificaciones. A fin de obtener la máxima sensibilidad de aparato y para la validez de la teoría, requiere que el calentamiento del compartimiento del TCP debido al efecto Peltier sea insignificante. Sugiere, asimismo, el empleo de “uniones masivas” (*massive junctions*) (referidas a las uniones de referencia), recomendando que estas tengan un volumen de 1 cm^3 de cobre, lo cual aumenta la sensibilidad del aparato y podría explicar algunos resultados anómalos de Rawlins (1966) debidos a la subida de temperatura en la unión de referencia ya que no era suficientemente “masiva”.

La teoría desarrollada por ambos será denominada con posterioridad por Rawlins y Campbell (1986) como la “teoría del calor básico y el transporte de masa” (*basic heat and mass transport theory*). Su desarrollo permitió realizar diseños que incrementaron la sensibilidad y redujeron la dependencia de los cambios producidos en las condiciones ambientales.

Tanto Rawlins (1966) como Peck (1968), recogen la forma en que se produce un cambio en el tamaño de la unión medidora al producirse la evaporación o la condensación de agua en la misma, si bien consideran que dicha variación no causa un efecto relevante en el intercambio del vapor de agua.

Durante la primera parte de la condensación se produce una película fina sobre la soldadura y una pequeña parte de los alambres. Mientras que la película incrementa su espesor, las diferencias de presión dentro de la misma ocasionan que se produzca una redistribución del agua. La forma en que se produce la misma puede variar, recogiendo Peck (1968) cuatro casos: ángulo de contacto entre la soldadura y los alambres menor de 90° , ángulo de contacto comprendido entre 90 y 180° , contacto con la soldadura menor de 90° y con los alambres mayor de 90° . Las formas resultantes pueden observarse en la figura VIII.4, en la cual se muestra la forma de la gotita de agua después de un periodo de condensación o al principio de la evaporación.

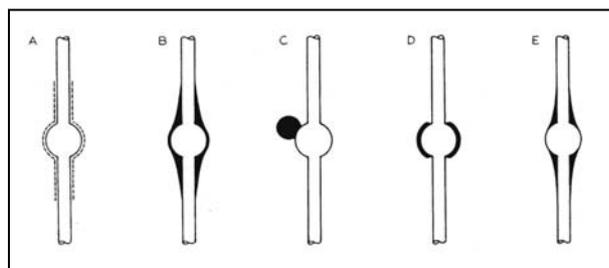


Figura VIII. 4. “Disposición del agua condensada en los alambres y en la unión del termopar”⁴⁵ (Peck, 1968)

⁴⁵ A) Estado inicial de condensación.
B) Contacto con ángulos de menos de 90° .
C) Contacto con ángulos comprendidos entre 90° y 180° .
D) Contacto en el alambre con ángulo mayor de 90° y en la unión menor de 90° .
E) Contacto con ángulo menor de 90° después de la evaporación (Peck, 1968).

Estudios realizados por Wiebe (1984) sobre la condensación de agua en las uniones del termopar debido al efecto Peltier, mediante su observación directa al microscopio concretaron las conclusiones de Peck (1968), observando que a los pocos segundos de producirse la corriente por el citado efecto empezaban a condensarse las gotitas, que con posterioridad se unirían formando gotas de mayor tamaño hasta alcanzar un diámetro seis veces superior al de la unión. En la localización final de la gota formada, se concluyó que más que influir la gravedad, lo que resultaba decisivo era la superficie de la unión y los alambres que la constituyen, dado que en cada TCP en condensaciones sucesivas, se situaban las gotitas siempre en el mismo lugar. El tamaño constante de la gota finalmente formada indicó que la condensación que se produce en la unión era equilibrada por la evaporación de la gota y que el calor extraído durante el enfriamiento es compensado por la entrada de calor hacia la unión por conducción del aire y por radiación a partir de las paredes del compartimiento (ambos efectos aumentan al incrementarse el tamaño de la gota). En este estudio no se observó con precisión la formación de una película de agua sobre la unión por efecto de la condensación, tal y como con anterioridad afirmara Peck (1968), produciéndose en este caso una cubrición de la unión por gotitas espaciadas.

Posteriormente, Scotter (1972) realiza una ampliación de la teoría propuesta por Rawlins (1966) y Peck (1968), para la obtención de las constantes de calibración del TCP, de la masa de agua condensada en la unión medidora del termopar y del tiempo necesario para la evaporación de dicha agua. Hace especial hincapié en la disipación de calor que se produce en las uniones de referencia (o uniones masivas “*massive junctions*”) que con anterioridad se trató someramente, no cumpliéndose en la realidad el volumen recomendado por Peck (1968) para las mismas.

De esta forma, cuando la corriente de Peltier pasa a través del TCP extrae calor de la unión medidora, se produce un calentamiento en magnitud similar en las uniones restantes. Se asume que las uniones de referencia permanecen a temperatura constante, por lo que cualquier cambio que se produzca en la misma provoca errores en las lecturas realizadas en dichas condiciones. El calor que se produce en cada unión vendrá dado por la ecuación VIII.4:

$$h = P_i / J \quad (\text{VIII.4})$$

siendo:

h : Producción de calor en cada unión de referencia por el efecto Peltier (cal/s).

P_i : Coeficiente de Peltier para la unión “ i ” en función del material.

J : Equivalente mecánico de calor (4,2 J/cal).

Dada la importancia del efecto Peltier, Dalton y Rawlins (1968) desarrollaron ecuaciones que gobernaban las corrientes óptimas de enfriamiento en TCPs que se basasen en dicho efecto, de modo que presentaron un método simple mediante el cual se pudiese determinar el coeficiente de transmisión de calor. El método descrito permitió obtener el coeficiente de transferencia de calor en alambres finos en aire húmedo, en los cuales son necesarias pequeñas corrientes de enfriamiento.

3.1.2. Técnica isopiestic.

En 1966 Boyer aplica la “*técnica isopiestic*”, la cual posteriormente describe más ampliamente (Boyer, 1972a; 1972b) aplicándola a plantas (Boyer, 1972c). Dicha técnica consiste básicamente en encontrar una solución que no gane ni pierda agua de la muestra. En la medición se realizan dos determinaciones consecutivas, la primera con agua en el termopar que se inserta en el compartimiento de muestras del TCP y otra con una solución de sacarosa en un segundo termopar. El potencial de la solución estará próximo al potencial de la muestra analizada. El potencial de salida del TCP se traza en función del agua o de la solución y se extrapola a la salida de cero, de modo que el potencial a cero se corresponde con el potencial absoluto de agua de la muestra.

La técnica *isopiestic* es ventajosa porque es insensible a la geometría del compartimiento (Boyer, 1972b), a la resistencia a la difusión en tejidos finos de plantas o a la calibración del termopar. Asimismo, la técnica tiene la misma exactitud a altos potenciales como a potenciales bajos de agua estando su utilización solamente limitada a la gama de los potenciales de soluciones que están disponibles (Boyer, 1972a), si bien se trata de una técnica incómoda y que no se presta bien a una posible automatización (Zanstra y Hagenzieker, 1977).

3.1.3. Técnica higrométrica.

Existe un tercer modo de operación (Livingston, 1993), el “*modo Dewpoint*” o “*modo del punto de condensación*” en el cual se basan los higrómetros. Por ello que se suele denominar como “*técnica higrométrica*”.

En este caso el enfriamiento Peltier es usado para condensar una gotita de agua en la unión medidora, sin embargo la corriente de enfriamiento es ajustada continuamente de modo que no exista aumento neto o pérdida de vapor de agua, es decir, la unión medidora sometida a la temperatura del punto de condensación ni pierde agua con la evaporación ni gana agua con la condensación. En condiciones no saturadas, la temperatura del punto de condensación estará por debajo de la del ambiente, y esta diferencia de temperatura podrá ser medida como una diferencia de voltaje entre las uniones de referencia y medidora cuando no está fluyendo ninguna corriente. Además, puesto que no existe movimiento neto del agua de la unión del termopar al compartimiento en el punto de condensación, la señal es estable durante largo tiempo y el equilibrio de vapor en el compartimiento no es alterado, solventando así el problema relativo a que la unión del termopar no sea independiente de los mecanismos de transferencia térmica que existen en ambientes distintos a los teóricos (Campbell *et al.*, 1973).

Esta técnica se podría considerar en principio similar a la técnica *isopiestic*, dado que ambas ajustan la presión del vapor de la gotita en la unión medidora hasta que está en equilibrio con el vapor dentro del compartimiento. Sin embargo, en la técnica *dewpoint*, la presión del vapor es regulada controlando la temperatura de la gotita mientras que en la técnica *isopiestic*, la presión de vapor en la gotita es ajustada por el cambio de su potencial osmótico. Ambos métodos están exentos de los errores que con frecuencia se presentan en

determinaciones psicrométricas normales debidos al intercambio neto del vapor que ocurre en la gotita (Neumann y Thurtell, 1972).

No obstante, en un análisis de los errores en la medición con la técnica higrométrica y la psicrométrica, Savage *et al.* (1983a) demostraron que a bajas temperaturas, la técnica higrométrica tiene a menudo poca ventaja sobre la técnica psicrométrica en términos de la magnitud del error que se produce.

Independientemente de la técnica utilizada, para la realización de las mediciones el instrumento se introducirá dentro de la muestra o se incluirá dentro de un compartimiento que contenga la muestra a medir. En el caso de que se utilicen en el laboratorio, el instrumento y el compartimiento que contiene la muestra se sumergen en un baño con agua a fin de mantener las condiciones isotérmicas en función del tipo de TCP de que se trate y en caso de que el modelo así lo requiera (Brown y Oosterhuis, 1992). Existen distintos modelos de baños para tal fin, tal es el caso de los descritos por Kijne y Taylor (1963), Richards, L.A. (1965), Boyer (1972b) ó Koorevaar y Janse (1972).

3.2. Materiales de construcción y diseños.

Los materiales empleados en la construcción de los TCPs, independientemente de su tipología, afectan en gran medida a sus propiedades y funcionamiento. Teniendo esto en cuenta, durante todos los años que se ha investigado en el campo de la Psicrometría un tema realmente controvertido es la elección del TCP empleado en los mismos y/o el diseño y la elección de los materiales de cara a su construcción, de modo que el sensor resultante sea versátil para distintos estudios o bien resuelva problemas planteados en investigaciones anteriores. Este hecho provocó que, en más de 50 años de investigación, las distintas partes que componen los sensores se hayan fabricado de muy diferentes materiales (Tabla VIII.1).

Así, el elemento más significativo de un TCP, el termopar, se ha realizado con diversos materiales: bismuto y bismuto-5% estaño (Spanner, 1951), karma y cromo-constatan (Millar *et al.* 1970), cobre-constatan (Wiebe y Brown, 1979) o cromo P-constatan (Richards y Ogata, 1958; Lambert y van Schilfgaarde, 1965; Rawlins y Dalton, 1967; Hoffmann y Splinter, 1968; Wiebe *et al.*, 1970). Diversos metales se emplearon también en los plomos, siendo los más empleados el cobre (Richards y Ogata, 1958; Lang y Trickett, 1965; Hsieh y Hungate, 1970; Campbell y Campbell, 1974; Wiebe y Brown, 1979) o las combinaciones cobre-constatan (Brown, 1976) o cromo-constatan (Brunini y Thurtell, 1982). Los diámetros de los alambres que constituyen el termopar suelen ser de 25 μm , mientras que en los plomos suele ser más variable. Propiedades de los diferentes metales empleados comúnmente son recogidas por Spanner (1951).

En general estos elementos se encuentran en parte dentro de una estructura en cuyo interior de suele disponer un taco de Teflón que sirve de soporte para la resina epoxi que rodea los plomos (Rawlins y Dalton, 1967; Wiebe *et al.*, 1970). La estructura externa se realiza con un tubo acrílico (Rawlins y Dalton, 1967) o fenólico (Ingvalson *et al.*, 1970), Teflón (Hoffman y Splinter, 1968); o bien con metales como acero inoxidable (Brown, 1976), aluminio (Brown y McDonough, 1977), latón cromado (Michel, 1977) o cobre (McAneney *et al.*, 1979; Brunini y Thurtell, 1982).

Uno de los extremos de esta estructura termina en la denominada “cápsula”. En los distintos modelos que se han propuesto, el tipo de cápsula utilizada adquiere gran relevancia, dando incluso el nombre al propio diseño: “*screen-covered thermocouple psychrometer*” (Brown y Johnston, 1976), “*screen caged thermocouple psychrometer*” (Oosterhuis, 1987), “*end-window screen psychrometer*” (Wiebe *et al.*, 1977; Wullschlegel *et al.*, 1988) o “*ceramic cup psychrometer*” (Ficus, 1972). Inicialmente eran de material cerámico, si bien en el transcurso de los años se optó por la incorporación de nuevos materiales para la construcción de las mismas. Brown y Collins (1980) propusieron una cápsula metálica con el fin de evitar que se produzca la absorción de sales por la cerámica en suelos salinos. El material empleado en las cápsulas previamente ya había preocupado a Brown (1970), comparando dos tipos de cápsulas distintas y analizando la influencia del material de construcción sobre el índice de intercambio del vapor de agua entre la masa del suelo y la cavidad interna del TCP. Las cápsulas cerámicas ofrecieron mayor resistencia al intercambio de vapor que las cápsulas de “pantalla fina” (*fine screen cups*).

Brown y Johnston (1976) estudiaron el caso de los “*screen-covered thermocouple psychrometers*” analizando la influencia que tenía el ataque de los microorganismos y la suciedad de la cubierta sobre la sensibilidad del sensor, dado que se señalara previamente la posibilidad de ensuciamiento de las mismas (Kramer, 1972) y la mejor conveniencia del material cerámico para evitar el ataque de hongos (Merrill y Rawlins, 1972) durante su uso prolongado en campo. Pese a las ventajas que dicha cápsula aporta (consecución del equilibrio más rápidamente (Brown, 1970), fácil limpieza y eliminación de los posibles efectos de la acumulación de iones) concluyeron que el ataque por roedores y el posible ensuciamiento no es muy importante, si bien para disposiciones *in situ* a largo plazo consideran más recomendables las cápsulas cerámicas.

Otra parte implicada en el proceso de medición es el compartimento del TCP, en donde se alcanza el equilibrio entre el vapor de agua de la muestra y el del recinto. En este equilibrio el potencial de la muestra se relaciona con la humedad del aire en el compartimento y de ahí que la absorción de agua por las paredes de dicho compartimento puede conllevar consecuencias no deseadas. De esta forma el tiempo que se tarda en alcanzar el equilibrio puede alargarse o bien que dicho equilibrio no se llegue a obtener en su totalidad debido a la porosidad del material empleado en su construcción (Dixon y Grace, 1982). Además, hay que considerar que la salida del TCP es una función de la presión relativa del vapor del material en el compartimento y, por supuesto, de los parámetros de diseño (Mohsin y Ghildyal, 1972). Ante este hecho, las características en cuanto a material y geometría que se pueden considerar deseables son: un diseño ventilado que permita la inmersión en un baño de agua, que todos los componentes alcancen la temperatura de equilibrio rápidamente y que sea lo más pequeño posible a fin de reducir el tiempo de equilibrio de la presión de vapor en su interior (Mohsin y Ghildyal, 1972). Esta preocupación se presenta desde las primeras investigaciones, de tal forma que Lambert y van Schilfgaarde (1965) propusieron distintos tipos de materiales para la construcción del compartimento para las muestras y determinaron que el latón y el cobre dentro de los materiales opacos y el Teflón puro dentro de los translúcidos son los más convenientes. Más actualmente, Shepherd (1973) y Dixon y Grace (1982), profundizaron hondamente en el tema encaminando sus investigaciones exclusivamente al estudio de los materiales de construcción de modo que dejó de considerarse un interés colateral. Shepherd (1973) realizó tests de absorción sobre distintos materiales empleados en los diseños de cámaras y

estableció como materiales muy absorbentes el neopreno, caucho natural y artificial, siendo los más recomendados el cristal, cobre, acero inoxidable y níquel, es decir, materiales, estos últimos, metálicos. Del mismo modo, obtuvo valores intermedios de absorción en cromo, latón limpio y deslustrado. Por su parte Dixon y Grace (1982) no secundaron totalmente las conclusiones de Shepherd (1973), suponiendo que sus valores de absorción son excesivamente altos. Por ello propusieron como materiales totalmente inadecuados los de superficie rugosa así como los materiales plásticos y de goma, el cobre amarillo y el latón deslustrado, mientras que aconsejan los materiales metálicos, los contrachapados y el PTFE (politetrafluoretileno), encontrando, sin embargo, escasa reproducibilidad en los resultados del aluminio.

Tabla VIII. 1. "Materiales de construcción de los TCPs"

Referencias	Tipo de TCP	Método (*)	Especies-suelo utilizado	Material de los alambres	Diámetros de los alambres
Richards y Ogata (1958)	Richards (1)	P	S/P	Cromo P-constatan	25 µm
Richards y Ogata (1961) Klute y Richards (1962)	Richards (1)	P	S	Cromo P-constatan	25 µm
Ehlig (1962)	Richards (1)	P	P	Cromo P-constatan	25 µm
Lang y Trickett (1965)	Spanner/Richards	P	----	Cromo P-constatan	25 µm
Campbell et al. (1966)	Scanner (1) /Richards (1)	P	S/P	Cromo P-constatan	26 µm
Rawlins y Dalton (1967)	Spanner (1)	H	S	Cromo P-constatan	25 µm
Hoffman y Splinter (1968)	Dewpoint (1)	H	S/P	Cromo P-constatan	25,4 µm
Rawlins et al. (1968)	Dewpoint (1)	H	S/P	Cromo P-constatan	25 µm
Oster et al. (1969) Ingvalson et al. (1970)	Dewpoint (1)	H	S	Cromo P-constatan	25 µm
Hsieh y Hungate (1970)	Peltier (2)	P	P	Cromo P-constatan	25 µm
Wiebe et al. (1970)	Dewpoint (1)	H	T/S	Cromo P-constatan	25 µm
Millar et al. (1970)	Peltier	P	P	Karma/Cromo-constatan	57/25 µm
Boyer (1972b)	Isopiestic	I	P	Cromo-Constatan	102 µm
Merrill y Rawlins (1972)	Dewpoint (1)	H	S	Cromo P-constatan	25 µm
Hoffman y Rawlins (1972)	Spanner (1)	P	P	Cromo-constatan	25 µm
Moore y Caldwell (1972)	Spanner (1)	----	S	Cromo-constatan	25 µm
Calisendorff y Gardner (1972)	Peltier	----	P	Cromo-constatan	25 µm
Hsieh et al. (1972)	Peltier (2)	----	P	Cromo P-constatan	25 µm
Neumann y Thurtell (1972)	Dewpoint (2)(1)	H	P	Cromo-constatan	25,4 µm
Ficus (1972)	Dewpoint (1)	H	S/P	Cromo P-constatan	25 µm
Meyn y White (1972)	Spanner (1)	----	----	Cromo-constatan	25 µm
Chow y de Vries (1973)	Spanner (2)	P	P/S	Cromo-constatan	25 µm

(Continúa)

1: simple junction; 2: double junction; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; I: Isopiestic; S: Suelo; P: Planta; T: árbol; () Método de medición.*

Tabla VIII.1. (Continúa)

Referencias	Tipo de TCP	Método (*)	Especies-suelo utilizado	Material de los alambres	Diámetros de los alambres
Campbell y Campbell (1974)	Dewpoint (1)	H	P	Cromo-constatan	25 µm
Baughn y Tanner (1976b)	Dewpoint	H	P	Cromo-constatan	25,4 µm
Brown (1976)	Peltier (2)	----	P	Cromo-constatan	25 µm
Brown y Johnston (1976)	2	----	S	Cromo-constatan	25 µm
Zanstra y Hagenzieker (1977)	Spanner (1)	----	P	Cromo-constatan	25 µm
Michel (1977)	Dewpoint (1)	----	P	Cromo-constatan	25 µm
McAneney <i>et al.</i> (1979)	Dewpoint	----	S	Cromo P-constatan	25,4 µm
Brown y Collins (1980)	1	P??	S/P	Cromo-constatan	25 µm
Brunini y Thurtell (1982)	Dewpoint	---	S	Cromo-constatan	25,4 µm

1: simple junction; 2: double junction; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; I: Isopiestic; S: Suelo; P: Planta; T: árbol; () Método de medición.*

Con todo, las versiones originales de los TCPs primitivos, se han modificado, de cara a mejorar su exactitud y reducir la sensibilidad a los cambios de temperatura o para que resultasen adaptables a los distintos usos. De esta forma al tipo Richards se le mejoró el sellado y se redujo el tamaño del compartimento de la muestra (Ehlig, 1962; Richards y Ogata, 1961) y el de los alambres (Campbell *et al.*, 1966; Klute y Richards, 1962). El TCP tipo Spanner también vio modificado el material de los alambres iniciales, sustituyendo el bismuto y bismuto-5% estaño por cromo P-constatan (Lang y Trickett, 1965; Campbell *et al.*, 1966).

Posteriormente, Rawlins y Dalton (1967) construyeron y probaron un TCP *in situ*, que les permitió demostrar que con un diseño conveniente era posible reducir la necesidad del control de la temperatura exacta y abrió una puerta al uso de los TCPs para la medición en campo de potenciales de agua. Se trataba de un higrómetro con la cápsula esférica de cerámica diseñado con el termopar situado exactamente en el centro de la misma. De esta forma la transferencia de calor desde la superficie esférica de la muestra mantiene a la unión medidora a la misma temperatura media de la muestra. Tal ha sido su relevancia que fue utilizado por Hoffman y Splinter (1968), centrando la unión medidora en un compartimento oblongo pequeño realizado externamente al cuerpo de Teflón y obteniendo una geometría idéntica tanto para la calibración como para las mediciones; por Wiebe *et al.* (1970), reduciendo su tamaño y empleando una cápsula cerámica y por Ingvalson *et al.* (1970) combinándolo con un sensor de salinidad. A su vez el sensor de Wiebe *et al.* (1970) fue utilizado por Ficus (1972) y Scotter (1972) y el de Ingvalson *et al.* (1970) por Merrill y Rawlins (1972) sin el sensor de salinidad en el interior del bulbo de cerámica.

Tanto el diseño propuesto por Rawlins y Dalton (1967), como la posterior modificación realizada por Wiebe *et al.* (1970), permitieron solventar la necesidad que se plantea respecto a que la muestra y el compartimento que contiene la misma se encuentren a la misma temperatura de cara a obtener resultados no erróneos en los potenciales. En

ambos casos se sugirió que se insertase el sensor en las muestras de suelo (Rawlins y Dalton, 1967) y de troncos (Wiebe *et al.*, 1970), no siendo posible llevarla a cabo en tejido finos como era el caso de hojas. Para solventarlo, Hoffman y Rawlins (1972) describieron en sus trabajos un TCP del tipo “*silver-foil*”. Diseñado este modelo inicialmente para la medición de potenciales en hojas, Zanstra y Hagenzieker (1977) hicieron referencia a su uso en suelos. Campbell y Campbell (1974) describieron un higrómetro cuya sujeción y posterior liberación de la hoja se ve facilitada, solucionando así uno de los problemas planteados con el diseño de Hoffman y Rawlins (1972). Se trata de un higrómetro de aluminio de manejo y construcción más fácil que el de Neumann y Thurtell (1972).

En la década de los sesenta, uno de los principales problemas que se planteaban con los TCPs propuestos son los derivados de un nivel de señal muy bajo lo cual requería la amplificación de la misma (Barrs, 1972). Como alternativa para solventarlo, Richards, B.G. (1965) o Kitchen y Thames (1972), entre otros, propusieron sustituir el termopar por un termistor⁴⁶. De la misma forma, ante la necesidad de no alterar o destruir las muestras al medirlas, Lambert y van Schilfgaarde (1965) propusieron un “*psicrómetro de punta de prueba*” (*psychrometer probe*).

Simultáneamente a la realización de estos estudios, Millar *et al.* (1970) diseñaron y construyeron un TCP en miniatura con cuatro terminales (*miniature four-terminal thermocouple psychrometer*). Dicho aparato se caracterizaba por su estabilidad termal mejorada en condiciones noisotermas. Consiguieron mejorar el aislamiento termal usando cuatro terminales (frente a los dos que habitualmente se venían utilizando en los TCPs de tipo Peltier), de modo que las uniones de referencia no son calentadas mientras que la corriente de Peltier refresca, no siendo por tanto necesarios disipadores de calor, como era el caso del diseño de Rawlins y Dalton (1967). La importancia de los disipadores de calor es tratada por Bingham *et al.* (1972). El diseño propuesto por Millar *et al.* (1970) lo emplearían con la técnica higrométrica Neumann y Thurtell (1972), mientras que Campbell y Campbell (1974) utilizarían uno similar al propuesto por estos últimos. Asimismo con esta técnica Campbell *et al.* (1973) desarrollarían un higrómetro mejorado.

Con la misma finalidad, es decir, de cara a compensar los posibles cambios de temperatura, Hsieh y Hungate (1970) propusieron un TCP de tipo Spanner con doble unión y compensación de temperatura⁴⁷, de modo que permitía conectar los termopares con polaridad opuesta permitiendo cancelar automáticamente cualquier corriente extraña debido a la fluctuación de la temperatura ambiente. Este diseño posteriormente lo emplearon Hsieh *et al.* (1972) y Daniel (1982). Otro diseño con esta particularidad fue propuesto por Calissendorff y Gardner (1972) permitiendo la medición *in situ*, constituido por una unión medidora y de referencia del mismo tamaño y localizadas en el mismo

⁴⁶ Un termistor en ocasiones es preferible respecto a un termopar como sensor de temperatura dado que posee una mayor respuesta a la misma que otros transductores. Su uso está especialmente recomendado en ambientes corrosivos, habiéndose desarrollado muchos tipos de TCPs utilizando estos elementos (Kitchen y Thames, 1972).

⁴⁷ Un TCP con compensación de temperatura permite realizar mediciones cuando la temperatura es relativamente estable, mejorando la exactitud de la medición cuando la temperatura varía bruscamente (Hsieh *et al.*, 1972).

ambiente de intercambio de calor dentro del compartimento del TCP en contacto con la muestra.

No obstante, la alteración del número de terminales y de uniones implicadas en el proceso fue frecuente. Así, Chow y de Vries (1973), describieron un tipo de TCP de termopar “*double loop*” totalmente novedoso constituido por tres terminales con una estabilidad 40 veces superior al de dos terminales. El uso del “*single loop*”, como es el caso del de tipo Spanner, estaba muy limitado hasta el momento en las mediciones *in situ* del potencial al existir una gran dependencia de estos de los gradientes de temperatura (van Haveren y Brown, 1972), debido fundamentalmente a que las uniones de referencia y medidora no se encontraban en el mismo ambiente termal (Rawlins y Dalton, 1967) y sí en contacto termal con el cobre de los plomos (Wiebe *et al.*, 1970). Otro inconveniente provenía del calentamiento de las uniones de referencia durante la fase de enfriamiento, si bien este último problema fue eliminado con el uso de disipadores de calor (Dalton y Rawlins, 1968). Además, no servían para medir la temperatura ambiente al no tener ambas uniones la misma temperatura, por ser la f.e.m. generada por la unión de referencia igual pero de signo contrario a la unión medidora y debido a que los plomos están realizados ambos del mismo metal (van Haveren y Brown, 1972). El TCP “*double loop*” de tres terminales se demostró que tenía una estabilidad termal superior al del TCP de dos terminales. Neumann y Thurtell (1972) consideraron la construcción de estos últimos más dificultosa, no encontrando muy ventajosa su utilización en estudios precedentes y sugiriendo por tanto el empleo de un termopar de cuatro terminales. Por el contrario Wiebe *et al.* (1977) consideraron que los *double loop* supusieron una superación del efecto de los gradientes de temperatura con el llamado voltaje “*zero offset*”⁴⁸. Este voltaje, como efecto de los gradientes de temperatura, fue tratado en el review de Savage y Cass (1984b).

En 1979 se produce una modificación del modelo propuesto por Chow y de Vries (1973) llevada a cabo por McAneney *et al.* (1979) describiendo un higrómetro *in situ* en el que la unión medidora tiene cuatro terminales, con una estructura realizada en cobre para reducir los gradientes termales a través del mismo. Posteriormente, Brunini y Thurtell (1982) diseñaron y evaluaron un higrómetro con cuatro terminales, el cual aportó una respuesta rápida y no presentó tantos problemas como el mencionado por McAneney *et al.* (1979) frente a la difusión de sales siendo en este caso el tiempo de equilibrio necesario inferior a 2 horas frente a las 23 horas que necesitaban ellos en sus estudios. La característica principal de diseño fue reducir al mínimo la diferencia de temperatura entre la superficie que se evapora (superficie interior de la membrana) y las uniones de referencia para obtener mediciones confiables.

Para minimizar los efectos de la temperatura, realizando mediciones en zonas no superficiales del suelo Scotter (1972) propuso un TCP cuya principal característica de diseño era que la unión de referencia tenía un diámetro 7,5 veces mayor que los alambres del termopar. Esta era la principal diferencia frente al empleado por Rawlins (1966) en el que la relación era de 3 veces mayor.

⁴⁸ Si la muestra está a diferente temperatura de las paredes del compartimento, existirá una diferencia de temperatura entre las uniones medidoras y de referencia. Esta diferencia es medible por el voltaje a través de los plomos cuando la unión está seca. A este voltaje se le denomina “*voltaje zero offset*” (Michel, 1979).

Uno de los efectos de los gradientes de temperatura es que pueden ocasionar la condensación en el interior del sensor. Para solventarlo Campbell (1979) propuso construir simétricamente los TCPs con respecto a las ventanas porosas (*porous windows*) donde ocurre el intercambio de humedad con el suelo, de forma que se reducen los errores provocados por estos gradientes (*zero offset*) a la mitad de los modelos anteriores.

En determinadas ocasiones se buscaron instrumentos para un uso determinado, el cual le suele dar el nombre al mismo sensor. Con aplicaciones a hojas se tiene el caso de Brown (1976) o Brown y McDonough (1977), que propusieron un sensor “*double-junction*” modificación del propuesto por Campbell y Campbell (1974), entre otros. Con aplicación a tallos Michel (1977) propuso un “*stem thermocouple hygrometer*” en el que la unión se encuentra desprotegida aportando una mayor simplicidad y una respuesta más rápida o Dixon y Tyree (1984) que emplearon un “*simple stem hygrometer*” constituido por dos uniones medidoras, una se disponía en contacto con la muestra y la otra en contacto con el aire del compartimento.

Profundizando en la problemática, McBurney y Costigan (1987) sugirieron incorporarle una camisa al TCP *dewpoint* que empleaban en sus estudios sobre tallos, dando lugar al denominado “*water-jacketed stem-attached psychrometer*”, que conseguía evitar la diferencia de temperatura entre la muestra y el sensor.

Otro tipo de sensor son los TCPs “*screen-caged*”. Los originales (Brown, 1970) presentaban el problema de que eran difíciles de calibrar y no aportaban mediciones de la temperatura ambiente, de modo que se requería de unos sensores que resultasen más confiables de cara a su aplicación a muestras de plantas y/o de suelos. Por el contrario se trataba de sensores de fácil limpieza y que permitían evitar la acumulación de iones. Ante esta situación Brown y Johnston (1976) describieron un TCP “*screen-caged*” de dos uniones y posteriormente Brown y Collins (1980) detallaron el procedimiento de diseño y construcción de un nuevo tipo de TCP “*screen-caged*” de una sola unión, que permitió reducir al mínimo los errores debidos a la entrada de contaminantes en la cavidad del TCP, logrando un rápido equilibrio del vapor entre la muestra y el TCP y proporcionando una superficie concéntrica evaporativa de 360° que redujo la influencia de la condensación del vapor debido a los gradientes de temperatura.

Pero sin duda, uno de los mayores logros en diseño y resultados dentro de los *dewpoint*, se obtuvo con el WAM, Gee *et al.* (1992) lo describen como un medidor que utiliza un espejo enfriado para la medición del punto de condensación del vapor de agua sobre una pequeña muestra, estando su uso restringido al laboratorio y a potenciales secos inferiores a -1MPa (Flint *et al.*, 2002).

Aunque en la actualidad no es frecuente encontrar publicaciones que recojan el surgimiento de nuevos tipos de TCP, Marin *et al.* (2001) propuso un modelo de TCP empleando termopares de cobre-constantan y posteriormente Skierucha (2005) propuso un TCP para medición de potencial en suelos, basado en componentes electrónicos y trabajando en el modo psicrométrico, resultando teóricamente tanto sencillo en manejo como en construcción.

3.3. Tipos de soldaduras utilizadas.

El termopar es el elemento más delicado en la construcción y, en general, anomalías de intensidad observadas en el momento de las mediciones provienen del hecho de que las soldaduras del termopar estén mal realizadas debido a que los metales sueldan mal, o a que la soldadura no forma una superficie lisa y maciza uniendo ambos metales dado que se ha fundido parcialmente (Gounot y Monteny, 1967). Campbell *et al.* (1968) describieron una técnica de soldadura para la formación de los termopares totalmente novedosa en aquellos años. Previamente, existían dos tipos de soldaduras, la realizada a mano (Campbell *et al.*, 1966) y las comercialmente disponibles soldadas con autógena (Rawlins, 1966), si bien ninguno de los dos tipos resultaba enteramente satisfactorio. Rawlins (1966) demostró teóricamente que en los TCPs de tipo Richards, la sensibilidad de los mismos depende del tamaño de la unión mojada del termopar, de modo que esta disminuye rápidamente con la disminución del radio mojado. Aunque la teoría no se aplicaba directamente a los TCPs tipo Peltier, sugería que la sensibilidad mayor de las uniones soldadas a mano frente a las comerciales pudiera deberse a que tienen mayor tamaño de soldadura. Ante esta consideración, Campbell *et al.* (1968) describieron una técnica de soldadura con autógena de alambres finos de termopares con un arco en miniatura (*technique for welding fine-wire thermocouples with an arc welder*) que permitió obtener una soldadura de igual tamaño que la realizada a mano y que era repetible, obteniendo una sensibilidad y estabilidad excelentes. Procedimientos de soldadura con autógena en termopares de alambres finos fueron también descritos por Weckler (1963), aplicado en este caso a alambres de platino y Gelb *et al.* (1964) en psicrómetros de punta de prueba (*thermocouples probe*). Asimismo, Lopushinsky (1972) describió una guía mejorada para la soldadura de termopares que llevan una cuenta (tipo Richards), resultando ser un método rápido que producía cuentas de tamaño uniforme sin necesidad de torcer una parte del alambre, obteniendo así el mejor funcionamiento del mismo.

3.4. Aparataje para la medición simultánea de varias muestras.

Al realizar las mediciones del potencial en campo e incluso en laboratorio, el tiempo invertido es una limitación de cara a maximizar el proceso. Se han desarrollado varios frentes de investigación de cara a solventar este problema.

Una primera aproximación fue realizada por Campbell *et al.* (1966), proponiendo dos modelos de cargadores para múltiples muestras y comparándolos entre sí. Uno de ellos denominado “*shadow sample changer*”, más simple en diseño y construcción que el denominado “*deep sample changer*”. Este último modelo tenía la ventaja de posibilitar la alineación de las paredes del compartimiento con los de la muestra, lo cual evitaba que quedase superficie libre en la que se pudiera absorber vapor, permitiendo que las lecturas fuesen independientes de la geometría del compartimiento al ser idénticas las trayectorias del flujo de vapor y calor (Rawlins, 1966), no siendo necesario, por tanto, ser tan exhaustivos en la limpieza para prevenir núcleos de condensación de agua. Por contra, tenía la desventaja de tener que abrir los compartimentos durante el tiempo necesario para cambiar la muestra, pero este hecho no provocó ningún error detectable. Zollinger *et al.* (1966) utilizaron en sus estudios este segundo diseño de modo que no se alterasen las muestras durante las lecturas y se minimizase el tiempo necesario durante el proceso.

Años más tarde, Gounot y Monteny (1967) analizaron las dos propuestas anteriores encontrando que la propuesta de Campbell *et al.* (1966) resultaba simple de manejar pero las cámaras eran de pequeño tamaño y convenía utilizar solamente tejidos seccionados con ayuda de un sacabocados. Por otro lado, el aparato descrito por Zollinger *et al.* (1966) lo encontraron más complejo. Combinando las ventajas de estos dos aparatos propusieron uno constituido por 10 cámaras. Se trataba de un sistema rotativo que permitió un control permanente de la fiabilidad de la respuesta del termopar, simplemente introduciendo en una de las cámaras un papel de fieltro con una solución de presión osmótica conocida.

Wiebe (1981) llegó más allá precisando en sus estudios de un cargador que permitiese el control remoto de la sustitución de la muestra por agua en el compartimento de la muestra y que aportase una temperatura uniforme en el compartimento y en la muestra. Inicialmente se planteó que el modelo propuesto por Campbell *et al.* (1966) le resultaba perfectamente válido utilizándolo de forma combinada con un baño a temperatura constante. Pese a ello, optó por utilizar un cargador disponible comercialmente dado que la alta conductividad termal del compartimento de aluminio del bloque rodeado por el aislamiento reducía al mínimo los gradientes de temperatura durante las lecturas y evitaba la necesidad del baño anteriormente mencionado.

3.5. Registro de salidas.

Ante la posibilidad de realizar la lectura de varias muestras a la vez surge parejamente la necesidad de registrar los datos obtenidos en todas las lecturas realizadas. Esto adquiere una especial relevancia a la hora de realizar seguimientos de sensores *in situ* cuando estos son numerosos.

Hoffman *et al.* (1969) presentaron una solución al problema, describiendo un sistema automático construido para registrar la salida de TCPs basados en el efecto Peltier, consistente en un scanner, condensadores, voltímetro y un registrador. El sistema leía y registraba la f.e.m. inicial, refrescaba seis TCPs simultáneamente, registraba la f.e.m. final y calentaba automáticamente la unión medidora de los TCPs. De esta forma se pudieron leer hasta 150 TCPs en una hora, obteniéndose resultados bajo condiciones experimentales y utilizando este sistema automático medidas tan exactas como las realizadas manualmente, lo cual solventó el problema de la realización de lecturas a horas intempestivas. Este aparato supuso una mejoría importante respecto al propuesto cuatro años antes por Lang y Trickett (1965) constituido por un scanner, un amplificador, un voltímetro máximo y un registrador de múltiples puntos del potenciómetro. En este caso solamente se podían leer 12 TCPs durante un ciclo completo del aparato, porque solamente se podía refrescar un TCP a la vez, con lo que el proceso llevaba bastante tiempo.

Schimmelpfennig (1972) describe un sistema portátil para las lecturas de las salidas de TCPs, el cual automáticamente enfría la unión medidora durante un tiempo determinado. Se trata de un aparato versátil, adaptado a distintos tipos de TCPs, con dos, tres o cuatro terminales. Asimismo, Hoffman *et al.* (1972) propusieron un sistema de lectura automática constituido por un scanner, circuito de enfriamiento, capacitores, microvoltímetro y sistema de grabación de datos, de modo que se pudieron leer seis TCPs basados en el efecto Peltier al mismo tiempo, mientras que Stevens y Acock (1976)

emplearon un TCP que leía e imprimía automáticamente la salida de 100 compartimentos con termopares tipo Richards (*wet and dry ring thermocouples*).

En cualquier caso, no todos los sistemas para la recogida de datos presentan la misma complejidad, caso de Meeuwig (1972) proponiendo un sistema portátil al mínimo coste.

4. Ajustes para la puesta en marcha.

4.1. Limpieza y calibración.

Los TCPs son extremadamente útiles de cara a medir el potencial de agua en los distintos tipos de muestras, siempre y cuando se tomen las precauciones apropiadas, considerando de importancia la realización de una calibración y limpieza adecuada de los mismos. La frecuencia con la que los TCPs necesitan ser limpiados o calibrados dependerá de cómo se utilicen.

Se requiere de un proceso de limpieza y secado muy meticuloso de cara al correcto funcionamiento del aparato. Los TCPs utilizados *in situ* deberán limpiarse con copiosa agua destilada, secados a una temperatura de 70° C de 2 a 4 horas y posteriormente se deberán guardar en bolsas de plástico selladas para evitar la posible contaminación por polvo u otras sustancias. Si son sensores nuevos, antes de ser usados por primera vez se les someterá al citado proceso, el cual se repetirá después de cada uso. Si se trata de TCPs de laboratorio, estos suelen venir provistos de soluciones adecuadas para la realización de la limpieza y el mantenimiento de los mismos, especialmente indicadas por el fabricante. La importancia de una limpieza adecuada es tratada por Campbell (1972) y Boyer (1995), entre otros.

Cada TCP es único y por ello requiere de una calibración determinada. De que esta se realice de la forma correcta dependerá la fiabilidad de los datos obtenidos. El procedimiento de calibración no es algo frecuentemente estudiado en la literatura existente, y en particular el efecto de los diferentes ambientes termales sobre la f.e.m., lo cual necesitaba ser clarificado. No sería hasta 1972 cuando Meyn y White intentaron clarificar la relación existente entre el potencial de agua, la temperatura y la f.e.m. psicrométrica para TCPs de suelos calibrados tanto en laboratorio como *in situ*.

Durante el proceso se deberán reproducir lo más exactamente posible las condiciones que existirán durante las mediciones reales y el protocolo empleado durante la misma deberá ser constante (Andraski y Scanlon, 2002).

Los TCPs *dewpoint* funcionan cerca del equilibrio, pero deben ser calibrados con una serie de soluciones cuyo potencial sea conocido (Mullins, 2001), siendo los TCPs *isopiestic* los únicos que no requieren calibración. Durante el proceso de calibración deberá tenerse en cuenta que el proceso es sensible a la temperatura ambiente. Así, bajas temperaturas aportarán una salida en el TCP inferior que temperaturas más cálidas. Para obtener mejores resultados deberá repetirse la calibración inmediatamente antes y después de cada lectura de la muestra (Boyer, 1995).

La calibración de los TCPs de laboratorio se logra mediante soluciones de cloruro potásico (KCl) o cloruro sódico (NaCl), situándolas en el mismo lugar que ocupará la muestra y determinando su lectura, lo que permitirá establecer una relación entre el potencial de la solución y la salida que se obtiene.

En el caso de los TCPs utilizados *in situ*, se empapa un disco o una tira de papel de filtro de modo que quede totalmente saturado y se sitúa en el centro del compartimiento de la muestra. Deberá tenerse especial cuidado con que dicho papel no toque el TCP (Brown y Oosterhuis, 1992). Estas calibraciones deberán realizarse en un baño de agua bien controlado, pues el control de la temperatura durante el proceso es crítico (Livingston, 1993).

Esto se realiza para distintas concentraciones y se obtiene así una “*curva de calibración*”. Si los potenciales van a ser medidos a distintas temperaturas, las curvas de calibración deberán realizarse a diversas temperaturas que cubran la gama prevista.

Los TCPs de campo con cápsulas de cerámica se pueden sumergir directamente en el frasco que contenga la solución de calibración, pero dado que dicha solución debe tener temperatura constante, se recomienda sumergir el aparato en un baño con temperatura controlada. Se debe asegurar que la cerámica está en equilibrio con la solución antes de registrarse la lectura y posteriormente deberán ser lavados con agua destilada durante un largo tiempo (Rawlins y Campbell, 1986).

Estudios de Thakur *et al.* (2006) y Cardoso *et al.* (2007) cuestionan la idoneidad de la calibración propuesta en algún tipo de estos dispositivos.

4.2. Tiempo de equilibrio.

Resulta esencial que el tiempo de equilibrio de vapor entre la muestra y el aire que la rodea sea el adecuado, siendo, por tanto, un aspecto crítico en lo que a obtención de resultados fiables se refiere. Cuando este no es suficiente, el potencial medido resultará ser demasiado seco (Brown y Oosterhuis, 1992). Por ello, potenciales más altos (menos negativos) requieren de más tiempo para alcanzarlo que potenciales más bajos (más negativos), en los que el equilibrio se alcanza más rápidamente.

En material vegetal el tiempo necesario para la obtención del equilibrio de la presión de vapor entre el material vegetal y el medio ambiente del recinto, varía controlando el estado de hidratación del tejido. Su obtención será tanto más rápida cuanto más pequeño sea el déficit hídrico (Gounot y Monteny, 1967). En cualquier caso, depende de la resistencia a la difusión del vapor de agua, lo cual es una limitación en hojas con superficies cerosas (Joly, 1985).

Si bien hay que considerar que los tiempos de equilibrio demasiado largos no son deseables en muestras de hojas dado que permiten que se produzcan cambios en el tejido analizado, siendo por ello recomendable reducir lo máximo posible el tiempo de equilibrio (Peck, 1969). Para acortar el mismo, Lamber y van Schilfgaarde (1965) propusieron

iluminar la muestra vegetal con luz fluorescente de baja intensidad de cara a mantener los estomas de la planta abiertos y así acelerar el equilibrio.

4.3. Factores que pueden introducir errores en las lecturas.

Cualquier modificación del diseño ideal o de las condiciones ambientales ideales puede causar cambios significativos en la sensibilidad del TCP, pero no siempre estos tienen por que conducir a un error sistemático en las mediciones (Rawlins, 1972).

Los errores que se presentan al emplear TCPs para medir el potencial tanto en material vegetal como en suelos han sido detallados en los estudios realizados por los distintos investigadores, dada la profusa frecuencia con la que estos aparecen. Estos errores se producen por las causas que se recogen en la tabla VIII.2.

Tabla VIII.2. "Principales causas de error en el uso de TCPs"

Causa	Descripción	Referencias
<i>Gradientes de temperatura</i>	Conducción de calor a lo largo de los alambres de termopar y la radiación	Monteith, 1954
	No existencia de gradientes de temperatura durante la calibración	Savage y Cass, 1984a Mullins, 2001
	Gradientes de temperatura propiamente	Wiebe <i>et al.</i> , 1977 Wiebe y Brown, 1979 Shackel, 1984
<i>Alteraciones en la muestra</i>	Cambios de estructura, biológicos, químicos y del contenido de agua durante el proceso de lectura	Klute y Richards, 1962
<i>Fisiología de la muestra</i>	Dificultad de alcanzar un correcto intercambio de vapor entre el tejido interno de la hojas y el aire circundante	Cutícula más epidermis (Ehlig, 1962) A los estomas (Savage <i>et al.</i> , 1983b) Resistencia a la difusión de vapor en la hoja (Zanstra y Hagenzieker; 1977; Shackel, 1984)
<i>Gradientes de agua y solutos</i>	Gradientes a lo largo del cilindro que contiene la muestra	Klute y Richards, 1962
<i>Variaciones de temperatura</i>	---	Rawlins y Dalton, 1967 Savage <i>et al.</i> , 1983a
<i>Voltaje zero offset</i>	Diferencia de temperatura entre la muestra y las paredes del compartimiento	Campbell <i>et al.</i> , 1973 Michel, 1979
<i>Geometría de la muestra</i>	Ratio área superficial de corte/ volumen de muestra	Walker <i>et al.</i> , 1984
<i>Contaminación</i>	De la unión medidora o de las paredes del compartimiento	Mullins, 2001
<i>Calor de respiración en muestras vegetales</i>	---	Barrs, 1964 Boyer, 1967
<i>Absorción de agua por los compartimentos</i>	---	Neumann y Thurtell, 1972 Bennett y Cortes, 1985

(Continúa)

Tabla VIII.2. (Continúa)

Causa	Descripción	Referencias
<i>Dependencia de las condiciones externas</i>	El flujo de calor, el cambio diario de la sensibilidad del aparato y el equilibrio entre el agua del suelo y el agua en el material cerámico de los TCPs empleados	Merrill y Rawlins, 1972
<i>Influencia del vapor de agua</i>	La dependencia entre la disminución de la temperatura del bulbo húmedo y la permeabilidad de la hoja al vapor de agua, así como al potencial en el interior de la misma	Rawlins, 1964
	Si se producen modificaciones de la temperatura o de la presión de vapor entre la muestra y la atmósfera debido al hecho de que los TCPs midan la HR	Rawlins, 1966

Un análisis de algunos de los errores posibles es tratado por Boyer (1995).

4.4. Instalación en campo.

La instalación de los sensores *in situ* debe reproducir las condiciones y procedimientos empleados durante la calibración.

Para reducir al mínimo los gradientes de temperatura, los TCPs se deben instalar con el eje del sensor paralelo a la superficie del terreno. Se debe tomar especial precaución si los sensores se colocan cerca de la superficie del suelo donde los gradientes de temperatura son mayores (Livingston, 1993). McAneney *et al.* (1979) al probar el sensor que diseñaron ratificaron la conveniencia de situar los TCPs horizontalmente en aquellas zonas del suelo donde se prevean gradientes termales fuertes, tal como con anterioridad sugirieran Merrill y Rawlins (1972).

Las mediciones a profundidades superiores a 15-30 cm no se deberán realizar con TCPs en campo y en cualquiera de los casos su colocación en el suelo deberá realizarse procurando alterar el medio lo menos posible (Livingston, 1993).

En material vegetal, se situarán los sensores en el interior de los árboles y se sellará la herida, de modo que se evite la exposición directa del aparato al sol y no se produzcan variaciones de temperatura (Easter y Sosebee, 1974), disponiéndolos longitudinal u oblicuamente por tener estos los gradientes principales radiales (Wiebe y Brown, 1979).

5. Mediciones en material vegetal.

Las condiciones de humedad del suelo y de la atmósfera son importantes porque afectan a los índices de absorción y transpiración de la planta. La resultante de las interacciones debida a estos factores que se traduce en la mejor relación suelo-planta, es el equilibrio hídrico interno de la planta. El aspecto más interesante de estas relaciones puede ser definido por el nivel de déficit hídrico existente en los tejidos vegetales porque directamente afecta a los procesos fisiológicos y bioquímicos que controlan su crecimiento

(Gounot y Monteny, 1967). En ese sentido, el comportamiento estomático y la fotosíntesis, entre otros procesos, pueden verse afectados por la disminución del potencial hídrico foliar, resultante del estrés hídrico ocurrido en cualquier estadio de desarrollo de la planta (Rodrigues *et al.*, 2003). Esto provoca que los potenciales de agua de hojas y otros tejidos de la planta se midan comúnmente con TCPs en compartimentos bajo condiciones isotérmicas.

Las mediciones de potencial del agua en plantas podrán realizarse en las diferentes partes del vegetal, tal como, agujas, troncos o tallos, raíces, hojas, semillas, frutos, etc. (Lopushinsky, 1990; Savage y Cass, 1984b; Jobling *et al.*, 1997), aplicándose sobre las especies recogidas en la tabla VIII.3. Para ello el material empleado podrá ser extraído de la planta de origen o bien emplear métodos no destructivos realizando las lecturas *in situ* mediante TCPs especialmente indicados para ello (Ehret *et al.*, 2001). Características definitorias de las prácticas de manejo existentes con material vegetal empleando TCPs son recogidas por Mattsson (1996).

Tabla VIII.3. “Aplicación de TCPs en especies vegetales”

Referencias	Tipo de TCP	Fabricante	Método*	Especies utilizadas
Ehlig (1962)	R	---	P	<i>Capsicum frutescens</i> L. <i>Gossypium hirsutum</i> L. <i>Lotus corniculatus</i>
Lamber y van Schilfgaarde (1965)	---	Fabricación propia	---	<i>Phaseolus vulgaris</i>
Box (1965)	Pt	---	P	<i>Gossypium hirsutum</i> L.
Boyer (1966)	I	---	I	<i>Helianthus annus</i> , L.
Campbell <i>et al.</i> (1966)	Sp/R	Fabricación propia	P	<i>Quercus prinus</i> L.
Hoffman y Splintern (1968)	D	---	H	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
Rawlins <i>et al.</i> (1968)	D	---	H	<i>Capsicum frutescens</i> L.
Barrs y Kramer (1969)	R	---	P	<i>Antirrhinum majus</i> <i>Brassica napus</i> <i>Zea mays</i> <i>Capsicum annuum</i> <i>Wonder annuus</i> <i>Helianthus annuus</i>
Millar <i>et al.</i> (1970)	Pt	Fabricación propia	---	<i>Allium cepa</i> L.
Wiebe <i>et al.</i> (1970)	D	Fabricación propia	H	<i>Juniperus scopulorum</i> <i>Ulmus pumila</i> L. <i>Elaeagnus angustifolia</i> L. <i>Hacer glabrum</i> Torr.
Hoffman y Rawlins (1972)	Sp	Fabricación propia	P	<i>Helianthus annus</i> , L. <i>Lysopersicon esculentum</i> Mill
Neumann y Thurtell (1972)	D	Fabricación propia	H	<i>Zea mays</i> , L.
Ficus (1972)	D	Diseño propio	H	<i>Zea mays</i> , L.
Boyer (1972c)	R	---	I	<i>Helianthus annus</i> , L.

(Continúa)

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; Pt: Peltier; I: Isopiestic; N: Nonequilibrium; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; I: Isopiestic; (*) Método de medición.

Tabla VIII.3 (Continúa)

Referencias	Tipo de TCP	Fabricante	Método*	Especies utilizadas
Calisendorff y Gardner (1972)	Pt	Fabricación propia	---	<i>Zea mays</i> , L.
Frank <i>et al.</i> (1973)	Sp	---	---	<i>Triticum aestivum</i> , L.
Easter y Sosebee (1974)	Sp	EMCO	---	<i>Honey Mesquite</i>
Easter y Sosebee (1975)	S	EMCO	---	<i>Honey Mesquite</i>
Michel (1977)	D	Wescor	H	<i>Glycine max</i> , L.
Brown y McDonough (1977)	---	Fabricación propia	---	<i>Populus tremuloides Michx</i>
Wiebe (1981)	Sp	---	P	<i>Triticum aestivum</i> , L.
Cavalieri y Boyer (1982)	I	---	I	<i>Glycine max</i> , L.
Brunini y Thurtell (1982)	D	Fabricación propia	H	<i>Zea mays</i> , L.
McBurney y Costigan (1984)	---	---	---	<i>Brassica oleracea</i>
Dixon y Tyree (1984)	D	Fabricación propia	H	<i>Thuja occidentales</i> , L.
Dixon <i>et al.</i> (1984)	D	Fabricación propia	H	<i>Thuja occidentales</i> , L.
Bower (1985)	---	Wescor L51	---	<i>Persea americana</i> Mill. <i>Helianthus annuus</i> , L. <i>Carthamus tinctorious</i> , L.
Schaefer <i>et al.</i> (1986)	D	Wescor HR-33T	H	<i>Glycine max</i> , L. <i>Triticum aestivum</i> , L.
Oosterhuis (1987)	Pt	Merrill Specialty Equipment, 74-series	---	<i>Gossypium hirsutum</i> , L.
McBurney y Costigan (1987)	D	Wescor L51A modified	H	<i>Brassica oleraceae</i>
Augé <i>et al.</i> (1998)	---	SC-10 Decagon Devices	---	<i>Acer rubrum</i> , L. <i>Acer saccharum</i> Marsh. <i>Chionanthus virginicus</i> , L. <i>Cornus florida</i> , L. <i>Halesia carolina</i> , L. <i>Liriodendron tulipifera</i> , L. <i>Nyssa sylvatica</i> Marsh. <i>Oxydendrum arboreum</i> , L. <i>Quercus acutissima</i> Carruthers <i>Quercus alba</i> , L. <i>Quercus prinus</i> , L. <i>Quercus rubra</i> , L.
Martre (1999)	D	C-52 Wescor	H	<i>Festuca arundinacea</i>
Zou <i>et al.</i> (2000)	N	TruPsi Water Potential Meter, Decagon Device	---	<i>Pinus radiata</i>
Siddique <i>et al.</i> (2000)	---	SC-10A Decagon Devices	---	<i>Triticum aestivum</i> , L.
Machado y Paulsen (2001)	---	C52 Wescor	---	<i>Triticum aestivum</i> , L. <i>Sorghum bicolor</i> , L.
Vogt (2001)	---	---	H	<i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Sambucus nigra</i>

(Continúa)

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; Pt: Peltier; I: Isopiestic; N: Nonequilibrium; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; I: Isopiestic; (*) Método de medición.

Tabla VIII.3. (Continúa)

Referencias	Tipo de TCP	Fabricante	Método*	Especies utilizadas
Kobayashi y Tanaka (2001)	---	PCT-55 Wescor	---	<i>Pinus densiflora</i> <i>Quercus mongolica</i>
Liu <i>et al.</i> (2003)	D	WP4 Dewpoint Potential Meter	H	<i>Agriophyllum squarrosum</i>
Niu <i>et al.</i> (2004)	D	WP4 Dewpoint Potential Meter	H	<i>Hedysarum fruticosum</i>
Daws <i>et al.</i> (2004)	D	WP4 Dewpoint Potential Meter	H	<i>Aesculus hippocastanum</i>

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; Pt: Peltier; I: Isopiestic; N: Nonequilibrium; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; I: Isopiestic; () Método de medición.*

Independientemente de que las mediciones se lleven a cabo *in situ* o en laboratorio, estas deberán ser representativas de la realidad. Por ello se tomarán varias muestras dentro de una misma estructura, conservándose durante su transporte en compartimentos humedecidos para evitar la pérdida de humedad. En caso de tratarse de hojas, para la determinación del potencial total se empleará tejido fino, si bien las membranas celulares deberán ser destruidas en el caso de querer determinar el potencial osmótico.

El tiempo de equilibrio necesario en el caso de hojas suele ser prolongado, tratándose de un proceso de medición lento (Brown y Oosterhuis, 1992). Por ello, se recomienda la abrasión de la cutícula de la hoja para apresurar el equilibrio (Decagon Device, 2003a), lo cual facilita las medidas en campo (Campbell y McInnes, 1999; Decagon Device, 2003b). Antes de introducir la muestra en el compartimento, deberá estar limpia y seca, y los compartimentos deberán tener las paredes y el fondo con material vegetal igual al de la muestra, a fin de que no se produzcan gradientes de presión de vapor y evitar que condense el agua (Boyer, 1966; 1967).

5.1. Corrección de errores.

Son múltiples los estudios conducentes a detectar, evaluar y solventar los errores que se presentan durante el funcionamiento de los sensores al emplearlos sobre muestras vegetales. Alguno de ellos se ha llevado a cabo en los setenta y los ochenta (Neumann y Thurtell, 1972; Easter y Sosebee, 1974; Baughn y Tanner, 1976b; Walker *et al.*, 1983; Savage y Cass, 1984a; Shackel, 1984; Wullschleger *et al.*, 1988), si bien la temática ha sido tratada desde los comienzos de la Psicrometría (Waister, 1965; Boyer, 1969).

En mediciones de potencial de agua en el material vegetal se detectaron problemas durante el proceso debidos al calor producido durante la respiración (Barrs, 1964; Boyer, 1967; Barrs y Kramer, 1969), la absorción de vapor por las paredes de la cámara que contiene la muestra (Lambert y van Schilfgaarde, 1965; Neumann y Thurtell, 1972) y la resistencia a la transferencia de vapor por parte de la hoja (Rawlins, 1964; Zanstra y Hagenzieker; 1977), todo lo cual causa inexactitudes en los resultados obtenidos. Para solventar todos estos problemas Boyer (1966) describió la técnica *isopiestic* que permitía paliar todos ellos.

En cualquier caso, estos no son los únicos inconvenientes dado que también se ha observado la influencia del tamaño de la muestra (Walker *et al.*, 1984; Bennett y Cortes, 1985), la disposición de los sensores *in situ* (Easter y Sosebee, 1974) o el traslado de la muestra del campo al laboratorio (Walker *et al.*, 1983).

Uno de los pioneros fue Barrs (1964) realizando mediciones del potencial de agua en tejido fino de plantas utilizando para ello dos TCPs, uno tipo Spanner y otro tipo Richards. Observó que se producía un incremento de la temperatura en las mediciones cuando se encontraba el tejido en el compartimento de la muestra, mientras que cuando se encontraba el papel de filtro con la solución de calibración no se observaba tal efecto. Como cuando se aumentaba el material se aumentaba la temperatura hasta que este moría, consideró que se debía a la respiración del vegetal. Boyer (1967) propuso varias soluciones para ello, mientras que Barrs (1964) optó por la modificación de la atmósfera del compartimento.

En 1964 Rawlins desarrolló una corrección para el TCP propuesto por Richards y Ogata (1958) a causa de la permeabilidad de las hojas, a fin de evitar errores provocados por el fenómeno de dependencia que en ocasiones se produce entre la disminución de la temperatura del bulbo húmedo y la permeabilidad de la hoja al vapor de agua, así como al potencial en el interior de la misma. El efecto de la permeabilidad de las hojas fue tratado por Barrs (1965) en los TCPs de tipo Spanner y Richards si bien no encontró una resistencia a la permeabilidad tan baja como para que afectase a las determinaciones de potencial, tal como indicó Rawlins (1964).

Para solventar todos estos problemas, Neumann y Thurtell (1972) y Zanstra y Hagenzieker (1977) propusieron el uso de la técnica higrométrica en vez de la psicrométrica demostrando que dicha técnica no se ve afectada por tales fenómenos. Si bien, Michel (1979) recoge la existencia de gradientes termale en “*stem hygrometers*”, los cuales provocan que las uniones de referencia y medidoras se encuentren a distinta temperatura provocando el voltaje “*zero offset*”. En todos los casos obtuvieron “*voltajes zero offset*” positivos, es decir, la muestra estaba más fría que el higrómetro (unión medidora más fría que la de referencia); quedando la obtención de “*voltajes negativos*” a la aplicación de gradientes transitorios. Por el contrario Wiebe *et al.* (1977) los consideraron en sus estudios negativos. Observaron que esto afectaba a las mediciones de potencial si bien consideraron posibles correcciones que aportasen medidas exactas. Concluyeron que el voltaje no era solamente función de la temperatura sino también del higrómetro, apoyando la utilidad de los sensores de pequeño tamaño. El efecto de estos voltajes fue estudiado también por Savage *et al.* (1983b) en “*leaf psychrometers*” y también por Savage *et al.* (1983a).

Para evitar los resultados anómalos debido a la absorción de agua por parte del compartimento de la muestra Lambert y van Schilfgaarde (1965) propusieron distintos materiales adecuados para ello (latón, cobre y Teflón puro), mientras que Neumann y Thurtell (1972) recubrieron los mismos con cera de parafina (*paraffin wax*) y Boyer (1966,1967) cubrió las paredes del compartimento de la muestra con tejido fino igual al empleado en las lecturas sellándose posteriormente la tapa mediante vaselina. Rawlins (1966) consideró que esta última táctica permitía también evitar los errores causados por modificaciones de la temperatura o de la presión de vapor entre la muestra y la atmósfera

debido al hecho de que los TCPs midan la HR. Mediante el cubrimiento del compartimiento se evitaron las variaciones de temperatura debidas a la respiración del material vegetal de la misma. En el caso de TCPs de tipo Spanner, se propuso corregir los posibles aumentos de temperatura restando la f.e.m. medida antes de que se produzca la condensación en la unión medidora, de la f.e.m. final, con la unión permanentemente mojada.

Pero para que se puedan solventar los distintos problemas antes hay que detectarlos, siendo necesarios estudios del tipo de los realizados por Waister (1965) que detectó varios errores que se producen en las lecturas de potenciales en hojas, analizando las variaciones entre las determinaciones sucesivas de una muestra en particular y entre las determinaciones simultáneas en muestras gemelas tomadas de una misma hoja. Como principales problemas citó: la variación introducida por el distinto manejo de los termopares, la contaminación de los mismos y los compartimentos de preparación de la muestra, las limitaciones del control de la temperatura y/o los escapes de vapor. Walker *et al.* (1983) realizaron un análisis pormenorizado de los errores que se podían producir como consecuencia del traslado de la muestra de campo al laboratorio utilizando “*screen-caged thermocouple psychrometers in sample chambers*” sobre hojas de trigo: tiempo de equilibrio, pérdida de agua por la hoja o cambios estacionales de los potenciales de la misma.

Por su parte, Baughn y Tanner (1976b) analizaron las distintas causas de error sobre cinco especies herbáceas distintas, observando que el potencial del tejido fino puede cambiar debido a la sequedad de la muestra, a la tensión hidráulica del xilema o a que el tejido interno varíe por causas como la anoxia, la ampliación de la célula u otros efectos metabólicos. Para ellos estuvo claro que al extraer el tejido fino de la planta y analizarlo, se provocan errores que pueden ser importantes a potenciales húmedos.

Como la importancia de la muestra estaba clara, se intentó profundizar más allá observando si existía una relación entre su tamaño y las mediciones obtenidas. Así, en 1984 Walker *et al.* estudiaron en hojas de soja el ratio área superficial de corte/ volumen de muestra. Registraron una disminución del potencial del agua medido cuando el tamaño de la muestra de hoja disminuyó, es decir cuando el ratio aumentó. Recomendaron, por ello, emplear muestras de hoja más grandes (con el ratio más bajo), para evitar de esta forma la pérdida y sequedad de la muestra que provocaría unas medidas no representativas del potencial real de la hoja, debiendo ser transportadas las hojas en bolsas de plástico y en un compartimiento húmedo para evitar la transpiración. Este estudio es concretado por Bennett y Cortes (1985) con experimentos conducentes a evaluar el efecto del tamaño de la muestra y el volumen del compartimiento del TCP, en potenciales de agua medidos en hojas (de soja) en el primer caso; y en soluciones de cloruro sódico en el segundo caso. Los resultados indicaron que mientras que los errores debido a la absorción de agua por los compartimentos de los TCPs pueden ser significativos usando volúmenes pequeños de tejido fino, si se utiliza cantidad suficiente del mismo pueden resultar insignificantes. Asimismo, demostraron que los problemas de la absorción de agua pudieran haber generado valores de potencial del agua bajos en estudios realizados con anterioridad, que en el caso de Walker *et al.* (1984) fueran atribuidos al ratio área superficial de corte/ volumen de la muestra.

Más actualmente, Brown y Osterhuis (1992) recomendaron evitar la pérdida evaporativa durante la recolección de las muestras y la detección y evaluación de los gradientes de temperatura, mientras que Savage y Cass (1984a) realizaron una revisión de las causas de error que se producen en las mediciones en campo de potenciales de las hojas. Los más salientables fueron los errores al azar de la calibración, la diferente temperatura entre las hojas y el sensor y los errores en el voltaje a la salida del sensor. Es por ello que la influencia de la temperatura la cifró en un error del 8-10% cuando la temperatura es inferior a 20° C y este disminuye al 4% cuando es superior a dicha temperatura. El error debido a la pérdida evaporativa durante la recolección de hojas fue tratado con anterioridad por Brown (1969) proponiendo un sacador (*sampler*) para ocho muestras permitiendo su sellado, a modo de solución.

Wullschleger *et al.* (1988) consideraron de especial interés examinar como podían afectar las diferencias de temperatura provocadas por las condiciones de campo en las mediciones del potencial en hojas, realizando mediciones en algodón, maíz y soja. El resultado del estudio indicó que las variaciones de temperatura introducen errores significativos en la medida del potencial en las hojas, sin embargo dichos errores pueden ser corregidos en un margen de $\pm 0,04$ MPa en condiciones de campo empleando para ello una ecuación de corrección.

Como existe una interacción entre el potencial de agua y la corrección de la temperatura, se propuso un factor de corrección que cambie linealmente con la temperatura, siendo este aceptable en un rango de 15-35° C (Comstock, 2000).

En un examen más exhaustivo, Savage y Cass (1984b) realizaron una revisión sobre los estudios llevados a cabo empleando TCPs respecto a las mediciones realizadas en plantas (árboles, tallos, raíces), la construcción de los mismos, su calibración, la influencia de la temperatura y las características de las mediciones en campo. Concluyeron que la exactitud de las mediciones realizadas dependen de la correcta calibración de los aparatos y de que esta se realizara asegurándose de que no existieran gradientes de temperatura.

5.2. Mediciones del potencial de agua en hojas.

En el material vegetal se han realizado mediciones del potencial de agua en distintas partes del mismo. Con mayor frecuencia se realizan en hojas, si bien también se estudiaron las raíces, troncos, ramas, frutos o bien en el conjunto de la planta, incluyendo en ocasiones también el suelo circundante e incluso considerando especies no sólo de interés agronómico sino también de interés forestal o con otros fines.

Los estudios sobre hojas comenzaron con Ehlig (1962) midiendo el potencial osmótico y el déficit de presión en hojas sueltas de tres especies de plantas empleando un TCP de tipo Richards ligeramente modificado. Las determinaciones se realizaron sobre material vivo en el caso del déficit de presión de difusión y a este lo sometió a congelación y posterior descongelación en el caso de la determinación de la presión osmótica, aportando resultados de la presión de turgencia de las hojas medida esta como la diferencia entre el déficit de presión e difusión y la presión osmótica.

Posteriormente, Box (1965) describe las técnicas para la utilización de un TCP Peltier para la determinación de los potenciales de agua en hojas de algodón equivalentes al déficit de presión de la difusión (*diffusion pressure deficits*) de 2 a 6,5 MPa a 25° C.

En esta misma época, ante la imposibilidad hasta el momento de la determinación del potencial en partes en crecimiento de las plantas, Lamber y van Schilfgaard (1965) propusieron un método de medición basado en un “*psychrometer probe*” y un compartimento de muestras, el cual permitió la medición del potencial en material vegetal intacto. Estos estudios se trataron de una primera aproximación siendo dicha metodología perfeccionada y aplicada posteriormente por Hoffman y Splinter (1968) sobre plantas de tabaco, haciendo uso de un “*psychrometer probe*” similar al que emplearon con anterioridad Rawlins y Dalton (1967), los resultados evidenciaron la influencia de la localización de las mediciones en la hoja, la HR atmosférica y las variaciones diurnas en la relación del potencial del agua y el suelo. En general se encontró que dicha relación no es lineal, observando la existencia de un gradiente en las hojas desde la base a la periferia. Esta conclusión la concretaron Campbel *et al.* (1966) afirmando que en hojas el potencial se mantiene en su periferia disminuyendo a medida que nos acercamos al nervio central y al peciolo.

Para la obtención de medidas exactas sin que se vean afectadas por distintos factores, Boyer (1966) propuso la técnica *isopiestic*. Posteriormente la aplicó en hojas de girasoles utilizando tejido fino en condiciones de equilibrio y no equilibrio, demostrando que la técnica aportaba resultados altamente reproducibles bajo condiciones experimentales variables (Boyer, 1972c). Sin su utilización, Barrs y Kramer (1969) realizaron mediciones en hojas de varias especies vegetales desarrolladas en invernadero, empleando dos TCPs (*droplet psychrometers*) combinados, de modo que uno de ellos es utilizado con la unión mojada libre para realizar mediciones normales y el otro con su unión seca libre de modo que se puedan corregir los errores que se presentasen derivados del calor de respiración. Observaron que el potencial medido en el tejido fino cuando este era rebanado ofrecía un valor de potencial más alto que en el caso del tejido sin cortar. Explican que la causa es el efecto de la savia y el citoplasma vacuolar expulsado por las células cortadas, lo cual provocaba que las células intactas circundantes lo acumulasen provocando un aumento de volumen que es acompañado por un aumento en el potencial de presión superior a la disminución de potencial osmótico que se produce debido a la absorción de solutos; si bien concluyen que este efecto puede no ser correcto cuando se emplea tejido de tamaño excesivamente pequeño.

Un año más tarde, Millar *et al.* (1970) realizaron pruebas a un TCP de termopar en miniatura con cuatro terminales (*miniature four-terminal thermocouple psychrometer*) midiendo el potencial de agua en cebollas (*Allium cepa*, L.). Dicho aparato se caracterizaba por su estabilidad termal mejorada en condiciones no isotermas, superando de esta forma los resultados de Rawlins y Dalton (1967), los cuales podían medir *in situ* (en su caso en suelos) si las fluctuaciones de temperatura no eran demasiado rápidas dado que los cambios en la temperatura ambiente podían ponerse a cero antes de tomar la medida actual. Se observó la existencia de fluctuaciones grandes de temperatura, lo que presentaba problemas a la hora de definir la temperatura de referencia, y obteniendo mediciones erráticas durante la mañana y la tarde provocadas estas por el calentamiento rápido que se produce en las primeras horas del día y por el enfriamiento también rápido de las últimas

horas de la tarde. Por ello no recomiendan realizar las mediciones con el aparato propuesto en esas condiciones. En ambos casos para evitar los cambios de temperatura entre la muestra y la cámara del TCP introdujeron los sensores en la muestra. Dado que esto no es posible realizarlo en muestras constituidas por material vegetal fino como el de las hojas, Hoffman y Rawlins (1972) propusieron un TCP tipo “*silver-foil*” que permitió demostrar que la diferencia de temperatura entre el sensor y la muestra era lo suficientemente pequeña como para permitir medidas de potencial de hojas *in situ*. Sus experimentos fueron realizados en plantas de girasol y tomate observando como respondía el sensor a los cambios diurnos de temperatura y a las modificaciones de potencial que acrecentaban mediante la aplicación de riego.

Neumann y Thurtell (1972) empleando un sensor semejante al de Millar *et al.* (1970) también midieron el potencial en hojas de maíz, aplicando para ello la técnica higrométrica, si bien sus estudios se dirigieron a testar el higrómetro propuesto, no a la adquisición de nueva información biológica. Lo mismo sucedió con Frank *et al.* (1973), utilizando un TCP tipo Spanner.

Otros estudios se han realizado sobre hojas a fin de observar cómo afecta la disponibilidad de agua, como Machado y Paulsen (2001) midiendo el potencial en hojas en trigo (*Triticum aestivum* L) y sorgo (*Sorghum bicolor* L.) para estudiar los efectos de la sequía y las altas temperaturas como factores limitantes de la producción o Augé *et al.* (1998) observando la tolerancia a la deshidratación en hojas de distintas especies de árboles. Liu *et al.* (2003) midieron, entre otros índices, la conductancia estomática y el potencial de agua de la hoja en *Agriophyllum squarrosum* con un WAM y observaron que un aumento en el contenido de agua del suelo tenía un efecto significativo en los rasgos fisiológicos analizados, si bien el cambio en la fotosíntesis se producía con retraso con respecto a los cambios en el potencial del mismo. En la misma época, Karyudi y Fletcher (2002, 2003) analizaron la osmoregulación durante el estrés hídrico determinando el potencial en hojas de *Setaria italica* L. Actualmente, Hura *et al.* (2007) comprobaron el efecto que sobre plantas C3 y C4 presentaba dicho estrés.

Otros aspectos como la respuesta del intercambio del gas y la fluorescencia de la clorofila junto con cambios en la precipitación simulada fueron estudiadas por Niu *et al.* (2004) en plantas de la especie *Hedysarum fruticosum* sometidas a estrés hídrico, mediante la medición del potencial de agua en hojas empleando también un WAM.

Otros ejemplos empleando hojas como material de estudio los presentan Smith *et al.* (1998), Huang (1999), Huang y Fu (2000), Fatima *et al.* (2002), Akmal y Hirasawa (2004), Babu *et al.* (2004), Melkonian *et al.* (2004) o Mungur *et al.* (2006).

En otras ocasiones suele determinarse conjuntamente el potencial en distintas partes de la planta, tal es el caso de Quemada y Cabrera (1997), empleando material procedente tanto de hojas como de tallos sobre *Trifolium incarnatum*.

5.3. Determinación del potencial de agua en tallos, frutos, raíces y semillas.

Las medidas del potencial en tallos permiten el estudio del crecimiento de los cultivos. Ejemplos de mediciones de potenciales en tallos son las observaciones de Michel (1977) y Dixon y Tyree (1984) con “*stem hygrometer*” con corrección de la temperatura así como las realizadas por Dixon *et al.* (1984) con un higrómetro, Vogt (2001) sobre dos especies de arbustos con un “*stem psychrometer*” midiendo las diferencias estacionales del potencial en el tallo o Nonami y Boyer (1993) confirmando la existencia de un gradiente de potencial en las zonas de crecimiento en tallos de soja (*Glycine max* L.), concluyendo que un gradiente radial estaba presente dentro de la región de crecimiento formando un campo de potencial de agua en tres dimensiones alrededor del xilema. Un “*stem psychrometer*”, fue utilizado igualmente por Scholz *et al.* (2007) en sus estudios realizados recientemente en la Savanna.

Dentro de una especie las mediciones también se realizan en sus frutos. Así, Bower (1985) observó el efecto del riego a largo plazo en aguacates y las consecuencias que ello conllevaba para la maduración de los frutos y su fisiología. Para ello midieron el potencial en frutos con “*leaf psychrometer*”. La utilidad de los TCPs en la conservación de frutos es tratada por la FAO (2003).

En 1992 Johnson *et al.* midieron el potencial de agua en los frutos y los tallos de plantas de tomate durante varios días usando TCPs automatizados. Observan la existencia de una fuerte correlación entre el gradiente de potencial de agua del fruto y el tallo, y los cambios de diámetro; de forma que concluyeron que los potenciales de agua bajos del tallo tienen un efecto directo e inmediato en la rigidez del floema.

Recientemente, Hanson y May (2006) se interesaron por la evaporación de las cosechas de tomates para la gestión del agua de riego, empleando para ello un “*chilled minor-dewpoint hygrometer*”. Tomates también los emplearon Dik y Elad (1999) o Guichard *et al.* (2005). Por el contrario, Yamada *et al.* (2004) centraron sus intereses en los desórdenes fisiológicos presentados por las manzanas a través de la determinación de su potencial.

Existen igualmente investigaciones de medición de potencial en raíces de plantas. La realización de estas determinaciones ayuda al análisis de los procesos de transporte de agua en el sistema suelo-planta. Es por ello que la determinación del potencial de agua de la raíz y el del suelo adyacente permite reflejar la capacidad de las plantas para extraer agua del suelo y proporciona información sobre los límites de esta capacidad. En cualquier caso aporta información sobre la resistencia de la raíz al flujo del agua. Son diversos los estudios realizados sobre el tema. Ficus (1972) determinó el potencial de las raíces de maíz y en el suelo adyacente, observando una buena relación entre ambos potenciales, siendo valores más negativos en el caso de la raíces que en el suelo. Con la aplicación de riego, el potencial se volvió menos negativo en ambos casos y la resistencia de las hojas disminuyó. Con posterioridad los estudios de Oosterhuis (1987) evaluaron los cambios de potencial en las raíces de algodón modificando también las condiciones de disponibilidad de agua para el cultivo. Observó que se producía un ajuste osmótico como respuesta a la tensión de agua, lo cual permite a la planta continuar su crecimiento aún en condiciones de cierta sequía mediante el mantenimiento de la turgencia de la célula. Por su parte, Zou *et al.*

(2000) observó las respuestas fisiológicas de las raíces al déficit de agua en pinos (*Pinus radiata*), mientras que Martre (1999) midió el potencial en raíces de *Festuca arundinacea*.

La medición de potencial en semillas no es tan frecuente, si bien, Daws *et al.* (2004) usaron *Aesculus hippocastanum* observando la influencia del calor durante su desarrollo en los rasgos físicos, fisiológicos y bioquímicos de la semilla. Cavalieri y Boyer (1982) partieron del hecho de que para que una célula crezca debe incorporar agua en su interior, de modo que necesita gradientes de potencial para mover dicha agua. Si bien estos gradientes son difíciles de determinar en células, estos sí se pueden estimar en tejidos crecientes. Estos gradientes son de tipo radial y longitudinal. Estos últimos fueron la causa de sus estudios en los que midieron el potencial en hipocotilos de soja intactos a la vez que se producía el crecimiento de los mismos en oscuridad (sin transpiración). Lo cual permitió concluir la existencia de un gradiente longitudinal de potencial.

Otros estudios destacables realizados sobre este tipo de material son los conducidos por Sun *et al.* (1999) sobre semillas de arroz, Amaral da Silva *et al.* (2004) en semillas de café, Wu *et al.* (2005) en soja empleando la técnica *isopiestic* o Serpe *et al.* (2006) sobre diferentes tipos de semillas de herbáceas.

5.4. Valoración del potencial en el sistema suelo-planta-atmósfera.

Es importante destacar que cada parte de la estructura de la planta no es un elemento aislado, sino que se encuentra integrado en un “todo”, viéndose afectado por el conjunto del mismo. Es por ello que se han llevado a cabo observaciones que intentan ser representativas de esa realidad disponiendo los TCPs en distintas partes del sistema.

En la década de los setenta despunta este tipo de investigaciones, de modo que Brown (1970) considera los posibles usos de los TCPs para medir los potenciales de agua en suelos y plantas bajo prácticas de manejo intensivas en bosques. Lo mismo sucedió con Easter y Sosebee (1974) realizando sus estudios sobre *Honey Mesquite* (*Prosopis glandulosa*) y el suelo circundante a los mismos, o Wiebe *et al.* (1970), realizando mediciones del potencial de agua en cuatro especies de árboles en condiciones de campo, incluyendo cambios de temperatura. Los TCPs fueron colocados en el tronco, las ramas y las hojas del árbol, así como también en el suelo alrededor de los mismos; observando la existencia de un gradiente de potencial, decreciendo este (convirtiéndose en más negativo) a medida que se asciende del suelo, se pasa por el tronco, las ramas y se llega a las hojas. Asimismo, cuando disminuía la transpiración (durante la noche o en días lluviosos), el potencial de las ramas aumentaba y el gradiente global disminuía.

Posteriormente Easter y Sosebee (1975) estudiaron la influencia que tiene el potencial del suelo sobre plantas de *Honey Mesquite* en condiciones de riego y no riego, de modo que localizaron TCPs del tipo Spanner “*double-junction*” con compensación de la temperatura en los troncos y en el suelo a distintas profundidades. Continuando de esta forma los estudios que comenzaran un año antes (Easter y Sosebee, 1974). Se obtuvo un gradiente de potencial que disminuía con la altura. Asimismo, en las zonas no regadas el potencial de los árboles era mayor (menos negativo) que en el suelo, lo cual está en contraposición con los resultados de Rawlins *et al.* (1968) los cuales obtuvieron siempre

potenciales en plantas inferiores a los del suelo. Los árboles que se sometieron a riego produjeron por lo menos dos veces más follaje que los que no se regaban, con lo que la cantidad de agua perdida con el riego era sustancialmente superior, siendo el índice de transpiración superior en árboles con riego que sin él.

Investigaciones en hojas conjuntamente con mediciones realizadas en suelo fueron realizadas sobre álamos (*Populus Tremuloides* Michx.) por Brown y McDonough (1977), observando una disminución del potencial durante el fotoperíodo y una recuperación durante los periodos de oscuridad, debido a la redistribución del agua adyacente del suelo. Por causa del cierre estomático, durante el mediodía se observa igualmente una disminución del potencial.

En general, las actividades fisiológicas de las plantas suceden cuando el potencial del tejido fino está por encima de $-7,5$ MPa, existiendo incluso plantas que a este potencial se marchitan levemente. Esta es la causa de que los estudios suelen realizarse a potenciales superiores, influenciados también por el hecho de que la utilización de algunos sensores está limitada a esos potenciales. Si bien, pese a todo existe actividad a potenciales inferiores como es el caso de las plantas xéricas y en cualquier caso la actividad enzimática sigue produciéndose. Wiebe (1981) propuso una técnica para evitar el problema que plantean los TCPs de tipo Spanner a esos potenciales. En esas condiciones en dichos TCPs el enfriamiento Peltier es insuficiente para condensar agua cuando la HR está próxima al 95% ($-7,5$ MPa). Sugirió, utilizando estos sensores, un proceso de dos etapas, durante el cual primero se produce la condensación por enfriamiento Peltier a HR=100% y posteriormente se inserta la muestra en la cámara y se mide inmediatamente el enfriamiento Peltier del termopar previamente humedecido. El proceso descrito no se recomendó para actividades de agua por encima de 0,95 (potencial de agua de -8 MPa) para el cual los procedimientos psicrométricos estándares son perfectamente válidos o bien se pueden emplear otros tipos de sensores no basados en la Psicrometría.

Otros estudios los realizaron Kobayashi y Tanaka (2001) en dos bosques naturales midiendo los potenciales de hojas, tallo, raíz (con TCPs) y suelo para determinar las características del flujo de agua en los árboles y la contribución del almacenaje en los tallos a la transpiración o Siddique *et al.* (2000) estudiando los efectos de la sequía en cuatro cultivares de trigo lo que condujo a una sensible disminución del potencial del agua en las hojas, concluyendo que se producía un índice de fotosíntesis mayor a un potencial de agua en hojas más alto y a una temperatura en las mismas más baja. Más recientemente destacan Shah y Paulsen (2003) en estudios semejantes sobre la misma especie.

5.5. Medición continuada del potencial de agua.

La capacidad de seguimiento del potencial de agua en plantas que experimentan cambios dinámicos en el estado del agua resulta de gran interés en las investigaciones, si bien no es algo que se describa habitualmente en informes, dado que el registro de medidas con frecuencia y a horas intempestivas es dificultado por la limitación en lo que a recursos de mano de obra se refiere. Dicho control, sin embargo es necesario para mejorar la comprensión de las causas de variación de la producción de cultivos que crecen en diversos tipos de suelo y mejorar los requisitos del regadío (McBurney y Costigan, 1988).

Brunini y Thurtell (1982) probaron en maíz (*Zea mays*) el TCP que diseñaron, demostrando que la respuesta del higrómetro para seguir los cambios en el potencial del agua bajo condiciones dinámicas en un sistema suelo-planta era muy buena, y la diferencia observada en el potencial del agua entre la hoja y el suelo después de un periodo de oscuridad parecía estar relacionada con la distribución desigual de la humedad del suelo o bien debido al crecimiento de la planta.

Simultáneamente, McBurney y Costigan (1984) midieron por primera vez las oscilaciones de potencial en tallos de plantas de cara a relacionarlo con la transpiración de la planta. Los estudios se realizaron sobre coles de Bruselas (*Brassica oleracea*), sometiéndolas a una temperatura controlada y a una gama de demandas evaporativas, imponiendo un alto déficit de presión de vapor e intensidad de luz corta. Fue observado un aumento inmediato del potencial del tallo (menos negativo) y una reducción en la tarifa de transpiración con la reducción de la intensidad de luz aplicada. Posteriormente continuaron sus estudios aplicando un “*water-jacketed stem-attached psychrometer*” sobre coles de Bruselas (McBurney y Costigan, 1987). Esta temática centró igualmente la atención de Turner *et al.* (1984a), Gollan *et al.* (1985) y Turner *et al.* (1985). Turner *et al.* (1984a) empleando un psicrómetro *in situ* estudiaron la respuesta que provocaban los cambios en el déficit de presión de vapor sobre la fotosíntesis, la transpiración y la conductancia de la hoja en especies tanto herbáceas como leñosas. Observaron mediante medición continuada del potencial en hojas, que al incrementar el déficit de presión de vapor, disminuía el potencial en hojas de todas las especies estudiadas, siendo más acusado en leñosas que en herbáceas. Posteriormente, Turner *et al.* (1985) se centrarían solamente en la especie herbácea *Heliantos agnus*, mientras que Gozan *et al.* (1985) llegaron más lejos en estos estudios, al observar las relaciones existentes entre el déficit de presión de vapor, el potencial de agua de la hoja, el contenido de agua del suelo y el intercambio de gas en hojas dentro de una especie leñosa.

De cara a mejorar la comprensión de las causas de variación en la producción en plantas que crecen en diversos tipos de suelos y así poder mejorar las estimaciones de las necesidades de riego en los cultivos es necesario un control continuo del potencial. Fue en 1986 cuando se consiguió un monitoreo continuado en especies de plantas cultivadas (girasol, soja...). Para ello Schaefer *et al.* (1986) hicieron uso de un higrómetro tipo *dewpoint* aplicando una abrasión a las muestras de hojas de cara a retirarles la epidermis y la cutícula para que la resistencia al movimiento del vapor de agua entre la hoja y el sensor fuese baja. Durante el proceso fueron observados los cambios en el potencial producidos por estímulos externos como cambios en la luminosidad, anaerobiosis del sistema radicular, supresión de hojas o aplicación de presión.

5.6. Medición del potencial osmótico.

Los TCPs por si mismos no miden separados los distintos potenciales, no obstante, Brown (1972) y Joly (1985) describen técnicas de medición del potencial osmótico utilizando estos sensores. Brown (1972) propone un proceso constituido por tres fases: medición del potencial total en tejido fresco de hojas, dañar el tejido y posteriormente volver a medir el potencial total asumiendo que este es el potencial osmótico. De esta forma, Brown supone que tras el daño de las membranas el potencial de presión es cero, el

potencial mátrico tiene un valor tan pequeño que puede ignorarse y que no se ve alterado el potencial osmótico con la muestra del tejido. Propone diversos métodos para la muerte del vegetal: congelación o calentamiento, entre otros. El método de la congelación lo explicó Joly (1985). Para medir solamente el efecto de los solutos de las células en la presión de vapor, la presión (turgencia) de las mismas debe ser reducida a cero. Esto se consigue mediante una congelación y descongelación rápidas, provocando que los cristales de hielo rompan las células, siendo posteriormente la muestra machacada. Si bien la técnica es muy precisa y de fácil desarrollo se deberán seguir las recomendaciones señaladas durante la realización de la misma. Actualmente esta determinación se ha realizado por Ayele *et al.* (2001) o Karyudi y Fletcher (2003).

5.7. Comparación de metodologías en Psicrometría *per se*.

A fin de corroborar que la instrumentación empleada en los estudios es la más indicada para ello, se suelen comparar distintas metodologías entre si e incluso dentro de la Psicrometría, distintos tipos de sensores, como muestra la tabla VIII.4. Dentro de las investigaciones que emplean la Psicrometría, Barrs (1964) comparó los resultados obtenidos con un sensor tipo Richards y uno tipo Spanner. Observó que al medir tejido fino el sensor tipo Richards se ve afectado por los cambios de temperatura del compartimento de manera que cuando se produce la respiración del tejido el potencial aumenta, mientras que el tipo Spanner ve reducida su temperatura pudiéndose concluir que este último no se ve afectado por ligeras modificaciones de temperatura en dicho compartimento. Posteriormente, Zollinger *et al.* (1966) analizaron las diferencias entre los dos tipos de TCPs, haciendo mención a sus características y limitaciones de cara a que su conocimiento permita minimizar sus desventajas respectivas y permita un mejor aprovechamiento de los mismos. Los resultados obtenidos se asemejaron bastante al aplicarlo a hojas de girasoles, no sucedió lo mismo al aplicarlo a suelos. Asimismo, Millar *et al.* (1970) comparan los resultados obtenidos con un TCP de cuatro terminales frente a uno de dos, observando un cambio en la salida de 0.5 a 1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ con el de cuatro terminales frente a 13 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ que se obtuvieron con el de dos terminales.

Dos años más tarde, Boyer (1972a) comparó la técnica *isopiestic* con los TCPs de Richards y el de Spanner aplicándolos a distintas especies con la finalidad de verificar la utilidad de la técnica *isopiestic*, de forma que comprueba que el problema que frecuentemente se presentaba respecto a la resistencia a la difusividad de vapor en tejidos no tiene la más mínima influencia con la citada técnica. Dichos estudios se continuaron por Nelsen *et al.* (1978), los cuales retoman la misma temática al realizar mediciones en hojas de soja y cereales (trigo y cebada) con dos tipos de TCPs: un higrómetro de tipo *dewpoint* y un TCP de tipo *isopiestic*. Los resultados obtenidos por ambos sensores fueron parejos en el caso de la soja, si bien para los cereales se obtuvieron potenciales demasiado altos con el higrómetro.

En cualquier caso sus investigaciones no iban encaminadas a comparar las técnicas en si, sino al estudio de la geometría y tamaño de la muestra. Observaron una buena concordancia entre los valores obtenidos para la soja con los dos sensores si bien para los cereales no existió tal concordancia. Dado que las técnicas de muestreo fueran distintas, basaron tales discrepancias en el tamaño de la muestra, recomendando que esta sea lo

suficientemente grande para que el efecto de las células dañadas no provoque resultados anómalos corroborando así a Barrs y Kramer (1969).

Tabla VIII.4. "Comparación de diferentes metodologías en su aplicación a material vegetal"

Referencias	Tipo de TCP	Especies utilizadas	Método (*)	Método de comparación	Relación empírica
Barrs (1964)	Sp	<i>Pelargonium zonale</i>	PC	R	$\Psi (R) < \Psi (Sp)$
Zollinger et al. (1966)	Sp	<i>Heliantus annuus</i> , L.	PC	R	$\Psi (R) = \Psi (Sp)$
Boyer (1967)	I	<i>Taxus cuspidate</i> (1) <i>Rhododendron roseum</i> Rehd (2) <i>Heliantus annuus</i> , L. (3)	I	PC	$\Psi (PC) \pm 2 \text{ bar } \Psi (I)$ (1 y 2) $\Psi (I) - 4 < \Psi (PC) < \Psi (I) + 2,50$ (3)
Knipling y Kramer (1967)	R	<i>Cornus florida</i> , L. <i>Oxydendrum arboreum</i> <i>Liriodendron tulipifera</i> , L. <i>Quercus alba</i> <i>Ulmus americana</i> , L. <i>Ligustrum japonicum</i> Thunb	I	DM	$\Psi (R) = 1-5 * \Psi (DM)$ (0 - 30 bar)
Wiebe et al. (1970)	D	<i>Juniperus scopulorum</i> Sarg. <i>Ulmus pumila</i> , L. <i>Elaeagnus angustifolia</i> , L. <i>Acer glabrum</i> Torr.	H	PC	$\Psi (D) = \Psi (PC)$
Duniway (1971)	Pt	<i>Lysopersicon esculentum</i> Mill.	PC	PC	Plantas infectadas : $\Psi \text{ xilema (Pt)} = -0,46$ $\Psi (PC) = -0,51 \pm 0,20$ Plantas sanas: $\Psi \text{ xilema (Pt)} = -0,69$ $\Psi (PC) = -0,57 \pm 0,23$
Boyer (1972a)	I	<i>Ligustrum japonicum</i> Thunb. <i>Pelargonium zonale</i> , L. <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. <i>Magnolia grandiflora</i> , L. <i>Phiodendron hastatum</i>	I	R y Sp	$\Psi (Sp)$ y $\Psi (R) < \Psi (I)$
Neumann y Thurtell (1972)	D	<i>Zea mays</i>	H	BG	$\Psi (D) \approx \Psi (BG)$
Easter y Sosebee (1974)	Sp	<i>Prosopis glandulosa</i> Torr.	---	PB ó DM	Mejor Sp
Baughn y Tanner (1976a)	D	<i>Solanum tuberosum</i> , L. <i>Helianthus annuus</i> , L. <i>Capsicum annum</i> , L. <i>Glycine max</i> , L. <i>Avena sativa</i> "Lodi"	H	PC	---

(Continúa)

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; I: Isopiestic; Pt: Peltier; IP: Psicrómetros in situ; LP: Psicrómetros de hojas; LH: Higrómetros de hoja; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; I: Isopiestic; PC: Pressure chamber; DM: Dye method; BG: Beta gauge; PB: Bomba de presión; PRP: Sonda de presión; Sc: Screen-caged psychrometer; L: leaf-cutter psychrometer;

(*) Método de medición; (**)(A) Cortados del psicrómetro; (B) un nuevo par de cuchillas; (C) sacador de biopsia; (D) un sacador de la biopsia, donde la hoja fue dañada posteriormente con un sacador de clavos.

Tabla VIII.4. (Continúa)

Referencias	Tipo de TCP	Especies utilizadas	Método (*)	Método de comparación	Relación empírica
Nelsen <i>et al.</i> (1978)	D	<i>Glycine max</i> , L. (1) <i>Triticum aestivum</i> , L. (2) <i>Hordeum vulgare</i> (3)	H	I	$\Psi(D) > \Psi(I)$ (2 y 3) $\Psi(D) = \Psi(I)$ (1)
Brown y Tanner (1981)	D	<i>Medicago sativa</i> , L.	H	PC	En diferentes plantas: $\Psi(D) > \Psi(PC)$ En la misma planta: $\Psi(D) = \Psi(PC)$
Savage <i>et al.</i> (1983b)	P	<i>Citrus jambhiri</i>	---	PC	$\Psi(LP) \approx \Psi(PC)$ (Abrasión ligera) $\Psi(LP) > \Psi(PC)$ (Abrasión gruesa)
Oosterhuis <i>et al.</i> (1983)	P	<i>Glycine max</i> L.Merr.	PC	PC and Sc	$\Psi(IP) > \Psi(PC)$ y $\Psi(Sc)$
Dixon y Tyree (1984)	D	<i>Thuja occidentalis</i>	H	PB	$\Psi(D) < \Psi(PB)$ (sin corrección de la temperatura)
Turner <i>et al.</i> (1984b)	H/LP	<i>Helianthus annuus</i> , L. (1) <i>Helianthus nuttalli</i> (2) <i>Vigna unguiculata</i> , L. (3) <i>Nerium oleander</i> , L. (4) <i>Pistacea vera</i> , L. (5) <i>Corylus avellana</i> , L. (6)	H/P	PC	$\Psi(LH/LP) \approx \Psi(PC)$ (3) $\Psi(LH/LP) < \Psi(PC)$ (1,2) $\Psi(LH/LP) > \Psi(PC)$ (4, 5,6)
Bennett <i>et al.</i> (1986)	Sp	<i>Medicago sativa</i> , L. (1) <i>Glycine max</i> L.Merr. (2) <i>Zea mays</i> , L. (3)	---	PC	$\Psi(Sp) \approx \Psi(PC)$ (1,2) $\Psi(PC) < \Psi(Sp)$ (3)
McBurney y Costigan (1987)	D	<i>Brassica oleraceae</i>	H	PC	Psicrómetro sin camisa: $\Psi(D) < \Psi(PC)$ Psicrómetro con camisa: $\Psi(D) \approx \Psi(PC)$
Shackel (1987)	P	<i>Tradescantia virginiana</i> , L.	---	PRP	$\Psi(IP) \approx \Psi(PRP)$
Turner <i>et al.</i> (2000)	D	<i>Cicer arietinum</i> , L.	H	PC	$\Psi(L) = 0,45 \Psi(PC)^3 + 0,75 \Psi(PC)^2 + 0,67 \Psi(PC) - 0,34$; $r^2 = 0,68$ (**) (A) $\Psi(L) = 1,02 \Psi(PC) + 0,11$; $r^2 = 0,84$ (B) $\Psi(L) = 1,19 \Psi(PC) + 0,23$; $r^2 = 0,92$ (C) $\Psi(L) = 0,23 \Psi(PC)^3 - 0,50 \Psi(PC)^2 - 0,89 \Psi(PC) - 0,54$ $r^2 = 0,90$ (D)

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; I: Isopiestic; Pt: Peltier; IP: Psicrómetros in situ; LP: Psicrómetros de hojas; LH: Higrómetros de hoja; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; I: Isopiestic; PC: Pressure chamber; DM: Dye method; BG: Beta gauge; PB: Bomba de presión; PRP: Sonda de presión; Sc: Screen-caged psychrometer; L: leaf-cutter psychrometer.

(*) Método de medición; (**) (A) Cortados del psicrómetro; (B) un nuevo par de cuchillas; (C) sacador de biopsia; (D) un sacador de la biopsia, donde la hoja fue dañada posteriormente con un sacador de clavos.

5.8. Comparación de la Psicrometría con otras metodologías.

El análisis de los resultados se realiza también mediante comparación con sensores basados en distintas metodologías (Tabla VIII.4), tal es el caso de la cámara de presión (*pressure chamber*), la sonda de presión (*pressure probe*), el método del tinte (*dye method*) o la galga beta (*beta gauge*).

Así Boyer (1967) determinó el potencial de agua en las hojas de tres especies: tejo, rododendro y girasol. Para ello empleó tejido fino utilizando la cámara de presión (*pressure chamber*) y comparando los resultados con un TCP del tipo *isopiestic*. Obtiene valores con la cámara de presión en girasol y tejo de $\pm 0,2$ MPa respecto al TCP y de 2,5 bar menos negativas a 4 bar más negativas en rododendro. Esta última discrepancia la explicó por efecto del relleno de los tejidos distintos al xilema con savia del xilema durante la medición realizada. Wiebe *et al.* (1970) compararon los resultados obtenidos con la cámara de presión (*pressure chamber*) en campo y un TCP de laboratorio *dewpoint*, donde obtuvieron una buena concordancia entre los resultados obtenidos en campo y en laboratorio.

En 1971 Duniway estableció la relación existente entre las mediciones de presión empleando la cámara de presión (*pressure chamber*) frente al potencial obtenido con un TCP Peltier. Para ello empleó plantas de una variedad de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Así mismo, infectó algunas de las plantas estudiadas para corroborar que el patógeno *Fusarium oxysporum* Schlecht f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyd and Hans., provoca un gran aumento de la resistencia al flujo del agua, y observar el efecto que esta resistencia tiene sobre la relación entre ambas mediciones. Concluyó la existencia de una relación entre las mediciones obtenidas con ambos instrumentos y que esta se podía expresar con una ecuación. Los resultados del TCP pueden resultar engañosos, dado que el valor del potencial medido depende, según sus observaciones, de la manera en que se muestree el tejido de la planta (corte de la misma) unido al movimiento de agua que se puede producir. Por todo ello, terminó afirmando que la cámara de presión puede ser a veces más recomendable que los TCPs de cara a mediciones de este tipo.

Por su parte Baughn y Tanner (1976a) al comparar las mediciones de un higrómetro, un TCP y la “*pressure chamber*” sobre diversos cultivos (patata, pimienta soja, girasol y avena), obtuvieron valores de potencial inferiores (más secos) con la *pressure chamber* que con el higrómetro para rangos de potenciales altos (húmedos), siendo más altos que el higrómetro en un rango de potencial más secos. Si bien hacen mención de la mayor fiabilidad del higrómetro frente al TCP incluso recomendándolo como método de calibración para la cámara. Con posterioridad Brown y Tanner (1981) aplicando los dos sensores a hojas de alfalfa, que no había sido estudiada con anterioridad, obtuvieron valores superiores con el higrómetro que con la “*pressure chamber*” cuando estas median plantas distintas, asemejándose cuando se median en la misma planta. Esto se contrapone a los resultados de McBurney y Costigan (1987) realizados sobre coles de Bruselas, en los que haciendo uso de un “*water-jacketed stem-attached psychrometer*” obtuvieron una buena concordancia entre ambas metodologías.

Savage *et al.* (1983b) compararon los resultados obtenidos *in situ* empleando la Psicrometría con los de la cámara de presión de Scholander sobre plantas jóvenes de la

especie *Citrus jambhiri*. A las hojas le realizaron la abrasión mediante dos técnicas: abrasión ligera (*light abrasion*) y gruesa (*coarse abrasion*). Los resultados obtenidos con la abrasión ligera son estadísticamente iguales a los de la cámara si bien con la abrasión gruesa los potenciales obtenidos con los TCPs resultaron ser más húmedos.

En años sucesivos, Dixon y Tyree (1984) aplicaron un higrómetro a tallos y sus resultados difirieron de 0,20 a 1 MPa de los medidos con la bomba de presión de Scholander, si bien cuando los gradientes de temperatura eran constantes la relación entre ambas mediciones resultó lineal. Turner *et al.* (1984b) compararon un TCP funcionando con la técnica psicrométrica con la cámara de presión obteniendo resultados realmente dispares al aplicarlo sobre especies morfológicamente distintas como la judía, el girasol o el pistacho entre otros. En algunos casos la correlación entre ambas técnicas era buena, si bien también se obtienen valores tanto superiores como inferiores entre ambas. Como posibles explicaciones de ello proponen la influencia de la baja conductancia epidérmica (para lo cual realizan la abrasión de la cutícula) o la existencia de gradientes de potenciales dentro de la misma muestra, en este caso las hojas. En cualquiera de los casos concluyen que los TCPs *in situ* son adecuados para el seguimiento de los cambios de potencial de agua en hojas si bien se deberán emplear con precaución en casos de conductancia epidérmica baja.

Dos años más tarde, Bennett *et al.* (1986) compararon el potencial del xilema medido con la cámara de presión (*pressure chamber*) con el potencial total del agua y el potencial osmótico medidos con TCP del tipo de Spanner; examinando así los cambios que se producían en la concentración de almidón en hojas de alfalfa (*Medicago sativa*), soja (*Glycine max* (L.) Merr.) y maíz (*Zea mays* L.) durante el periodo requerido para realizar las dos determinaciones propuestas con el TCP, dado que se sugería que la hidrólisis del mismo durante las mediciones del TCP podía ser la causa de discrepancia en los resultados. Obtuvieron muy buena concordancia entre el parámetro estimado con la cámara de presión y el potencial total determinado con el TCP, excepto para el maíz en el que el potencial de la cámara era inferior al obtenido con el TCP. Respecto al almidón concluyeron que su hidrólisis dependía del momento del día y de la especie y que el hecho de que se produjera durante las mediciones podía solamente explicar cambios muy pequeños en el potencial medido (<0,10 MPa).

Hardegree (1989) explicó la discrepancia de los resultados obtenidos entre el TCP y la *pressure chamber* al aplicarlo a *Pinus ponderosa* basándose en el movimiento del agua entre el xilema y el simplasto que ocurre durante la presurización en la cámara, si bien esta teoría no es capaz de explicar las discrepancias producidas entre especies. Con posterioridad, Turner *et al.* (2000) miden los potenciales en hojas, comparando los resultados obtenidos con la cámara de presión y los “*leaf-cutter psychrometers*”, observando diferencias significativas entre ambos. Establecieron que las discrepancias que se producían se debían a que el TCP producía daños en las hojas, modificando sustancialmente el tejido fino de las mismas (tal y como estudiaron en 1969 Barrs y Kramer), para lo cual recomendaron la obtención de la muestra mediante el uso de una cuchilla nueva. Para evitar la pérdida de humedad en la muestra aconsejaron humedecer el compartimento que sirve para contener la misma. Las muestras inicialmente se introdujeron en bolsas de plástico individualmente para evitar cualquier gradiente que se asocie a la transpiración, tal como indicó con anterioridad Shackel (1987).

Rodrigues *et al.* (2003) compararon los resultados de la cámara de presión con TCPs al medir el potencial en hojas para los distintos estado de desarrollo del trigo. Para el mismo nivel de deshidratación los valores del potencial hídrico foliar fueron superiores que con la cámara de presión, especialmente cuando el desarrollo de la planta era avanzado.

Otro método empleado es la galga beta (*Beta gauge*) la cual fue comparada con la técnica higrométrica por Neumann y Thurtell (1972), obteniendo resultados bastante similares entre ambos.

En la década de los ochenta se combinaron las temáticas anteriores comparando la Psicrometría entre sí y a su vez con la cámara de presión. Así, Oosterhuis *et al.*(1983) realizaron un estudio de los resultados obtenidos al medir en campo el potencial del agua en soja empleando para ello dos tipos distintos de TCPs (*leaf psychrometer* y *screen-caged psychrometer*) y la cámara de presión (*pressure chamber*). Cuestionaron la veracidad de las mediciones no destructivas realizadas en campo con el “*leaf psychrometer*” de modo que sugirieron que a este se le realizaran una serie de modificaciones. Obtuvieron con él unos valores superiores en comparación con los del “*screen-caged psychrometer*” y los de la cámara de presión. Concluyeron que con las modificaciones propuestas y siguiendo una serie de precauciones, las mediciones obtenidas con el TCP podrían ser válidas.

Casi con el comienzo de la Psicrometría Knippling y Kramer (1967) realizaron una comparación de los TCPs y el “*dye method*” (método del tinte) al aplicarlos a la medición de potencial en hojas. En este caso, al contrario de lo que suele ser habitual, no se compara la Psicrometría con otra metodología que se considere fiable, sino que se toma el TCP como método de referencia. Para ello emplean una modificación del tipo Richards aplicando la técnica *isopiestic* (Boyer, 1966). De esta forma, observaron que dentro de un rango de potencial de 0 a -3 MPa ambos métodos diferían en 1-5 bar. A potenciales extremos (muy negativos o cercanos al cero) el método del tinte aporta valores demasiado bajos, mientras que a valores intermedios estos resultaron ser muy altos (menos negativos). La causa de tal discrepancia se basa en la presencia de contaminantes en la muestra lo cual impide que exista un intercambio osmótico adecuado con el tejido fino de la hoja.

Otra metodología diferente fue empleada por Shackel (1987) al realizar ensayos con plantas en macetas de la especie *Tradescantia virginiana* L., empleando en ello un TCP como método de comparación con la “*sonda de presión*” (*pressure probe*). Determinó que el error más difícil de controlar en las mediciones era el concerniente a la carencia de equilibrio termal en el TCP. Este experimento supuso la primera comparación directa de métodos *in situ* para la medición en plantas altas y de métodos para la medida del potencial tanto a nivel celular como de tejido. Su estudio se basó en la importancia de la transpiración en lo que respecta a su relevancia termodinámica en el transporte de agua en los tejidos.

En cualquiera de los casos, Easter y Sosebee (1974) establecieron una ventaja de los TCPs, en su caso tipo Spanner, respecto a la *pressure bomb* o al *dye method*, ya que los primeros sensores permiten la realización de mediciones dentro de una planta tanto en raíces, troncos o ramas de mayor o menor tamaño. Por el contrario los otros métodos, limitan su uso en función del tamaño de la ramita o de la hoja.

5.9. Otros estudios.

Aunque las principales temáticas de investigación se han detallado en anteriores apartados, existen investigaciones puntuales que no han tenido continuación en otros estudios, pero que no por ello su relevancia es menor.

En 1973 Boyer y Potter estudiaron en el girasol (*Helianthus annuus* L.) la influencia de la dilución del contenido de la célula por el agua de las paredes de la misma, sobre el potencial medido con TCPs, estableciendo que la turgencia tiene poco efecto en la actividad fotosintética de la especie estudiada.

Beckett (1996) determinó el potencial de agua y sus componentes en *Parmotrema tinctorum*, una especie de líquenes. Los datos obtenidos sugirieron que las curvas obtenidas de presión-volumen daban resultados anómalos debido a las cantidades apreciables de agua intercelular que contenía la especie. Es por ello que estudió y discutió la forma en que estas anomalías en la curva podían ser corregidas.

Campbell y McInnes (1999) partiendo de la premisa de que cuando la conductancia del vapor es baja a través de la cutícula de las hojas, el tiempo en que se tarda en alcanzar el equilibrio es excesivo, por lo que compararon varias técnicas para extraer la cera cuticular, de cara a la comparación de cual de ellas producía un aumento mayor en la conductancia. Para ello utilizaron 6 tratamientos distintos de extracción (xileno, cloroformo, n-butanol y diclorometano, abrasión con lija y esponja de algodón) aplicados a tres plantas de maíz, algodón, girasol y *Ligustrum japonicum* Tumb. Cv. *Texanum*, observando que el tratamiento más eficaz era el papel de lija.

Tyree *et al.* (2002) estudiaron la tolerancia a la desecación en la especie *Licania platypus* (Hemsl.), de forma que pudieron concluir que la especie era asombrosamente tolerante a la desecación y que se encontraba perfectamente adaptada a la estacionalidad de la precipitación en la zona central de Panamá.

Quemada y Cabrera (2002) partiendo de la escasa disponibilidad de datos existentes relativos a la relación existente entre el agua de los residuos de las cosechas con el potencial de agua, determinaron las WRCs en residuos de centeno y trébol, para establecer las características del residuo que permitan predecir el máximo contenido de agua en el mismo, dado que el contenido de agua de los residuos es distinto al de los suelos, de forma que se pueda estimar la cantidad que puede ser conservada por los mismos. Para ello emplearon TCPs y concluyeron que la concentración de carbohidratos solubles era un buen índice para determinar el contenido máximo de agua en residuos de cosecha.

Recientemente, Mendonça y Stott (2003) midieron el potencial de residuos procedentes de la poda de café y su descomposición, aplicándolos sobre 4 especies diferentes, o bien, Apostol *et al.* (2004) estudiando el potencial del xilema en *Pinus banksiana*.

6. Mediciones realizadas en suelos.

Para la determinación del potencial de agua del suelo, se requerirá un especial cuidado durante la recogida de las muestras, el transporte y la transferencia de las mismas al compartimiento del TCP de cara a reducir al mínimo la evaporación (Brown y Chambers, 1987). Así mismo, las muestras recogidas y analizadas podrán ser alteradas o no.

Distintos tipos de estudios realizados sobre muestras de suelo (Tabla VIII.5) son recogidos por Campbell y Wilson (1972), estableciendo Cary y Hanks (1972) tres áreas principales en las cuales se utilizan las determinaciones del potencial de agua del suelo: análisis del flujo de agua, correlación entre el potencial y las respuestas biológicas; y caracterización del estado del agua del suelo a través de la termodinámica.

Tabla VIII.5. "Aplicación TCPs en suelos"

Referencias	Tipo de TCP	Fabricante	Suelos utilizados ⁴⁹	Localización
Rawlins <i>et al.</i> (1968)	D	---	Pachappa fine sandy loam	G
Lang (1968)	Sp	Fabricación propia	Sandmount sand Willbriggie loam	L
Hoffman y Splintern (1968)	D	---	Fine sandy loam topsoil	P
Campbell y Gardner (1971)	Sp	---	Palouse silt loam; Ritzville fine sandy loam; Millville silt loam; Unclassified saline alkaline clay loam	L
Papendick <i>et al.</i> (1971)	---	---	Ritzville fine sandy loam; Naff silt loam; Ritzville silt loam; Ritzville silt loam	L
Hsieh <i>et al.</i> (1972)	Pt	Fabricación propia	Loamy sand profile	F
Merva y Kilic (1972)	Pt	Wescor	---	F
Moore y Caldwell (1972)	Sp	Fabricación propia	Lacustrine deposits of reasonably uniform silt to sandy loam texture	F
Wheeler <i>et al.</i> (1972)	---	Wescor, Type PT51-10	---	F
McDonough (1972)	---	---	Loam topsoil	L
Eddleman y Nimlos (1972)	---	---	Air-dry sandy loam soil	C
Chow y de Vries (1973)	Sp	Fabricación propia	Silty clay; Silty clay loam	L
Enfield <i>et al.</i> (1973)	---	---	Sand to loamy sand	F
Mehuys <i>et al.</i> (1975)	---	---	Rock Valley (Entic durorthid, gravelly loamy sand) Tubac (Typic Paleargid, gravelly sandy loam), Rillito (Typic Calciorthid, gravelly sandy loam)	L
Majerus (1975)	Sp	---	Sandy loam soil	G

(Continúa)

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; Pt: Peltier; N: Nonequilibrium; DL: Doble lazo; G: Invernadero; L: Laboratorio; F: Campo; P: Macetas; B: Cajas; C: Ambiente controlado en cámaras de crecimiento.

⁴⁹ Se mantienen los términos de denominación en inglés dada la dificultad de su traducción en algunas casuísticas.

Tabla VIII.5. (Continúa)

Referencias	Tipo de TCP	Fabricante	Suelos utilizados	Localización
Daniel (1982)	Sp y DL	J.R.D. Merrill/EMCO	Fire clay; Los Álamos tuff; Los Álamos tuff+ bentonite Taylor caly; Kaolinite, Vicksburg silt	L
Barker y McKell (1983)	Pt	---	Fine-silty, mixed, frigid Xeric Torrifluent; Fine-silty, mixed (calcareous), frigid Typic Haplargid and frigid Ustic Torrifluent; Fine-loamy, mixed (calcareous), frigid Xerollic Torrifluent, frigid Typic Camborthid and frigid Ustic Torrifluent	F
Peláez y Bóo (1987)	Sp	---	Typical Paleorthid,	F
Gee <i>et al.</i> (1992)	D y N	CX1 Decagon Devices/SC-10A (Decagon Devices)	Quincy sand, mixed, mesic Xeric Torripsamment; Warden silt loam, coarse-silty, mixed, mesic Xerollic Camborthid; backfill sedimnt consisting of quincy sand and coarse (gravelly) subsoil material	L
Holmes y Rice (1996)	---	D. Merrill Specialty Equipment	---	P
Scanlon y Goldsmith (1997)	---	SC-10A Decagon Device	Silty clay loam of eolian origin with the playa sediments	L
Yoder y Nowak (1999)	Pt	Merrill Specialty Equip.	---	F
Gordon y Rice (2000)	---	J.R.D. Merrill Specialty Equipment	Oak woodland soil (Mollic Haploxeralf)	B
Ryel <i>et al.</i> (2002)	---	J.R.D. Merrill Specialty Equipment	---	F
Martre <i>et al.</i> (2002)	D	WP4 dewpoint hygrometer (Decagon Devices)	Soils at the field site varied from sandy (3% rocks by volume) to rocky (up to 35% rocks)	L
Anderson y Stormont (2003)	D	WP4 Dewpoint PotentiaMeter (Decagon Device)	Silty sand soil	L
Petry y Jiang (2003)	D	WP4 Dewpoint PotentiaMeter (Decagon Device)	Clay soils	L
Brye (2003)	D	Decagon WP4 Dewpoint PotentiaMeter (Decagon Devices)	Agricultural silt loam soil	L
Ludwig <i>et al.</i> (2003)	---	TST Wescor	Coarse sandy loams of lacustrine origin	F
Perfect <i>et al.</i> (2004)	D	WP4 Dewpoint PotentiaMeter and AquaLab model CX-2T water activity meter (Decagon Devices)	No till, Plowed and disked	L
Cancela (2004)	D	Dewpoint WP4 (Decagon Devices)	Gleysol; Alisol; Cambisol; Fluvisol	L
Díaz-Zorita <i>et al.</i> (2004)	D	WP4 Dewpoint PotentiaMeter and AquaLab, (Decagon Devices)	Silt loam soil (Fluventic Hapludoll)	L

(Continúa)

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; Pt: Peltier; N: Nonequilibrium; DL: Doble lazo; G: Invernadero; L: Laboratorio; F: Campo; P: Macetas; B: Cajas; C: Ambiente controlado en cámaras de crecimiento.

Tabla VIII.5. (Continúa)

Referencias	Tipo de TCP	Fabricante	Suelos utilizados	Localización
Mingo <i>et al.</i> (2004)	D	WP4 Dewpoint PotentiaMeter (Decagon Devices)	Compost	L
Ruíz y Darmody (2004)	D	WP4 Dewpoint PotentiaMeter (Decagon Devices)	Silty clay loam; silt loam; Silt; loam.	L

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; Pt: Peltier; N: Nonequilibrium; DL: Doble lazo; G: Invernadero; L: Laboratorio; F: Campo; P: Macetas; B: Cajas; C: Ambiente controlado en cámaras de crecimiento.

6.1. Medición separada de potenciales.

El potencial de agua medido por un TCP será la suma del potencial mátrico y el potencial osmótico, no obstante, durante el siglo pasado dos líneas de investigación versaron sobre la forma de separar ambos potenciales.

Richards y Ogata (1961) determinaron utilizando la técnica psicrométrica la presión osmótica o succión de solutos (SS) y la succión total (TS); y mediante una membrana de presión (*pressure membrane*) determinaron la succión mátrica (MS) en 134 muestras de suelo, evaluando la diferencia:

$$\Delta S = TS - (MS + SS) \quad (\text{VIII.5})$$

Todos los valores fueron obtenidos a la misma temperatura pero a distintas presiones. Observaron la no existencia de relación constatable entre la textura y los resultados obtenidos, si bien resultó evidente que cambios en la estructura del suelo provocaban errores en las mediciones de TS de varios bares. Los valores de TS resultaron ser aproximadamente iguales a los valores de MS y SS; pero a valores bajos de SS se observa que TS suele ser inferior que MS, lo que indicó un posible error en la técnica experimental utilizada. La técnica empleó un TCP semejante al descrito por Rawlins y Dalton (1967).

Posteriormente, Oster *et al.* (1969) describieron otra técnica que permitió medir ambos potenciales de forma separada. Se fundamentó en que aumentando la presión de aire dentro del compartimiento del suelo, el potencial de agua se incrementa en una cantidad fija (respecto a la presión atmosférica del interior de la cápsula de cerámica). Considerando, según otros estudios, que el potencial del agua del suelo puede no ser dependiente de la presión, el potencial de agua medido por el TCP aumentará en una cantidad igual al aumento del potencial de presión en el suelo. Cuando el potencial de presión es numéricamente igual al potencial mátrico del suelo, una solución en equilibrio con la solución del suelo existirá en el interior del bulbo de cerámica a potencial mátrico cero. En esta presión el TCP mide el potencial osmótico de esta solución. Aumentos posteriores en la presión harán fluir la solución en el bulbo de cerámica, pero el potencial osmótico de la solución deberá seguir constante si la cantidad de solución movida es pequeña. En una gráfica del potencial de agua frente a la presión aplicada existirá un

cambio en la pendiente a una presión determinada, correspondiéndose el potencial mátrico del agua en el suelo al negativo de esa presión. Esta técnica supuso un avance, dado que Richards y Ogata (1961) estudiaron la interacción entre ambos potenciales, si bien precisaron de la extracción de la solución del suelo, durante la cual fácilmente se pueden producir alteraciones del potencial osmótico.

Recientemente, Sreedeeep y Singh (2006a) describen una metodología novedosa para la determinación del potencial osmótico en suelos.

6.2. Determinación de las causas de error producidas durante las mediciones.

El interés por la determinación de los errores que se pueden producir durante la realización de las lecturas utilizando este tipo de sensores es una constante en los diversos trabajos realizados, por ser estos de naturaleza variada.

Una de las principales causas y quizá la más estudiada es la presencia de gradientes de temperatura en el suelo, la cual es algo frecuente en este medio. Los mismos pueden variar tanto en magnitud como en orientación, de tal forma que afectan a las lecturas realizadas *in situ* por los TCPs. Debido a la magnitud del cociente (P/P_0) en la ecuación de Kelvin, una diferencia de temperatura de 1° C es equivalente a una diferencia de 8 MPa en el potencial de agua (Wiebe *et al.* 1977, Scanlon *et al.* 2002). Si bien Passioura (2001) cifra la influencia en 0,08 MPa por cada 0,001° C, Livingston (1993) en 0,01 MPa por cada 0,001° C y Hsieh *et al.* (1972) en -1 MPa por cada $\pm 0,062^\circ$ C. De esta forma, cuando el aire que rodea a la unión medidora se encuentra a distinta temperatura respecto al aire que se encuentra en contacto con la muestra, se puede provocar un error importante en las lecturas realizadas (Peck, 1968; Scotter, 1972).

En 1967 Rawlins y Dalton propusieron un higrómetro esférico con el termopar medidor situado en el centro exacto del mismo, de forma que la transferencia de calor desde la superficie esférica de la muestra mantiene al termopar medidor a la temperatura media de la muestra. Los gradientes de temperatura pueden también causar diferencias en la misma entre la unión medidora y la de referencia cuando ambas están secas. Estas diferencias pueden solventarse de muy diversa forma (Peck, 1968). Se trata del denominado “*voltaje zero offset*”, ampliamente estudiado con higrómetros de suelo por Wiebe *et al.* (1977) y McAneney *et al.* (1979).

El primero en realizar un estudio pormenorizado de causa de error en los TCPs es Monteith (1954) detectando la conducción de calor a lo largo de los alambres y la radiación como uno de los principales problemas que se presentan, lo cual conduce a generar una expresión que describa cada modelo de termopar en particular. Asimismo, relacionó los errores correspondientes a la temperatura de la unión mojada con los correspondientes a la presión de vapor.

Posteriormente Klute y Richards (1962) realizaron un control de la temperatura al medir muestras de suelo calibrando el sensor en una pequeña cámara cerrada a 5, 25 y 40° C con presiones de vapor conocidas empleando una solución de KCl. Observaron que el error producido por la temperatura en un rango de 0 a 2 MPa y a las temperaturas

consideradas no excedía de ± 1 bar. Establecieron como posibles causas de ello los gradientes de agua y solutos a lo largo del cilindro que contiene la muestra, los cambios producidos en la estructura de las muestras, así como también los cambios biológicos, químicos y del contenido de agua que pueden ocurrir durante el proceso de lectura. Es por ello que recomendaron hacer un especial hincapié en la necesidad de una mejor preparación de la muestra, si bien concluyeron que no se observaba una relación de los cambios en la medición del potencial con la temperatura.

Ante el creciente interés por el estudio de la temperatura Rawlins y Dalton (1967) realizaron un análisis detallado de cómo la temperatura puede afectar a las mediciones obtenidas, estableciendo cuatro causas: que la relación teórica entre el potencial y la HR es dependiente de la temperatura (ecuación de Kelvin); que la relación entre la depresión del bulbo húmedo y la HR del compartimiento depende de la temperatura; porque se producen variaciones del potencial de agua cuando la temperatura del compartimiento de la lectura tiene una temperatura diferente a la unión de referencia del termopar y a que cuando el aire se calienta se produce una disminución de la HR a menos que entre suficiente agua al aire durante la misma.

Campbell y Gardner (1971) estudiaron los cambios que se producen en el potencial del agua del suelo por efecto de la temperatura y de la densidad aparente. Para ello analizaron en el laboratorio distintos tipos de suelo empleando el TCP del tipo de Spanner. Sugirieron que en suelos mojados o gruesos la influencia de la temperatura es apenas perceptible, si bien esta es clara cuanto más secos están los suelos y más fina sea su textura. Esto está en contraposición con los resultados obtenidos con anterioridad por Klute y Richards (1962), los cuales no pudieron demostrar el cambio del potencial con la temperatura. Asimismo, durante el estudio tuvieron en consideración la posibilidad de que se adicionara agua al sistema durante las lecturas tal y como con anterioridad se relató (Zollinger *et al.*, 1966), de modo que la metodología seguida intentó eliminar dicho problema. Respecto a la relación del potencial con la densidad aparente, no se obtuvieron resultados concluyentes, observándose una pequeña variación del potencial con la misma en una muestra de subsuelo de arcilla.

Merrill y Rawlins (1972) observaron el efecto de la temperatura a lo largo de todo un año sobre las mediciones realizadas en campo a distintas profundidades con TCPs Peltier, estableciendo que la dependencia de la sensibilidad del aparato respecto a la temperatura es razonablemente lineal, pudiéndose expresar mediante una ecuación VIII.6:

$$K = Mt + B \quad (\text{VIII.6})$$

siendo:

K : sensibilidad ($\mu\text{V bar}^{-1}$).

t : temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

M y B : coeficientes.

En el trabajo discutieron los factores que hacen disminuir la exactitud de las medidas del potencial del agua en el suelo entre los que citan: el flujo de calor, el cambio

diurno de la sensibilidad del aparato y el equilibrio entre el agua del suelo y el agua en el material cerámico de los TCPs empleados. Observaron que en el suelo existe una variación estacional de la temperatura y un patrón diurno del flujo de calor. El flujo de calor diurno es orientado verticalmente y acompañado por variaciones diurnas del nivel y del gradiente de temperatura, las cuales no se atenúan muy pronto con la profundidad. Dicho cambio diurno fue estimado en un máximo de 25° C. Es por ello que sugirieron la práctica de instalar los sensores horizontalmente en el suelo próximo a la superficie para reducir al mínimo los efectos del gradiente de temperatura sobre las mediciones del potencial del agua. Así mismo, recomendaron realizar medidas diarias del potencial en intervalos de 12 horas para evitar los errores diurnos provocados por el gradiente de temperatura. Respecto del tercer factor considerado, explican que la pérdida de contacto entre la cerámica y el suelo disminuye el índice de equilibrio entre el agua y los solutos disueltos almacenados en el suelo y en la cerámica, de modo que los componentes mátricos y osmóticos del potencial del agua se ven afectados en diverso grado por la pérdida de contacto.

En 1977 Wiebe *et al.* comprobaron los efectos que producen los gradientes de temperatura con varios higrómetros comerciales y de laboratorio sobre una columna de suelo a la que sometieron a dichos gradientes mediante el calentamiento o el enfriamiento de la misma. Obtuvieron medidas del potencial exacto cuando la temperatura media era uniforme, pero las lecturas obtenidas eran considerablemente más bajas (secas) cuando la superficie de la muestra estaba más fría que la unión medidora y demasiado altas (próximas a cero) cuando dicha superficie estaba más caliente. Considerando esto, Wiebe y Brown (1979) estudiaron en laboratorio la influencia que tenía la geometría del aparato y la conductividad termal en la condensación o la sequedad del agua en las zonas cercanas del suelo al aparato. Para ello emplearon distintos tipos de higrómetros realizados con diversos materiales, observando que se producía la condensación o sequedad del suelo circundante cuando la conductancia de calor del aparato se diferenciaba sustancialmente del medio, de forma que un higrómetro de metal conducía el calor más rápidamente que el suelo y por lo tanto tendría un gradiente de temperatura más bajo dentro del mismo; mientras que si el material era cerámica o plástico dicho gradiente era levemente más pequeño que los del suelo. Identificaron que los gradientes de temperatura pueden provocar errores debidos a que el agua bien puede condensar (gradiente positivo) o evaporarse (gradiente negativo) en el suelo en la superficie medidora, lo cual se ve agravado cuando el material causa una mayor conducción de calor (metal, tamaños grandes y alambres grandes), o bien puede condensar dentro de la unidad en función de la geometría de la misma. Frente a esto sugirieron una serie de características de diseño que comprendían la geometría concéntrica con la unión medidora en el medio o en el extremo distal de la superficie cilíndrica o esférica de la muestra, la reducción de la conductancia del calor empleando materiales de baja conductividad y, en general, una miniaturización del aparato. Asimismo, recomendaron enterrar los higrómetros horizontalmente dado que los gradientes de temperatura horizontales suelen ser inferiores a los verticales.

Otro problema planteado se debía a la variabilidad espacial de la concentración de suelo. Ante ello, Ingvalson *et al.* (1970) midieron el potencial del agua y el potencial osmótico en el suelo, mediante un instrumento que combinaba un TCP para medir la HR y un sensor de la salinidad para medir la conductividad eléctrica en un mismo cuerpo de cerámica. Al poder realizar ambas mediciones al mismo tiempo los errores producidos por las variaciones espaciales en la concentración del suelo, son eliminados. Si bien

encontraron un problema debido a la desaturación de la cerámica a potenciales mátricos bajos, lo cual para potenciales inferiores a $-0,2$ MPa exigía una corrección.

Para Savage y Cass (1984b), por el contrario, los principales problemas que se le presentan son la condensación o la sequedad de agua en las cercanías del TCP y la presencia de gradientes de temperatura.

6.3. Medición del potencial de agua.

No tan frecuentes, las investigaciones sobre suelos adquieren relevancia en las últimas dos décadas, requiriendo desde los TCPs más clásicos a las últimas tecnologías desarrolladas.

Los WAMs son descritos por primera vez por Gee *et al.* (1992) midiendo el potencial en muestras de suelo muy secas con la intención de solventar los problemas que presentan este tipo de muestras para la obtención de medidas confiables de su potencial. Sus resultados les llevaron a concluir la total conveniencia del método utilizado, que posteriormente aplicarían al mismo tipo de muestras Flint *et al.* (2002). Gee *et al.* (1992) comprobaron igualmente la no influencia de la densidad aparente en muestras muy secas confirmando los resultados de Campbell y Gardner (1971). Esto se debe a que los suelos secos drenan la mayoría del agua de los poros grandes y los efectos de la estructura y la porosidad tienen poca importancia comparados con los efectos del área superficial (agua fijada por adsorción). Esta misma instrumentación la emplearían Cancela (2004), Perfect *et al.* (2004) y Díaz-Zorita *et al.* (2004), entre otros.

Cancela (2004) realizó las primeras fases de un estudio para la obtención de una metodología de determinación de la reserva de agua útil de un suelo, empleando, en el mismo, dos técnicas: la Psicrometría y la placa de presión de Richards (*pressure plate*) (PP), realizando una comparación entre las mismas. Se obtuvieron las WRC para los distintos tipos de suelos empleados, tal y como también hicieron Perfect *et al.* (2004) y Díaz-Zorita *et al.* (2004). Los primeros caracterizaron la WRC en muestras de suelo sometidos a labranza y a fertilización nitrogenada continuada, para lo cual combinaron los TCPs *dewpoint* en laboratorio con un modelo desarrollado que les permitiese obtener las curvas de potencial realizando un análisis de regresión no lineal. En el modelo que desarrollaron concluyeron que serían necesarios estudios adicionales en otros tipos de suelos, así como el análisis de la influencia del empleo de muestras alteradas y de la densidad de cara a comprobar el funcionamiento del mismo al producirse variaciones en dichos parámetros. Por su parte, Díaz-Zorita *et al.* (2004) emplearon dos tipos de WAM para la determinación de las WRCs en un estudio realizado para caracterizar los efectos de la interrupción periódica de la labranza en las características del suelo y las producciones de trigo de invierno.

Empleando WAMs para la determinación de la WRC destacan igualmente los trabajos de Santi *et al.* (2002), De Medeiros-Silveira *et al.* (2004), Barreto-Riquelme *et al.* (2004) y Collares *et al.* (2002), o bien, valores puntuales de capacidad de campo (*field capacity*) (FC) como Kunz *et al.* (2003), o el punto de marchitamiento permanente

(*permanent wilting point*) (PWP) como Solano *et al.* (2002). Incluso se ha establecido la WRC tal es el caso de Sreedeeep y Singh (2006b).

Como estudios actuales que hayan utilizado los WAM son de destacar Petry y Jiang (2003) evaluando su utilidad para analizar la succión total en suelos expansivos de arcilla, Brye (2003) determinando el efecto de la utilización del suelo y el cultivo continuado en el tamaño de las partículas del suelo y las características de retención de agua del suelo, Costa *et al.* (2003) estudiando la variación espacial de la humedad y el agua disponible con cinco sistemas de manejo o Ruíz y Darmody (2004) analizando si sedimentos acumulados en ríos podrían servir, mezclados con otros materiales como estiércol vegetal o abono de caballo, como sustituto de la capa superficial del suelo, analizando el crecimiento vegetal, la biomasa total, y el contenido de los metales pesados, al igual que las características físicas y químicas de las mezclas del suelo. También destacan las investigaciones realizadas por Anderson y Stormont (2003) utilizando una combinación de tres métodos (WAM, PP y *hanging column test*) para la determinación del potencial en suelos secos o Mingo *et al.* (2004) sobre la biomasa en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum*) en distintas condiciones de crecimiento, empleando un WAM para la determinación del potencial de agua del suelo.

Las mediciones de potencial en suelos no es un tema aislado, estando íntimamente relacionado con el cultivo en él desarrollado. De este modo, surgen trabajos como los de Rawlins *et al.* (1968), Lang (1968), Papendick *et al.* (1971) o Yoder y Nowak (1999) realizados con otros modelos de TCPs.

Rawlins *et al.* (1968) realizaron mediciones en plantas de pimienta empleando una galga beta y para el potencial del suelo tensiómetros y TCPs de campo. Observaron que el agua se movía a través de una corriente de transpiración en la dirección del gradiente de potencial, pudiendo concluir que la planta después de sucesivos riegos recuperaba su potencial independientemente de que este inicialmente fuese inferior al del suelo, tomando el agua de las zonas más superficiales del suelo y siendo en estas zonas las raíces de mayor diámetro que en zonas más profundas.

En la zona radicular, Merva y Kilic (1972) utilizaron TCPs Peltier en el interior de un dispositivo de modo que se pudo controlar el medio cuando se realizaban las mediciones *in situ* asegurando la repetibilidad de las mismas.

Por otro lado, Lang (1968) midió el potencial empleando un TCP del tipo Spanner en suelos bajo plantas de algodón (*Gossypium hirsutum*). Para permitir la sustitución del TCP más fácilmente, calibrar los sensores y evitar que se mojasen, estos se introdujeron en el interior de una jaula. Se observó una variabilidad del potencial de agua causada en parte por la absorción desigual del agua por las raíces, siendo la variabilidad lateralmente tan grande como verticalmente. Algo parecido fue realizado por Papendick *et al.* (1971) al medir los potenciales de agua del suelo bajo trigo (*Triticum aestivum* L.) en la zona radicular. Consideraron que el potencial de agua en esa zona podría ser un indicador sensible a las diferencias del estado del agua de la cosecha y encontraron que el límite más bajo de extracción del trigo se cifra en -4 MPa o incluso más bajo. Majerus (1975) midió el potencial en el suelo bajo tres especies de herbáceas, relacionándolo con la temperatura del suelo y la elongación de las raíces y las hojas, mientras que Eddleman y Nimlos (1972) lo

midieron bajo cuatro especies de herbáceas, determinando la respuesta al crecimiento sometidas a distintos niveles de estrés atmosférico. Sobre semillas de hierba, McDonough (1972) realizó tests de germinación y de emergencia obteniendo en todas las especies respuestas similares a las modificaciones en el potencial.

La medición del potencial resulta especialmente complicada en zonas desérticas, pues los cultivos generalmente se desarrollan a potenciales normalmente comprendidos sobre -1,5 o -2 MPa, sin embargo en plantas nativas de zonas desérticas, su desarrollo suele realizarse a potenciales más negativos. Así determinadas investigaciones se realizan en condiciones tan desfavorables, tal es el caso de Moore y Caldwell (1972) midiendo el potencial del suelo bajo dos halófitas del desierto empleando TCPs del tipo Spanner o Wheeler *et al.* (1972) midiendo el potencial a distintas profundidades y relacionándolo con la temperatura. En ambientes áridos el crecimiento de las distintas especies y la distribución de agua se ven influenciados por la presencia o no de rocas. En esto se basaron los estudios de Martre *et al.* (2002) empleando TCPs para la medición del potencial en suelos. Por otro lado, Barker y McKell (1983) estudiaron el potencial en suelos (conjuntamente con hojas) para establecer las diferencias del hábitat de distintas especies de arbustos en relación con el agua y el suelo.

En arbustos, Peláez y Bóo (1987) analizaron el potencial del suelo con TCPs del tipo Spanner, comprobando que las especies consideradas poseían la capacidad de ajustarse a las condiciones de sequía del verano.

Especies de zonas determinadas con características especiales despertaron el interés de Holmes y Rice (1996) analizando la sustitución de las especies nativas por especies exóticas en la California Occidental, lo cual pudo haber alterado los correspondientes patrones estacionales de la disposición de agua en el suelo. Para corroborar estos efectos midieron los potenciales del suelo mediante “*Peltier-cooled thermocouple psychrometers*”.

Yoder y Nowak (1999) realizaron el primer estudio del potencial en plantas CAM empleando *in situ* TCPs basados en el efecto Peltier; situando esto en suelos para la medición de las fluctuaciones del contenido de agua en el mismo y viendo la influencia que sobre ellas tenía conjuntamente con la iluminación nocturna y el sombreado diurno.

Considerando árboles, Gordon y Rice (2000) midieron el potencial en suelos donde crecían *Quercus douglasii*, observando los cambios que pudiesen resultar en la disponibilidad estacional en el agua, coincidente con el reemplazo de la vegetación perenne nativa por vegetación mediterránea anual, mediante “*screen-caged thermocouple psychrometers*”. Utilizando este mismo tipo de TCP, Ryel *et al.* (2002) determinaron la relevancia de la redistribución del agua del suelo facilitada por las raíces (una extensión de la "elevación hidráulica"⁵⁰ o “redistribución hidráulica”) para *Artemisa tridentata* y para

⁵⁰ *Elevación hidráulica* es el proceso mediante el cual el agua se mueve de zonas más secas a zonas más húmedas dentro del suelo provocado por las raíces de las plantas. Dicho movimiento se produce generalmente por la noche cuando los estomas de las hojas se encuentran cerrados y existe un gradiente de potencial importante entre las raíces más profundas y las superficiales.

Acacia tortilis por Ludwig *et al.* (2003) disponiendo “soil thermocouple psychrometers” a diferentes distancias de los árboles.

Igualmente en árboles, Ishikawa y Bledsoe (2000) registraron durante tres años las fluctuaciones estacionales y diarias del agua en un suelo arbolado con roble azul (Blue Oak) de California, para lo cual emplearon TCPs para la determinación del potencial del agua del suelo en intervalos de una hora.

Scanlon y Goldsmith (1997) realizaron el primer estudio en lo que a densidad de datos se refiere y variedad de técnicas utilizadas, encaminado a la cuantificación del flujo no saturado debajo de playas y zonas adyacentes para conocer dónde y cómo el agua se mueve en la zona no saturada. Para ello hicieron uso de TCPs *with a sample changer* analizando las muestras de suelo en laboratorio. Actualmente, Romero (1999) analizó los efectos del temperatura y la modificación del contenido de humedad en arcillas en el comportamiento de cambio de volumen, permeabilidad y características de retención de agua, mientras que Miller *et al.* (2003) propusieron una técnica para la determinación del potencial de agua, estableciendo la influencia que sobre las características de agua del suelo tiene tanto el tipo de suelo como la compactación del mismo, ambos con el uso de los TCPs. En esta misma época, Fujimaki y Inoue (2003) proponen un método para la estimación de la WRC y la conductividad hidráulica cerca de la saturación.

Otros estudios destacables en este punto en los últimos años son los de Bryla y Duniway (1997), Casals *et al.* (2000), Enns *et al.* (2000), Reynolds *et al.* (2000), Augé *et al.* (2001), Joslin *et al.* (2001), Vander Willigen *et al.* (2001), Gibbons y Newbery (2002), Domec *et al.* (2004), Espeleta *et al.* (2004), Ryel *et al.* (2004), Zou *et al.* (2005), Miller *et al.* (2006), Aydin *et al.* (2008), Erzin y Erol (2007), Loik (2007) o Schoonmaker *et al.* (2007).

Como estudios curiosos en cuanto a la tipología de “suelo” empleado, Kościelniak *et al.* (2006), determinando el potencial en una solución nutritiva de cultivos empleada a tal efecto, simulando la desecación que sufriría el mismo.

6.4. Determinación de la conductividad hidráulica insaturada.

Relativamente en muy pocas ocasiones se ha descrito la relación agua/suelo mediante la determinación de la conductividad hidráulica y los gradientes de potencial de agua (Hsieh *et al.*, 1972).

Para la estimación de la conductividad hidráulica insaturada, requerida para conocer el flujo de agua en el suelo, se pueden emplear datos de retención de agua y de conductividad hidráulica saturada (Scanlon *et al.*, 1997). En ocasiones se hizo uso de la Psicrometría de cara a poder realizar dicha estimación. Así Mehuys *et al.* (1975) realizaron un estudio cuyo propósito era determinar si la conductividad hidráulica insaturada de suelos pedregosos se podía evaluar utilizando muestras de los mismos suelos en los cuales la fracción gruesa (> 2 mm) había sido excluida. Para ello hicieron uso de tensiómetros y TCPs para realizar las mediciones en muestras con y sin fracción gruesa. Dado que las piedras sostienen menos agua por unidad de volumen que la fracción del suelo, en las

muestras con piedras el procedimiento seguido dio lugar a una subestimación del contenido de agua real en la porción de suelo; siendo por tanto necesario aplicarles una corrección. Si la conductividad era expresada en función del potencial mátrico, los valores hidráulicos no saturados de la conductividad obtenidos con la metodología propuesta proporcionan una buena estimación de los valores que serían obtenidos incluyendo las piedras, incluso sin aplicarle ningún tipo de corrección.

Posteriormente, Daniel (1982) utilizando TCPs determinó la conductividad hidráulica insaturada de seis suelos, la cual con los datos de las curvas características de humedad también obtenidas y conocidos los límites del flujo, le permitió calcular, mediante el empleo de un programa de cálculo, los perfiles finales del contenido en agua. Para ello utilizó dos tipos de TCPs: un diseño tipo Spanner con una sola unión y otro diseño con doble unión (Hsieh y Hungate, 1970). Para la obtención de las curvas de humedad, los suelos fueron humedecidos lentamente para reducir al mínimo los efectos de la histéresis.

La conductividad hidráulica determinada conjuntamente con los gradientes de potencial, estos últimos determinados mediante el empleo de TCPs, permitieron a Enfield *et al.* (1973) evaluar el flujo profundo del agua en condiciones desérticas. Estudios en estas condiciones tan poco favorables los llevaron a cabo Hsieh *et al.* (1972) evaluando la eficiencia de los TCPs para la determinación de los gradientes de potencial de agua en estudios de la dinámica del movimiento de agua en zonas desérticas en donde no es viable utilizar otra instrumentación existente.

6.5. Comparación de metodologías en Psicrometría *per se*.

Las comparaciones (Tabla VIII.6) se producen en el caso de Gee *et al.* (1992) entre dos tipos de sensores psicrométricos. Ambos los aplicaron a suelos secos, requirieron la utilización de un WAM que compararon con un TCP de tipo Richards. Obtuvieron resultados más húmedos en el caso del TCP, basando esta diferencia en la gota que se introduce en el TCP, lo cual aumenta la humedad en el mismo. Esta explicación concuerda con la realizada con anterioridad por Zollinger *et al.* (1966), pues analizaron las diferencias entre los dos tipos distintos de TCPs, asemejándose los resultados en el caso de muestras más húmedas, si bien, existió una desviación importante en potenciales más negativos de 300 o 400 J/kg, incrementándose la diferencia con la sequedad de las muestras y obteniéndose valores superiores de potencial en el caso del tipo Richards.

Recientemente destacan los trabajos de Cardoso *et al.* (2007) comparando dos tipos de “*high-range psychrometers*”: “*SMI transistor psychrometer*” y “*chilled-mirror dew-point psychrometer*”.

6.6. Comparación de la Psicrometría con otras metodologías.

Al igual que sucede con las investigaciones realizadas con material vegetal, se han comparado distintas metodologías de cara a comprobar la bondad de los valores aportados por las mismas. Empleando muestras de suelos, se corroboraron los datos aportados por

distintos TCPs con la PP, un método sobradamente contrastado y que, por lo tanto, aporta resultados de gran fiabilidad (Tabla VIII.6).

Tabla VIII.6. “Comparación de diferentes metodologías en su aplicación a suelos”

Referencia	Tipo de TCP	Fabricante	Método*	Suelo utilizado ⁵¹	Método de comparación	Relación empírica
Zollinger et al. (1966)	Sp	---	P	Millville silt loam Draper loam Timpanogas silt loam Tacker loam.	R	<i>Potenciales secos:</i> $\Psi (R) > \Psi (Sp)$ <i>Potenciales húmedos:</i> $\Psi (R) = \Psi (Sp)$
Chow y de Vries (1973)	Sp	Fabricación propia	P	Silty clay Silty clay loam	POP	$\Psi (POP) = 16 + 0.99 * \Psi (Sp)$
Madsen et al. (1986)	R	Wescor	P	Loamy till Sandy till Two marine sand	PP	$\Psi (R) > \Psi (PP)$
Jones et al. (1990)	R	Decagon SC-10A	P	Texture from sand to silty clay loam	PP	$\Psi (R) > \Psi (PP)$
Gee et al. (1992)	D	CX1 Decagon Device	H	Quincy sand, mixed, mesic Xeric Torripsamment; Warden silt loam, coarse-silty, mixed, mesic Xerollic Camborthid; Backfill sediment consisting of quincy sand and coarse (gravelly) subsoil material	R	$\Psi (R) > \Psi (D)$
Rodríguez (2004)	D	WP4 Dewpoint PotentiaMeter	H	Gleysol; Cambisol; Fluvisol	PP	----

D: Dewpoint; R: Richards; Sp: Spanner; P: Psicrométrica; H: Higrométrica; POP: Plato poroso; PP: Placa de presión; () Método de medición.*

Madsen *et al.* (1986) realizaron una comparación entre las mediciones del potencial de agua del suelo con la PP y un TCP del tipo de Richards. Obtuvieron en todos los casos unos valores superiores del potencial total medido con el TCP que el medido con la PP, de forma que en el PWP la WRC que relaciona el potencial total con la humedad da un 3% (g/g) menos agua que la curva que relaciona el potencial matricial con la humedad. Por otro lado, Jones *et al.* (1990) evaluaron un TCP para medir el potencial del agua en el intervalo de -0,5 a -20 MPa, de modo que observaron que muestras tomadas de la PP a -1,5 MPa ofrecieron a menudo valores superiores a -1,5 MPa en 0,5 y 1 MPa, obteniendo de este modo resultados similares a los de Madsen *et al.* (1986). Su objetivo era comprobar la

⁵¹ Se mantienen los términos de denominación en inglés dada la dificultad de su traducción en algunas casuísticas.

estabilidad de calibración, la incertidumbre en las medidas y la precisión de la PP a -1,5 MPa.

Más actualmente, Rodríguez (2004) comparó los resultados aportados por un WAM con la PP, para la determinación de la reserva de agua útil (*available water content*) (AWC), obteniendo una buena concordancia entre ambos métodos a -1,5 MPa no siendo adecuada para potenciales de -0,033 MPa. Samingan y Schanz (2005) compararon cuatro métodos de medición, dos basados en TCPs (*“chilled mirror hygrometer technique”* y técnica psicrométrica) conjuntamente con el método del filtro de papel y un sensor de la HR, determinando que el método más preciso es la *“chilled mirror hygrometer technique”*. Recientemente, Patrick *et al.* (2007) han comparado las mediciones de potencial total con el método del papel de filtro y las mediciones *“chilled-mirror”*.

7. Conclusiones.

La revisión histórica realizada recoge la utilidad de la Psicrometría como medio para la determinación del potencial de agua, avalada por las investigaciones llevadas a cabo a lo largo de los años. La mayor parte del trabajo realizado se encamina a la medición del potencial de agua en zonas con interés agrícola o forestal, estando reducido su uso en otros frentes, pero alcanzando un gran desarrollo en el estudio del sistema suelo-planta-atmósfera. Dentro de estos, ha tenido una profusa aplicación a plantas, no siendo así para suelos, cuyo interés ha sido retomado en las últimas décadas provocando la aparición de un aparataje novedoso y específico para este tipo de muestras.

Se trata de un ámbito de estudio realmente complejo en el que pese a haber surgido hace más de 50 años se siguen encontrando problemas no fáciles de solventar. De esta forma, los TCPs pueden funcionar mediante tres técnicas distintas, estando dos de ellas ampliamente estudiadas (psicrométrica e higrométrica), pero quedando la tercera (*isopiestic*) relegada, sin motivo aparente, a escasos estudios y aplicaciones puntuales en material vegetal. Los principios de funcionamiento de estas técnicas han sido descritos en sus inicios, si bien actualmente no se difunden ni recogen profusamente en los distintos reviews realizados sobre el tema, lo cual ha provocado la inexistencia de un criterio definido y/o una nomenclatura adecuadas que perdurasen y facilitasen la descripción y denominación de las propias técnicas y de los instrumentos y elementos constituyentes implicados en el proceso. Es tal la escasa importancia que se le da a este hecho, que en los artículos no siempre es mencionado el TCP utilizado con la denominación adecuada que permita su identificación y no mencionándose tampoco la técnica implicada en el proceso.

Todo ello conlleva el desconocimiento adecuado de los aparatos en sus distintas aplicaciones, condición *sine qua nom* que dificulta la detección de los resultados erróneos aportados, salvo comparación con otros métodos más estables y contrastados. Los métodos de comparación empleados pueden basarse en Psicrometría o no. Dentro de estos últimos, son de destacar la PP, el método del tinte (*dye method*), o la *“pressure chamber”*, entre otros. La heterogeneidad obtenida en los resultados de los distintos métodos muestra la complejidad existente de cara a la elección del método más idóneo para las mediciones.

Existen multitud de artículos en los que es tratado el tema de los errores en las mediciones de potencial de agua con los TCPs, debiéndose a multitud de causas. Estas se pueden deber tanto al aparato, a la muestra, al sistema circundante o al propio operario. En material vegetal se presentan dificultades debidas a la propia fisiología de la planta, la existencia de gradiente térmicos o al tamaño y conservación de la humedad de la muestra, entre otras. En suelos la situación no se presenta mucho más esperanzadora dada la dependencia de estos sensores de la temperatura, tanto fluctuaciones como gradientes, siendo precisamente esta una de las características de los suelos *per se*. En ambos casos se exige un perfecto conocimiento de la técnica y aparato empleado por parte del operario así como la conservación de la muestra en las condiciones idóneas hasta la medición. No obstante, las condiciones externas son difíciles de controlar cuando se trabaja *in situ*, exigiendo condiciones isotérmicas en laboratorio. Para solventarlo, ha surgido un aparataje muy amplio y diverso en diseño y materiales, en un intento a veces fallido de solucionar las causas de error, pues su aplicación se reduce a problemas puntuales pero que no son válidos para la problemática en su conjunto, resultando poco versátiles en sus aplicaciones y condiciones de uso.

La aparición en la década de los noventa de los WAM revoluciona totalmente el campo de la Psicrometría, pues se trata de un tipo muy concreto de TCPs, versátil en sus aplicaciones y que no presenta aparentemente los problemas detectados en otros tipos de aparatos. Así, la consecución del tiempo de equilibrio adecuado, una menor dependencia de las condiciones externas, su fácil calibración y la obtención de medidas rápidas, fiables y estables parece garantizada. No obstante, han perdido en precisión frente a otros psicrómetros que demandan más tiempo en sus lecturas y su uso se restringe básicamente al laboratorio y que por tanto, y como todos los aparatos que no funcionan *in situ*, no son totalmente representativos de la realidad. Pese a ello, en la última década se emplearon profusamente y esa utilización continúa hoy en día.

En los últimos tiempos el funcionamiento de los WAM se ha visto mejorado consiguiendo un mayor control de la temperatura, permitiendo su regulación y mantenimiento constate en el interior del aparato, pero no estando estos todavía muy difundidos.

Las conclusiones expuestas en este capítulo plantean una serie de hipótesis iniciales y pautas de trabajo en los siguientes capítulos contenidos en esta memoria. Por un lado se ubican los WAMs dentro de la Psicrometría, describiéndolos y diferenciándolos de otros modelos de TCPs, recopilando exhaustivamente durante este proceso la nomenclatura utilizada a tal efecto. La evolución histórica de los TCPs los presenta como dispositivos que requieren un estudio de la aplicabilidad a las muestras consideradas y la fiabilidad de las determinaciones con ellos realizadas, necesitando de métodos de comparación y/o complementarios, siendo precisos estudios colaterales que determinen las causas de los posibles errores que se puedan producir. Por ello que se considere de especial interés un estudio detallado de la tipología de TCPs más novedosa y escasamente estudiada, los WAMs, tratándose estos y otros aspectos en los capítulos de esta memoria.

8. Referencias bibliográficas.

- Akmal, M.; Hirasawa, T.** 2004. Growth responses of seminal roots of wheat seedling to a reduction in the water potential of vermiculite. *Plant and Soil*. **267**: 319-328.
- Amaral da Silva, E.A.; Toorop, P.E.; van Aelst, A.C.; Hilhorst, H.W.M.** 2004. Abscisic acid controls embryo growth potential and endosperm cap weakening during coffee (*Coffea arabica* cv. Rubi) seed germination. *Planta*. **220**: 251-261.
- Anderson, C.E.; Stormont, J.C.** 2003. Laboratory measurement of soil moisture at capillary potential greater than 1500 kPa. Engineering Behavior of Unsaturated soils. 82nd Annual Meeting. Washington, D.C.
- Andraski, B.J.; Scanlon, B.R.** 2002. Thermocouple Psychrometry. En: Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. Ed. J.H. Dane & G.C Topp. Soil Science Society of America. Madison, Wis. pp: 609-642.
- Apostol, K.G.; Zwiazek, J.J.; MacKinnon, M.D.** 2004. Naphthenic acids affect plant water conductance but do not alter shoot Na⁺ and Cl⁻ concentrations in jack pine (*Pinus banksiana*) seedlings. *Plant and Soil*. **263**: 183-190.
- Augé, R.M.; Duan, X.; Croker, J.L.; Witte, W.T.; Green, C.D.** 1998. Foliar dehydration tolerance of twelve deciduous tree species. *Journal of Experimental Botany*. **49** (321): 753-759.
- Augé, R.M.; Stodola, A.J.W.; Tims, J.E.; Saxton, A.M.** 2001. Moisture retention properties of a mycorrhizal soil. *Plant and Soil*. **230**: 87-97.
- Aydin, M.; Yano, T.; Evrendilek, F.; Uygur, V.** 2008. Implications of climate change for evaporation from bare soils in a Mediterranean environment. *Environmental Monitoring and Assessment*. **140** (1-3): 123.
- Ayele, M.; Blum, A.; Nguyen, H.T.** 2001. Diversity for osmotic adjustment and root depth in TEF [*Eragrostis tef* (Zucc) Trotter]. *Euphytica*. **121**: 237-249.
- Babu, R.C.; Zhang, J.; Blum, A.; Ho, T.-H.D.; Wu, R.; Nguyen, H.T.** 2004. *HVA1*, a LEA gene from barley confers dehydration tolerance in transgenic rice (*Oryza sativa* L.) via cell membrane protection. *Plant Science*. **166**: 855-862.
- Barker, J.R.; McKell, C.M.** 1983. Habitat differences between Basin and Wyoming big sagebrush in contiguous populations. *Journal of Range Management*. **36** (4): 450-454.
- Barreto-Riquelme, U.F.; Santi, G.R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.** 2004. Curvas de retenção de água e condutividade hidráulica do solo em sistemas de manejo do feijoeiro. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Santa Maria. 25 a 30 julho 2004.

- Barrs, H.D.** 1964. Heat of respiration as a possible cause of error in the estimation by psychrometric methods of water potential in plant tissue. *Nature*. **203**: 1136-1137.
- Barrs, H.D.** 1965. Psychrometric measurement of leaf water potential: lack of error attributable to leaf permeability. *Science*. **149**: 63-65.
- Barrs, H.D.** 1968. Determination of water deficits in plant tissues. En: Water deficits and plant growth. T.T. Kozlowski, ed. Academic Press. New York. Vol. I. pp:235-368.
- Barrs, H.D.** 1972. Some observations on construction and design criteria of thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. Van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 65-67.
- Barrs, H.D.; Kramer, P.J.** 1969. Water potential increase in sliced leaf tissue as a cause of error in vapor phase determinations of water potential. *Plant Physiology*. **44**: 959-964.
- Baughn, J.W.; Tanner, C.B.** 1976a. Leaf water potential: comparison of pressure chamber and *in situ* hygrometer on five herbaceous species. *Crop Science*. **16**:181-184.
- Baughn, J.W.; Tanner, C.B.** 1976b. Excision effects on leaf water potential of five herbaceous species. *Crop Science*. **16**: 184-190.
- Beckett, R.P.** 1996. Some aspects of the water relations of the lichen *Parmotrema tinctorum* measured using thermocouple psychrometry. *Lichenologist*. **28**: 257-266. Part 3.
- Bennett, J.M.; Cortes, P.M.** 1985. Errors in measuring water potentials of small samples resulting from water adsorption by thermocouple psychrometer chambers. *Plant Physiology*. **79**: 184-188.
- Bennett, J.M.; Cortes, P.M.; Lorens, G.F.** 1986. Comparison of water potential components measured with a thermocouple psychrometer and a pressure chamber and the effects of starch hydrolysis. *Agronomy Journal*. **78**: 239-244.
- Bingham, G.E.; Johnson, M.N.; Lemon, E.R.** 1972. Influence of heat sink design on thermocouple psychrometer response. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 88-93.
- Bower, J.P.** 1985. Some aspects of water relations on Avocado *Persea americana* (Mill.) tree and fruit physiology. Doctoral Thesis. University of Natal. Faculty of Agriculture. Pietermaritzburg.

- Box, J.E., Jr.** 1965. Measurement of water stress in cotton plant leaf disc with a thermocouple psychrometer. *Agronomy Journal*. **57**: 367-370.
- Boyer, J.S.** 1966. Isopiestic Technique: Measurements of accurate leaf water potentials. *Science*. **154**: 1459-1460.
- Boyer, J.S.** 1967. Leaf water potentials measured with a pressure chamber. *Plant Physiology*. **42**: 133-137.
- Boyer, J.S.** 1969. Measurement of the water status of plants. *Annual Review of Plant Physiology*. **20**: 351-364.
- Boyer, J.S.** 1972a. Use of isopiestic technique in thermocouple psychrometry. I. Theory. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 51-55.
- Boyer, J.S.** 1972b. Use of isopiestic technique in thermocouple psychrometry. II. Construction. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 98-102.
- Boyer, J.S.** 1972c. Use of isopiestic technique in thermocouple psychrometry. III. Application to plants. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 220-223.
- Boyer, J.S.** 1995. Measuring the water status of plants and soil. Academic Press. USA.
- Boyer, J.S.; Potter, J.R.** 1973. Chloroplast response to low leaf water potentials. *Plant Physiology*. **51**: 989-992.
- Brown, P.W.; Tanner, C.B.** 1981. Alfalfa water potential measurement: a comparison of the pressure chamber and leaf dew-point hygrometers. *Crop Science*. **21**: 240-244.
- Brown, R.W.** 1969. Leaf sampler for relative water content measurements: design and application. *Agronomy Journal*. **61**: 644-647.
- Brown, R.W.** 1970. Measurement of water potential with thermocouple psychrometers: construction and applications. USDA. Forest Service Research Paper. Department of Agriculture, Ogden, Utah.
- Brown, R.W.** 1972. Determination of leaf osmotic potential using thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 198-209.

- Brown, R.W.** 1976. New technique for measuring the water potential of detached leaf samples. *Agronomy Journal*. **68**: 432-434.
- Brown, R.W.; Chambers, J.C.** 1987. Measurements of *in situ* water potential with thermocouple psychrometers: a critical evaluation. En: Proc. Intl. Conf. on Measurements of Soil and Plant water status. Ed. Hanks, R.J.; Brown, R.W. Utah State Univ., Logan, U.T. Agricultural Experiment Station. pp: 125-136.
- Brown, R.W.; Collins, J.M.** 1980. A screen-caged thermocouple psychrometer and calibration chamber for measurements of plant and soil water potential. *Agronomy Journal*. **72**: 851-854.
- Brown, R.W.; Johnston, R.S.** 1976. Extended field use of screen-covered thermocouple psychrometers. *Agronomy Journal*. **68**: 995-996.
- Brown, R.W.; McDonough, W.T.** 1977. Thermocouple psychrometer for *in situ* leaf water potential determinations. *Plant and Soil*. **48**: 5-10.
- Brown, R.W.; Oosterhuis, D.M.** 1992. Review and interpretation. Measuring plant and soil water potentials with thermocouple psychrometers: Some concerns. *Agronomy Journal*. **84**: 78-86.
- Brown, R.W.; van Haveren, B.P.** 1972. Psychrometry in water relations research; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan.
- Brunini, O.; Thurtell, G.W.** 1982. An improved thermocouple hygrometer for *in-situ* measurements of soil water potential. *Soil Science Society of America Journal*. **46**: 900-904.
- Brye, K.R.** 2003. Long-term effects of cultivation on particle size and water-retention characteristics determined using wetting curves. *Soil Science*. **168** (7): 459-468.
- Bryla, D.R.; Duniway, J.M.** 1997. Effects of mycorrhizal infection on drought tolerance and recovery in safflower and wheat. *Plant and Soil*. **197**: 95-103.
- Caldwell, M.M.; Caldwell, M.L.** 1970. A fine wire psychrometer for measurement of humidity in the vegetation layer. *Ecology*. **51** (1): 918-920.
- Calissendorff, C.; Gardner, W.H.** 1972. A temperature-compensated leaf psychrometer for *in situ* measurements of water potential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 224-228.
- Campbell, C.S.; McInnes, K.J.** 1999. Response *in situ* leaf psychrometer to cuticle removal by abrasion. *Agronomy Journal*. **91**: 859-862.

- Campbell, E.C.** 1972. Vapor sink and thermal gradient effects on psychrometer calibration. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 94-97.
- Campbell, E.C.; Campbell, G.S.; Barlow, W.K.** 1973. A dewpoint hygrometer for water potential measurement. *Journal of Agricultural Meteorology*. **12**: 113-121.
- Campbell, G.S.** 1979. Improved thermocouple psychrometers for measurement of soil water potential in a temperature gradient. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. **12**: 739-743.
- Campbell, G.S.; Campbell, M.D.** 1974. Evaluation of a thermocouple hygrometer for measuring leaf water potential in situ. *Agronomy Journal*. **66**: 24-27.
- Campbell, G.S.; Gardner, W.H.** 1971. Psychrometric measurement of soil water potential: temperature and bulk density effects. *Soil Science Society of America Proceedings Journal*. **35**: 8-12.
- Campbell, G.S.; Smith, D.M.; Teare, B.L.** 2007. Application of dew point method to obtain the soil water characteristic. En: Experimental Unsaturated Soil Mechanisc. Vol. 112. Parte II. Springer Proceedings in Physics.
- Campbell, G.S.; Trull, J.W.; Gardner, W.H.** 1968. A welding technique for Peltier thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Proceedings*. **32**: 887-889.
- Campbell, G.S.; Wilson, A.M.** 1972. Water potential measurements of soil samples. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 142-149.
- Campbell, G.S.; Zollinger, W.D.; Taylor, S.A.** 1966. Sample charger for thermocouple psychrometers: construction and some applications. *Agronomy Journal*. **58**: 315-318.
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Cardoso, R.; Romero, E.; Lima, A.; Ferrari, A.** 2007. A comparative study of soil suction measurement using two different high-range psychrometers. En: Experimental Unsaturated soil Mechanics. Vol. 112. Part. I. pp: 79-93.
- Cary, J.W.; Hanks, R.J.** 1972. The usefulness of water potential measurements in soil and related media. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 137-141.

- Casals, P.; Romanyà, J.; Cortina, J.; Bottner, P.; Coûteaux, M.-M.; Ramon, V.** 2000. CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*. **48**: 261-281.
- Cavaliere, A.J.; Boyer, J.S.** 1982. Water potentials induced by growth in soybean hypocotyls. *Plant Physiology*. **69**: 492-496.
- Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Santi, G.R.; Paulleto, E.; Leitske, V.W.; Spinelli-Pinto, L.F.** 2002. Retenção de água medida pelo método de placas porosas de Richards e pelo psicrômetro de termopar. XIX RBMCSA Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Cuiabá, M.T. 21 a 26 de julho 2002.
- Comstock, J.P.** 2000. Correction of thermocouple psychrometer readings for the interaction of temperature and actual water potential. *Crop Science*. **40**: 709-712.
- Costa, A.; Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J.; Mafra, A.L.; Bayer, C.; Passos, J.F.M.; Fontoura, S.M.V.; Camilo, K.C.** 2003. Variação temporal da humidade e água disponível em um Latossolo Bruno sob cinco sistemas de manejo. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Ribeirão Preto. S.P. 13 a 18 julho 2003.
- Chow, T.L.; de Vries, J.** 1973. Dynamic measurement of soil and leaf water potential with a double loop Peltier type thermocouple psychrometer. *Soil Science Society of America Proceedings*. **37**: 181-188.
- Dalton, F.N.; Rawlins, S.L.** 1968. Design criteria for Peltier-effect thermocouple psychrometers. *Soil Science*. **105** (1): 12-17.
- Daniel, D.E.** 1982. Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Journal*. **46**: 1125-1129.
- Daws, M.I.; Lydall, E.; Chmielorz, P.; Leprince, O.; Matthews, S.; Thanos, C.A.; Pritchard, H.W.** 2004. Developmental heat sum influences recalcitrant seed traits in *Aesculus hippocastanum* across Europe. *New Phytologist*. **162**: 157-166.
- Decagon Devices.** 2003a. Measurement of leaf water potential using the WP4. Application note. Fecha consulta: 30/12/2003. Disponible en: <http://www.decagon.com/wp4>
- Decagon Devices.** 2003b. Seed longevity in storage is enhanced by controlling water activity. Application note. Fecha consulta: 30/12/2003. Disponible en: <http://www.decagon.com/wp4>
- De Medeiros-Silveira, F.; Santi, G.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Calesso, R.; Gubiani, P.I.; Collares, G.L.** 2004. Estimativa da retenção de água através de pedofunções para alguns solos brasileiros. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Santa María. 25 a 30 julho 2004.

- Díaz-Zorita, M.; Grove, J.H.; Murdock, L.; Herbeck, J.; Perfect, E.** 2004. Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no-till production system. *Agronomy Journal*. **96**: 1651-1659.
- Dik, A.J.; Elad, Y.** 1999. Comparison of antagonist of *Botrytis cinerea* in greenhouse-grown cucumber and tomato under different climatic conditions. *European Journal of Plant Pathology*. **105**: 123-137.
- Dixon, M.; Grace, J.** 1982. Water uptake by some chamber materials. *Plant, Cell and Environment*. **5**: 323-327.
- Dixon, M.A.; Grace, J.; Tyree, M.T.** 1984. Concurrent measurements of stem density, leaf and stem water potential, stomatal conductance and cavitation on a sapling of *Thuja occidentalis* L. *Plant, Cell and Environment*. **7**: 615-618.
- Dixon, M.A.; Tyree, M.T.** 1984. A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb. *Plant, Cell and Environment*. **7**: 693-697.
- Domec, J.C.; Warren, J.M.; Meinzer, F.C.; Broks, J.R.; Coulombe, R.** 2004. Native root xylem embolism stomatal closure in stands of douglas-fir and ponderosa pine: mitigation by hydraulic redistribution. *Oecologia*. **141**: 7-16.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O.** 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. pp:179.
- Duniway, J.M.** 1971. Comparison of pressure chamber and thermocouple psychrometer determinations of leaf water status in tomato. *Plant Physiology*. **48**: 106-107.
- Durner, W.; Or, D.** 2005. Soil water potential measurement. En: Encyclopedia of Hydrological Sciences. Ed. M.G. Anderson. John Wiley & Sons, Ltd. pp: 1089-1102.
- Easter, S.J.; Sosebee, R.E.** 1974. Use of thermocouple psychrometry in field studies of soil-plant-water relationships. *Plant and Soil*. **40**: 707-712.
- Easter, S.J.; Sosebee, R.E.** 1975. Influence of soil-water potential on the water relationships of Honey Mesquite. *Journal of Range Management*. **28** (3): 230-232.
- Eddleman, L.E.; Nimlos, T.J.** 1972. Growth rates of native grasses and soil water potential as measured with thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 231-236.
- Ehlig, C.F.** 1962. Measurement of energy status of water in plants with a thermocouple psychrometer. *Plant Physiology*. **37**: 288-290.

- Ehret, D.L.; Lau, A.; Bittman, S.; Lin, W.; Shelford, T.** 2001. Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie*. **21**: 403-414.
- Enfield, C.G.; Hsieh, J.J.C.; Warric, A.W.** 1973. Evaluation of water flux above a deep water table using thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Proceedings*. **37**: 968-970.
- Enns, L.C.; Canny, M.J.; McCully, M.E.** 2000. An investigation of the role of solutes in the xylem sap and in the xylem parenchyma as the source of root pressure. *Protoplasma*. **211**: 183-197.
- Erzin, Y.; Erol, O.** 2007. Swell pressure prediction by suction methods. *Engineering Geology*. **92**: 133-145.
- Espeleta, J.F.; West, J.B.; Donovan, L.A.** 2004. Species-specific patterns on hydraulic lift in co-occurring adult trees and grasses in a sandhill community. *Oecologia*. **138**: 341-349.
- FAO.** 2003. Handling and preservation of fruits and vegetables by combined methods for rural areas. Technical manual. Agricultural Services. Bulletin 149.
- Fatima, S.; Farooqi, A.H.A.; Sharma, S.** 2002. Physiological and metabolic responses of different genotypes of *Cymbopogon martinii* and *C. winterianus* to water stress. *Plant Growth Regulation*. **37**: 143-149.
- Ficus, E.L.** 1972. In situ measurement of root-water potential. *Plant Physiology*. **50**: 191-193.
- Flint, A.L.; Campbell, G.S.; Ellet, K.M.; Calissendorff, C.** 2002. Calibration and temperature correction of heat dissipation matrix potential sensors. *Soil Science Society of America Journal*. **66**: 1439-1445.
- Frank, A.B.; Power, J.F.; Willis, W.O.** 1973. Effect of temperature and plant water stress on photosynthesis, diffusion resistance, and leaf water potential in spring wheat. *Agronomy Journal*. **65**: 777-780.
- Fujimaki, H.; Inoue, M.** 2003. A transient evaporation method for determining soil hydraulic properties at low pressure. *Vadose Zone Journal*. **2**: 400-408.
- Gardner, W.R.; Dalton, F.N.; Harris, R.F.** 1972. Thermocouple psychrometer for the study of water relations of soil microorganisms. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 150-153.
- Gee, G.W.; Campbell, M.D.; Campbell, G.S.; Campbell, J.H.** 1992. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 1068-1070.

- Gelb, G.H.; Marcus, B.D.; Dropkin, D.** 1964. Manufacture of fine wire thermocouple probes. *The Review of Scientific Instruments*. **35**: 80-81.
- Gibbons, J.M.; Newbery, D.M.** 2002. Drought avoidance and the effect of local topography on trees in the understorey of Bornean lowland rain forest. *Plant Ecology*. **164**: 1-18.
- Gollan, T.; Turner, N.C.; Schulze, E.-D.** 1985. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. III. In the Sclerophyllous woody species *Nerium oleander*. *Oecologia*. **65**: 356-362.
- Gopal, J.; Iwama, K.** 2007. In vitro screening of potato against water-stress mediates through sorbitol and polyethylene glycol. *Plant Cell Reports*. **26**: 693-700.
- Gordon, D.R.; Rice, K.J.** 2000. Competitive suppression of *Quercus douglasii* (Fagaceae) seedling emergence and growth. *American Journal of Botany*. **87** (7): 986-994.
- Gounot, M.; Monteny, B.** 1967. Mise au point d'une méthode thermoélectrique (Effet Peltier) pour déterminer le potentiel hydrique d'un tissu végétal ou d'un sol. Documents Techniques N°31. Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie. I.N.R.A.T. ARIANA (Tunisie).
- Guichard, S.; Gary, C.; Leonardi, Ch; Bertin, N.** 2005. Analysis of growth and water relations of tomato fruits in relation to air vapor pressure deficit and plant fruit load. *Journal of Plant Growth Regulation*. **24**: 201-213.
- Hanson, B.R.; May, D.M.** 2006. Crop evaporation of processing tomato in the San Joaquin Valley of California, USA. *Irrigation Science*. **24**: 211-221.
- Hardegree, S.P.** 1989. Xylem water holding capacity as a source of error in water potential estimates made with the pressure chamber and thermocouple psychrometer. *American Journal of Botany*. **76** (3): 356-360.
- Hillel, D.** 1998. Environmental soil physics. Academic Press. USA.
- Hoffman, G.J.; Herkelrath, W.N.; Austin, R.S.** 1969. Simultaneous cycling of Peltier thermocouple psychrometers for rapid water potential measurements. *Agronomy Journal*. **61**: 597-601.
- Hoffman, G.J.; Oster, J.D.; Merrill, S.D.** 1972. Automated measurement of water potential and its components using thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 123-130.
- Hoffman, G.J.; Rawlins, S.L.** 1972. Silver-foil psychrometer for measuring leaf water potential in situ. *Science*. **177**: 802-804.

- Hoffman, G.J.; Splinter, W.E.** 1968. Water potential measurements of an intact plant-soil system. *Agronomy Journal*. **60**: 408-413.
- Holmes, T.H.; Rice, K.J.** 1996. Patterns of growth and soil-water utilization in some exotic annuals and native perennial bunchgrasses of California. *Annals of Botany*. **78**: 233-243.
- Hsieh, J.J.C.; Enfield, C.G.; Hungate, F.P.** 1972. Application of temperature-compensated psychrometers to the measurement of water potential gradients. En: *Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers*. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 154-158.
- Hsieh, J.J.C.; Hungate, F.P.** 1970. Temperature compensated Peltier psychrometer for measuring plant and soil water potentials. *Soil Science*. **110** (4): 253-257.
- Huang, B.** 1999. Water relations and root activities of *Buchloe dactyloides* and *Zoysia japonica* in response to localized soil drying. *Plant and Soil*. **208**: 179-186.
- Huang, B.; Fu, J.** 2000. Photosynthesis, respiration, and carbon allocation of two cool-season perennial grasses in response to surface soil drying. *Plant and Soil*. **227**: 17-26.
- Hura, T.; Hura, K.; Grzesiak, M.; Rzepka, A.** 2007. Effect of long-term drought stress on leaf gas exchange and fluorescence parameters in C₃ and C₄ plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. **29**: 103-113.
- Ingvalson, R.D.; Oster, J.D.; Rawlins, S.L.; Hoffman, G.J.** 1970. Measurement of water potential and osmotic potential in soil with combined thermocouple psychrometer and salinity sensor. *Soil Science Society of America Proceedings*. **34**: 570-574.
- Ishikawa, C.M.; Bledsoe, C.S.** 2000. Seasonal and diurnal patterns of soil water potential in the rhizosphere of blue oaks: evidence for hydraulic lift. *Oecologia*. **125** (4): 459-465.
- Izbicki, J.A.; Radyk, J.; Michel, R.L.** 2002. Movement of water through the thick unsaturated zone underlying Oro Grande and Sheep Creek Washes in the western Mojave Desert, USA. *Hydrogeology Journal*. **10**: 409-427.
- Jobling, J.J.; Patterson, B.D.; Moradi, S.; Joyce, D.** 1997. A non-destructive method for measuring the water potential of fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*. **10** (1): 1-8.
- Johnson, R.W.; Dixon, M.A.; Lee, D.R.** 1992. Water relations of the tomato during fruit-growth. *Plant Cell and Environment*. **15** (8): 947-953.
- Joly, R. J.** 1985. Techniques for determining seedling water status and their effectiveness in assessing stress. En: *Proceedings: Evaluating seedling quality: principles,*

- procedures, and predictive abilities of major test. Ed. Duryea, M.L. Workshop held October 16-18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. pp: 17-28.
- Jones, T.L.; Gee, G.W.; Heller, P.R.** 1990. Psychrometric measurement of soil water potential: stability of calibration and test of pressure-plate samples. *Soil Science*. **150**: 535-541.
- Joslin, J.D.; Wolfe, M.H.; Hanson, P.J.** 2001. Factors controlling the timing of root elongation intensity in a mature upland oak stand. *Plant and Soil*. **228**: 201-212.
- Karyudi; Fletcher, R.J.** 2002. Osmoregulative capacity in birdseed millet under conditions of water stress. I. Variation in *Setaria italica* and *Panicum miliaceum*. *Euphytica*. **125**: 337-348.
- Karyudi; Fletcher, R.J.** 2003. Osmoregulation in birdseed millet under conditions of water stress. II. Variation in F3 of *Setaria italica* and its relationship to plant morphology and yield. *Euphytica*. **132**: 191-197.
- Kijne, J.W.; Taylor, S.A.** 1963. A constant temperature bath controlled with a precision of 0,001° centigrade. *Soil Science*. **27**: 110.
- Kitchen, J.H.; Thames, J.L.** 1972. Pulsed thermistor psychrometer for measuring vapor pressure differential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 113-119.
- Klute, A.; Richards, L.A.** 1962. Effect of temperature on relative vapor pressure of water in soil: apparatus and preliminary measurements. *Soil Science*. **93**: 391-396.
- Knipling, E.B.; Kramer, P.J.** 1967. Comparison of the Dye method with the thermocouple psychrometer for measuring leaf water potentials. *Plant Physiology*. **42**: 1315-1320.
- Kobayashi, Y.; Tanaka, T.** 2001. Water low and hydraulic characteristics of Japanese red pine and oak trees. *Hydrological Processes*. **15**: 1731-1750.
- Koorevaar, P.; Janse, A.R.P.** 1972. Some design criteria of thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 74-83.
- Kościelniak, J.; Filek, W.; Biesaga-Kościelniak, J.** 2006. The effect of drought stress on chlorophyll fluorescence in *Lolium-Festuca* hybrids. *Acta Physiologiae Plantarum*. **28** (2): 149-158.
- Kramer, P.J.** 1972. Contributions of thermocouple psychrometers to plant science. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on

Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 187-193.

Kunz, M.; Da Silva, V.R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Kaiser, D.R.; Pellegrini, A. 2003. Determinação da capacidade de campo em diferentes níveis de compactação em um Latossolo Argiloso. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, S.P. 13 a 18 julho 2003.

Lambert, J.R.; van Schilfgaarde, J. 1965. A method of determining the water potential of intact plants. *Soil Science*. **100**: 1-9.

Lang, A.R.G. 1968. Psychrometric measurement of soil water potential *in situ* under cotton plants. *Soil Science*. **106** (6): 460-464.

Lang, A.R.G.; Trickett, E.S. 1965. Automatic scanning of Spanner and droplet psychrometers having outputs up to 30 μ V. *Journal Scientific Instruments*. **42**: 777-782.

Leong, E.-C.; Tripathy, S.; Rahardjo, H. 2003. Total suction measurement of unsaturated soils with device using the chilled-mirror dewpoint technique. *Géotechnique*. **53** (2): 173-182.

Liu, M.Z.; Jiang, G.M.; Niu, S.L.; Li, Y.G.; Gao, L.M.; Ding, L.; Peng, Y. 2003. Photosynthetic response to soil water contents of an annual pioneer C4 grass (*Agriophyllum squarrosum*) in Hunshandak Sandland, China. *Photosynthetica*. **41** (2): 293-296.

Livingston, N.J. 1993. Soil water potential. En: Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Carter, M.R. Lewis Publishers. pp: 559-567.

Loik, M.E. 2007. Sensitivity of water relations and photosynthesis to summer precipitation pulses for *Artemisia tridentata* and *Purshia tridentata*. *Journal of Plant Ecology Advance Access*. **191**: 95-108.

Lopushinsky, W. 1972. A microwelder for the construction of thermocouple junctions of Peltier effect thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 84-87.

Lopushinsky, W. 1990. Seeling Moisture Status. En: Proceedings, Western Forest Nursery Association. Ed. Rose, R.; Campbell, S.J.; Landis, T. D. General Technical Report RM-200. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. pp: 123-138.

Ludwig, F.; Dawson, T.E.; Kroon, H.; Berendse, F.; Prins, H.H.T. 2003. Hydraulic lift in *Acacia tortilis* trees on an East African Savanna. *Oecologia*. **134**: 293-300.

- Machado, S.; Paulsen, G.M.** 2001. Combined effects of drought and high temperature on water relations of wheat and sorghum. *Plant and Soil*. **233**: 179-187.
- Madsen, H.B.; Jensen, C.R.; Boysen, T.** 1986. A comparison of the thermocouple psychrometer and the pressure plate methods for determination of soil water characteristic curves. *Journal of Soil Science*. **37**: 357-362.
- Majerus, M.E.** 1975. Response of root and shoot growth of three grass species to decreases in soil water potential. *Journal of Range Management*. **28** (6): 473-476.
- Marin, F.R.; Angelocci, L.R.; Coelho Filho, M.A.; Villa Nova, N.A.** 2001. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agricola*. **58** (4): 839-844.
- Martre, P.** 1999. Architecture hydraulique d'une tallede Féstuque Élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.). Implications pour les relations entre la transpiration et l'expansion foliaire. Thèse doctorale. Université de Poitiers. Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées.
- Martre, P.; North, G.B.; Bobich, E.G.; Nobel, P.S.** 2002. Root deployment and shoot growth for two desert species in response to soil rockiness. *American Journal of Botany*. **89**: 1933-1939.
- Mattsson, A.** 1996. Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forest*. **13**: 223-248.
- McAneney, K.J.; Tanner, C.B.; Gardner, W.R.** 1979. An in-situ dewpoint hygrometer for soil water potential measurement. *Soil Science Society of America Journal*. **43**: 641-645.
- McBurney, T.; Costigan, P.A.** 1984. Rapid oscillations in plant water potential measured with a stem psychrometer. *Annals of Botany*. **54**: 851-853.
- McBurney, T.; Costigan, P.A.** 1987. Plant water potential measured continuously in the field. *Plant and Soil*. **97**: 145-149.
- McBurney, T.; Costigan, P.A.** 1988. Continuous measurement of plant water stress. IV International Symposium on Water Supply and Irrigation in the Open and under Protected Cultivation. ISHS Acta Horticulturae 228.
- McDonough, W.T.** 1972. Grass seedling emergence as influenced by soil water potential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 229-230.
- Meeuwig, R.O.** 1972. A low-cost thermocouple psychrometer recording system. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 131-135.

- Mehuys, G.R.; Stolzy, L.H.; Letey, J.; Weeks, L.V.** 1975. Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. **39**: 37-42.
- Melkonian, J.; Yu, L.-X.; Setter, T.L.** 2004. Chilling responses of maize (*Zea mays* L.) seedlings: root hydraulic conductance, abscisic acid, and stomatal conductance. *Journal of Experimental Botany*. **55** (403): 1751-1760.
- Mendonça, E.S.; Stott, D.E.** 2003. Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil. *Agroforestry Systems*. **57**: 117-125.
- Merva, G.E.; Kilic, N.** 1972. A multichannel facility for studying water potential distributions in the root zone under simulated field conditions. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 159-164.
- Merrill, S.D.; Rawlins, S.L.** 1972. Field measurement of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Science*. **113**: 102-109.
- Meyn, R.L.; White, R.S.** 1972. Calibration of thermocouple psychrometers: a suggested procedure for development of a reliable predictive model. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 56-64.
- Michel, B.E.** 1977. A miniature stem thermocouple hygrometer. *Plant Physiology*. **60**: 645-647.
- Michel, B.E.** 1979. Correction of thermal gradient errors in stem thermocouple hygrometers. *Plant Physiology*. **63**: 221-224.
- Millar, A.A.; Lang, A.R.G.; Gardner, W.R.** 1970. Four-terminal Peltier type thermocouple psychrometer for measuring water potential in nonisothermal systems. *Agronomy Journal*. **62**: 705-708.
- Miller, C.J.; Yesiller, N.; Yaldo, K.; Merayyan, S.** 2003. Closure to “impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. **129** (12): 1169-1170.
- Miller, M.E.; Belnap, J.; Beatty, S.W.; Reynolds, R.L.** 2006. Performance of *Bromus tectorum* L. in relation to soil properties, water additions, and chemical amendments in calcareous soils of southeastern Utah, USA. *Plant and Soil*. **288**: 1-18.

- Mingo, D.M.; Theobald, J.C.; Bacon, M.A.; Davies, W.J.; Dodd, I.C.** 2004. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: enhancement of root growth. *Functional Plant Biology*. **31**: 971-978.
- Mohsin, M.A., Ghildyal, B.P.** 1972. Desing criteria of thermocouple psychrometers for water potential measurements in plants. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 68-73.
- Monteith, J.L.** 1954. Error and accuracy in thermocouple psychrometry. *Proceedings of the Physical Society*. **67**:217-226.
- Moore, R.T.; Caldwell, M.M.** 1972. The field use of thermocouple psychrometers in desert soils. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 165-169.
- Mullins, C.E.** 2001. Matric potential. En: Soil and Environmental Analysis: Physical Methods (2nd Edn). (Smith, K.A.; Mullins, C., eds). Marcel Dekker, New York, USA. pp: 65-93.
- Mungur, R.; Wood, A.J.; Lightfoot, D.A.** 2006. Water potential is maintained during water deficit in *Nicotiana tabacum* expressing the *Escherichia coli* glutamate dehydrogenase gene. *Plant Growth Regulation*. **50**: 231-238.
- Nelsen, C.E.; Safir, G.R.; Hanson, A.D.** 1978. Water potential in excised leaf tissue. Comparison of a commercial dew point hygrometer and a thermocouple psychrometer on soybean, wheat, and barley. *Plant Physiology*. **61**: 131-133.
- Neumann, H.H.; Thurtell, G.W.** 1972. A Peltier cooled thermocouple dewpoint hygrometer for in situ measurement of water potentials. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 103-112.
- Niu, S.L.; Li, L.H.; Jiang, G.M.; Gao, L.M. ; Li, Y.G.; Peng, Y.; Liu, M.Z.** 2004. Gas exchange and chlorophyll fluorescence response to simulated rainfall in *Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*. *Photosynthetica*. **42** (1): 1-6.
- Nonami, H.; Boyer, J.S.** 1993. Direct demonstration of a growth-induced water potential gradient. *Plant Physiology*. **102** (1): 13-19.
- Oosterhuis, D.M.** 1987. A technique to measure the components of root water potential using screen-caged thermocouple psychrometers. *Plant and Soil*. **103**: 285-288.

- Oosterhuis, D.M.; Savage, M.J.; Walter, S.** 1983. Field use of *in situ* leaf psychrometers for monitoring water potential of a soybean crop. *Field Crops Research*. **7**: 237-248.
- Oster, J.D.; Rawlins, S.L.; Ingvalson, R.D.** 1969. Independent measurement of matric and osmotic potential of soil water. *Soil Science Society of America Proceedings*. **33**: 188-192.
- Packer, P.E.** 1972. Use of thermocouple psychrometers in forestry. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 41-42.
- Papendick, R.I.; Cochran, V.L.; Woody, W.M.** 1971. Soil water potential and water content profiles with wheat under low spring and summer rainfall. *Agronomy Journal*. **63**: 731-734.
- Passioura, J.B.** 2001. Plant-water relations. Encyclopedia of Life Sciences (*on line*). pp: 1-7.
- Patrick, P.K.; Olsen, H.W.; Higgins, J.D.** 2007. Comparison of chilled-mirror measurements and filter paper estimates of total soil suction. *Geotechnical Testing Journal*. **30** (5): 360-367.
- Peck, A.J.** 1968. Theory of the Spanner psychrometer, 1. The thermocouple. *Journal of Agricultural Meteorology*. **5**: 433-447.
- Peck, A.J.** 1969. Theory of the Spanner psychrometer, 2. Sample effects and equilibration. *Journal of Agricultural Meteorology*. **6**: 111-124.
- Peláez, D.V.; Bóo, R.M.** 1987. Plant water potential for shrubs in Argentina. *Journal of Range Management*. **40** (1): 6-9.
- Perfect, E; Kenst, A.B.; Diaz-Zorita, M.; Grove, J.H.** 2004. Fractal analysis of soil water desorption data collected on disturbed samples with water activity meters. *Soil Science Society of America Journal*. **68**: 1177-1184.
- Petry, T.M.; Jiang, C.P.** 2003. Evaluation and Utilization of the WP4 Dewpoint PotentiaMeter Phase I & II. Center for Infrastructure Engineering Studies. University Transportation Center Program at The University of Missouri-Rolla.
- Powell, R.W.** 1936. The use of thermocouples for psychrometric purposes. *Proceedings of the Physical Society*. **48**: 406-414.
- Quemada, M; Cabrera, M.L.** 1997. Temperature and moisture effects on C and N mineralization from surface applied clover residue. *Plant and Soil*. **189**: 127-137.

- Quemada, M; Cabrera, M.L.** 2002. Characteristic moisture curves and maximum water content of two crop residues. *Plant and Soil*. **238**: 295-299.
- Rawlins, S.L.** 1964. Systematic error in leaf water potential measurements with a thermocouple psychrometer. *Science*. **146**: 644-646.
- Rawlins, S.L.** 1966. Theory for thermocouple psychrometers used to measure water potential in soil and plants samples. *Journal of Agricultural Meteorology*. **3**: 293-310.
- Rawlins, S.L.** 1972. Theory of thermocouple psychrometers for measuring plant and soil water potential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 43-50.
- Rawlins, S.L.; Campbell, G.S.** 1986. Water potential: Thermocouple Psychrometry. En: Klute, A. (ed). Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Monograph Number 9 (Second Edition). ASA, Madison, WI. pp: 597-618.
- Rawlins, S.L.; Dalton, F.N.** 1967. Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control. *Soil Science Society of America Proceedings*. **31**: 297-301.
- Rawlins, S.L.; Gardner, W.R.; Dalton, F.N.** 1968. In situ measurement of soil and plant leaf water potential. *Soil Science Society of America Proceedings*. **32**: 468-470.
- Reynolds, J.F.; Kemp, P.R.; Tenhunen, J.D.** 2000. Effects of long-term rainfall variability on evaporation and soil water distribution in the Chihuahuan Desert: a modelling analysis. *Plant Ecology*. **150**: 145-159.
- Richards, B.G.** 1965. Thermistor hygrometer for determining the free energy of moisture in unsaturated soils. *Nature*. **208**: 608-609.
- Richards, L.A.** 1965. Metallic conduction for cooling a thermocouple psychrometer bath. *Soil Science*. **100** (1): 20-24.
- Richards, L.A.; Decker, D.L.** 1963. Difficulties with electrolytic-resistance hygrometers at high humidity. *Soil Science Society of America Proceedings*. **27**: 481.
- Richards, L.A.; Ogata, G.** 1958. Thermocouple for vapour pressure measurement in biological and soil systems at high humidity. *Science*. **128**: 1089-1090.
- Richards, L.A.; Ogata, G.** 1961. Psychrometric measurements of soil samples equilibrated on pressure membranes. *Soil Science Society of America Proceedings*. **25**: 456-459.

- Rodrigues, O.; Didonet, A.D.; Roman, E.S.** 2003. Avaliação do potencial hídrico foliar em plantas de trigo. *Embrapa Trigo. Circular Técnica Online*. Ministerio da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **15**. Disponible en: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ci/p_ci15.htm
- Rodríguez, A.** 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Departamento de Ingeniería Agroforestal (EPS). Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.
- Romero, E.E.** 1999. Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated boom clay: an experimental study. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports. Barcelona.
- Ruiz, D.; Darmody, R.** 2004. Illinois river dredged sediment and biosolids used as greenhouse soil mixtures. Project Report. Natural Resources and Environmental Sciences University of Illinois Urbana-Champaign.
- Ryel, R.J.; Caldwell, M.M.; Yoder, C.K.; Or, D.** 2002. Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia Tridentata*: evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model. *Oecologia*. **130**: 173-184.
- Ryel, R.J.; Leffler, A.J.; Peek, M.S.; Ivans, C.Y.; Caldwell, M.M.** 2004. Water conservation in *Artemisia tridentata* through redistribution of precipitation. *Oecologia*. **141**: 335-345.
- Samingan, S.; Schanz, T.** 2005. Comparison of four methods for measuring total suction. *Vadose Zone Journal*. **4**: 1087-1095.
- Santi, G.R.; Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Pauletto, E.A.; Spinelli-Pinto, L.F.** 2002. Estimativa da retenção de água a partir de atributos do solo. IV Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo. Porto Alegre, R.S. 14 a 16 outubro 2002.
- Savage, M.J.; Cass, A.** 1984a. Measurement errors in field calibration of *in situ* leaf psychrometers. *Crop Science*. **24**: 371-372.
- Savage, M.J.; Cass, A.** 1984b. Measurement of water potential using *in situ* thermocouple hygrometers. *Advances in Agronomy*. **37**: 73-126.
- Savage, M.J.; Cass, A.; de Jager, J.M.** 1983a. Statistical assessment of some errors in thermocouple hygrometric water potential measurement. *Journal of Agricultural Meteorology*. **30**: 83-97.
- Savage, M.J.; Wiebe, H.H.** 1987. Voltage endpoint determination for thermocouple psychrometers and the effect of cooling time. *Agricultural and Forest Meteorology*. **39**: 309-317.

- Savage, M.J.; Wiebe, H.H.; Cass, A.** 1983b. *In situ* field measurement of leaf water potential using thermocouple psychrometers. *Plant Physiology*. **73**: 609-613.
- Scanlon, B.R.; Andraski, B.J.; Bilskie, J.** 2002. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. En: Dane, J.H.; Topp, G.C. (eds.). *Methods of soil analysis, part 4, physical methods*. SSSA, Madison, WI. pp: 643-670.
- Scanlon, B.R.; Goldsmith, R.S.** 1997. Field study of spatial variability in unsaturated flow beneath and adjacent to playas. *Water Resources Research*. **33** (10): 2239–2252.
- Scanlon, B.R.; Tyler, S.W.; Wierenga, P.J.** 1997. Hydrologic issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport. *Reviews of Geophysics*. **35** (4): 461-490.
- Schaefer, N.L.; Trickett, E.S.; Ceresa, A.; Barrs, H.D.** 1986. Continuous monitoring of plant water potential. *Plant Physiology*. **81**: 45-49.
- Schimmelpfennig, H.** 1972. Semi-automatic thermocouple psychrometer readout. En: *Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers*. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp:120-122.
- Scholz, F.; Bucci, S.J.; Goldstein, G.; Meinzer, F.C.; Franco, A.C.; Miralles-Wilhelm, F.** 2007. Biophysical properties and functional significance of stem water storage tissues in Neotropical savanna trees. *Plant, Cell and Environment*. **30**: 236-248.
- Schoonmaker, A.L.; Teste, F.P.; Simard, S.W.; Guy, R.D.** 2007. Tree proximity, soil pathways and common mycorrhizal networks: their influence on the utilization of redistributed water by understory seedlings. *Oecologia*. **154** (3): 455-466.
- Scotter, D.R.** 1972. The theoretical and experimental behaviour of a Spanner psychrometer. *Journal of Agricultural Meteorology*. **10**: 125-136.
- Serpe, M.D.; Orm, J.M.; Barkes, T.; Rosentreter, R.** 2006. Germination and seed water status of four grasses on moss-dominated biological soil crusts from arid lands. *Plant Ecology*. **185**: 163-178.
- Shackel, K.A.** 1984. The theoretical and experimental error for *in situ* measurements of plant water potential. *Plant Physiology*. **75**: 766-772.
- Shackel, K.A.** 1987. Direct measurement of turgor and osmotic potential in individual epidermal cells. Independent confirmation of leaf water potential as determined by *in situ* psychrometry. *Plant Physiology*. **83**: 719-722.
- Shah, N.H.; Paulsen, G.M.** 2003. Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. *Plant and Soil*. **257**: 219-226.

- Shepherd, W.** 1973. Moisture absorption by some instrument materials. *The Review of Scientific Instruments*. **44** (2): 234.
- Siddique, M.R.B.; Hamid, A.; Islam, M.S.** 2000. Drought stress effects on water relations of wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*. **41**: 35-39.
- Skierucha, W.** 2005. Design and performance of psychrometric soil water potential meter. *Sensor and Actuators A*. **118**: 86-91.
- Smith, D.M.; Jarvis, P.G.; Odongo, J.C.W.** 1998. Management of windbreaks in the Sahel: the strategic implications of tree water use. *Agroforestry Systems*. **40**: 83-96.
- Solano, J.E.; Reichert, J.M.; Reinert, D.V.; Satin, G.; Sequinatto, L.** 2002. Equações de pedotransferência para estimativa do ponto de murcha permanente (PMP) em solos do Rio Grande do Sul. XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Cuiabá, M.T. 21 a 26 julho 2002.
- Spanner, D.C.** 1951. The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *Journal of Experimental Botany*. **11**: 145-168.
- Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006a. Methodology for determination of osmotic suction of soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. **24**: 1469-1479.
- Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006b. Nonlinear curve-fitting procedures for developing soil-water characteristic curves. *Geotechnical Testing Journal*. **29** (5): 409-418.
- Stevens, A.F.; Acock, B.** 1976. A thermocouple psychrometer with a rapid automatic scanning and digital printout of 100 channels. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. **9**: 1058-1062.
- Sun, J.; Edwards, G.E.; Okita, T.W.** 1999. Feedback inhibition of photosynthesis in rice measured by O₂ dependent transients. *Photosynthesis Research*. **59**: 187-200.
- Thakur, V.K.S.; Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006. Laboratory investigations on extremely high suction measurements for fine-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. **24**: 565-578.
- Turner, N.C.** 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil*. **58**: 339-366.
- Turner, N.C.; Schulze, E.-D.; Gollan, T.** 1984a. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. I. Species comparisons at high soil water contents. *Oecologia*. **63**: 338-342.
- Turner, N.C.; Schulze, E.-D.; Gollan, T.** 1985. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous species *Helianthus annuus*. *Oecologia*. **65**: 348-355.

- Turner, N.C.; Shackel, K.A.; Le Coultre, I.F.** 2000. Leaf-cutter psychrometers. *Agronomy Journal*. **92**: 538-541.
- Turner, N.C.; Spurway, R.A.; Schulze, E.D.** 1984b. Comparison of water potentials measured by *in situ* psychrometry and pressure chamber in morphologically different species. *Plant Physiology*. **74**: 316-319.
- Tyree, M.T.; Vargas, G.; Engelbrecht, B.M.J.; Kursar, T.A.** 2002. Drought until death do us part: a case study of the desiccation-tolerance of a tropical moist forest seedling-tree, *Licania platypus* (Hemsl.) Fritsch. *Journal of Experimental Botany*. **53** (378): 2239-2247.
- Vander Willigen, C.; Pammenter, N.W.; Mundree, S.; Farrant, J.** 2001. Some physiological comparisons between the resurrection grass, *Eragrostis nindensis*, and the related desiccation-sensitive species, *E. curvula*. *Plant Growth Regulation*. **35**: 121-129.
- van Haveren, B.P.; Brown, R.W.** 1972. The properties and behaviour of water in the soil-plant-atmosphere continuum. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 1-27.
- Villar, J.M.; Ferrer, F.** 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. pp: 23-86.
- Vogt, U.K.** 2001. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. and *Sambucus nigra* L. *Journal of Experimental Botany*. **52** (360): 1527-1536.
- Waister, P.D.** 1965. Precision of thermocouple psychrometers for measuring leaf water potential. *Nature*. **205**: 922-923.
- Walker, S; Oosterhuis, D.M.; Savage, M.J.** 1983. Field use of screen-caged thermocouple psychrometers in sample chambers. *Crop Science*. **23**: 627-632.
- Walker, S.; Oosterhuis, D.M.; Wiebe, H.H.** 1984. Ratio of cut surface area to leaf sample volume for water potential measurements by thermocouple psychrometers. *Plant Physiology*. **75**: 228-230.
- Wecksler, O.S.** 1963. Electric butt-welding of platinum wires. *Journal of Scientific Instruments*. **40**: 543.
- Wheeler, M.L.; Qashu, H.K.; Evans, D.D.** 1972. Psychrometric measurements of water potential under desert conditions. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp:171-174.

- Wiebe, H.H.** 1981. Measuring water potential (activity) from free water to oven dryness. *Plant Physiology*. **68**: 1218-1221.
- Wiebe, H.H.** 1984. Water condensation on Peltier-cooled thermocouple psychrometers: a photographic study. *Agronomy Journal*. **76**: 166-168.
- Wiebe, H.H.; Brown, R.W.** 1979. Temperature gradient effects on *in situ* hygrometer measurements of soil water potential. II. Water movement. *Agronomy Journal*. **71**: 397-401.
- Wiebe, H.H.; Brown, R.W.; Barker, J.** 1977. Temperature gradient effects on *in situ* hygrometer measurements of water potential. *Agronomy Journal*. **69**: 933-939.
- Wiebe, H.H.; Brown, R.W.; Daniel, T.W.; Campbell, E.** 1970. Water potential measurements in trees. *Bioscience*. **20**: 225-226.
- Wikberg, J.; Ögren, E.** 2004. Interrelationships between water use and growth traits in biomass-producing willows. *Trees*. **18**: 70-76.
- Wu, Y.; Jeong, B.-R.; Fry, S.C.; Boyer, J.S.** 2005. Change in XET activities, cell wall extensibility and hypocotyl elongation of soybean seedlings at low water potential. *Planta*. **220**: 593-601.
- Wullschleger, S.D.; Dixon, M.A.; Oosterhuis, D.M.** 1988. Field measurement of leaf water potential with a temperature-corrected *in situ* thermocouple psychrometer. *Plant, Cell and Environment*. **11**: 199-203.
- Xanthopoulos, G.** 2002. Sap Pressure (Plant Water Potential) Measurement: Method. EUFIRELAB: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a “wall-less” Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region. pp: 21.
- Yamada, H.; Takechi, K.; Hoshi, A.; Amano, S.** 2004. Comparison of water relations in watercored and non-watercored apples induced by fruit temperature treatment. *Scientia Horticulturae*. **99**: 309-318.
- Yoder, C.K.; Nowak, R.S.** 1999. Hydraulic lift among native species in the Mojave Desert. *Plant and Soil*. **215**: 93-102.
- Zanstra, P.E.; Hagenzieker, F.** 1977. Comments of the psychrometric determination of leaf water potentials *in situ*. *Plant and Soil*. **48**: 347-367.
- Zollinger, W.D.; Campbell, G.S.; Taylor, S.A.** 1966. A comparison of water-potential measurements made using two types of thermocouple psychrometer. *Soil Science*. **102** (4): 231-239.

- Zou, C.B.; Barnes, P.W.; Archer, S.; McMurtry, C.R.** 2005. Soil moisture redistribution as a mechanism of facilitation in Savanna tree-shrub clusters. *Oecologia*. **145**: 32-40.
- Zou, C.; Penfold, C.; Sands, R.; Misra, R.K.; Hudson, I.** 2001. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. *Plant and Soil*. **236**: 105–115.
- Zou, C.; Sands, R.; Sun, O.** 2000. Physiological responses of radiata pine roots to soil strength and soil water deficit. *Tree Physiology*. **20**: 1205-1207.

IX

**ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE MARCHITAMIENTO PERMANENTE
USANDO UN MEDIDOR DE ACTIVIDAD DE AGUA**

CAPÍTULO

CAPÍTULO IX

ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE MARCHITAMIENTO PERMANENTE USANDO UN MEDIDOR DE ACTIVIDAD DE AGUA⁵²

“Medir lo que es medible y tratar de hacer medible lo que todavía no lo es”
Galileo Galilei (1564-1642). Astrónomo, filósofo, matemático y físico italiano.

⁵² Cancela, J.J.; Dafonte, J.; Martínez, E.M.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X. 2006. Assessment of a Water Activity Meter for Rapid Measurements of Soil Water Potential. *Biosystems Engineering*. **94** (2): 285–295.

ÍNDICE

Resumen	251
1. Introducción y objetivos	253
2. Material y métodos	254
2.1 Descripción del área de estudio	254
2.2 Muestras de suelo y técnicas de análisis de laboratorio	255
2.2.1 Medidor de actividad de agua	257
2.2.2 Placa de presión	258
2.3 Análisis de los datos y procedimientos estadísticos	259
3. Resultados y discusión	261
3.1 Análisis de los datos obtenidos con el medidor de actividad de agua	261
3.2 Comparación de metodologías alternativas	264
4. Conclusiones.....	265
5. Referencias bibliográficas	266

RESUMEN

Para el cálculo del agua disponible se requiere conocer el punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP), cuyo conocimiento permite la realización de una buena gerencia del agua de riego. Este trabajo establece el uso de un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM) en la determinación del PWP en la comarca regable de Terra Chá, localizada en Galicia, NO de España. Además, el estudio compara la estimación realizada con los resultados obtenidos procedentes de la placa de presión (*pressure plate*) (PP). Veinticuatro muestras alteradas de suelo son tomadas a una profundidad de 0-20 centímetros, correspondiéndose a diversos tipos de suelos y cultivos. Este estudio encuentra una buena repetibilidad en el método usado para la estimación del PWP, siendo testadas dos metodologías en la obtención de la curva de retención de agua del suelo (*water retention curve*) (WRC). La metodología inicial estima la WRC basándose en ocho contenidos de agua y cuatro lecturas por cada contenido en agua, mientras que la metodología alternativa estima la curva de acuerdo con cuatro contenidos en agua y dos lecturas por cada contenido en agua. Los valores obtenidos para PWP usando las dos metodologías son similares (coeficiente de determinación $r^2 \geq 0,95$ para la línea de 1:1, en todos los casos). La metodología más apropiada es la metodología alternativa debido al menor tiempo demandado en la realización del proceso. Usando la metodología alternativa se comparan los valores estimados con el WAM con los estimados con la PP, obteniendo un coeficiente de correlación medio ($r^2=0,54$), resultando valores inferiores en la estimación de PWP con las lecturas tomadas con el WAM. Existe una reducción en los tiempos empleados en estimar el PWP con el WAM con la metodología alternativa (4,5 h), respecto a la utilización de la PP (9h).

1. Introducción y objetivos.

Evaluar cuantitativamente el agua disponible presente en el suelo tiene una gran importancia para establecer pautas de gestión del agua en cultivos de regadío. La actual escasez de recursos hídricos, ligada a las condiciones climáticas y a la demanda creciente de agua para usos urbanos e industriales, hace necesario el desarrollo de modelos que se integren en un sistema de ayuda a la decisión, contribuyendo así a gestionar de forma sostenible los regadíos. El agua disponible en el suelo es una variable característica del suelo, requerida en la aplicación de modelos gestión de agua de riego (Mannocchi y Mecarelli, 1993; Smith, 1993; Paz *et al.*, 1996; Pereira *et al.*, 2003; Álvarez *et al.*, 2005; Ortega *et al.*, 2004), que afecta directamente a la producción obtenida (Stričević y Čaki 1997) y en la decisión sobre el momento adecuado para el riego (Zairi *et al.*, 2000; Intrigliolo y Castel, 2004).

El cálculo de la reserva de agua útil del suelo (*available water content*) (AWC) se calcula como diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y el contenido de agua en el punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP), obtenido este a partir de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC). Existen gran cantidad de métodos para estimar la WRC (Klute, 1986), presentando diferencias significativas tanto en aspectos técnicos como en el tiempo requerido para la estimación. La curva de retención de agua relaciona la cantidad de agua y de energía asociada con las fuerzas que mantienen el agua en el suelo. Ambos términos son esenciales para la caracterización del medio hidráulico estudiado.

De entre las técnicas que existen para la estimación de la WRC, la placa de presión (*pressure plate*) (PP) es una técnica clásica usada en un gran número de trabajos sobre el análisis de las propiedades hídricas del suelo (Klute, 1986; Cousin *et al.*, 2003), con el inconveniente del elevado tiempo para la estimación PWP (Gee *et al.*, 2002). Sin embargo, en los últimos años se han retomado técnicas, ya experimentadas en los años 70, basadas en la Psicrometría para el cálculo de la WRC (Campbell y Gardner, 1971; Merrill y Rawlins, 1972; Brown y van Haveren, 1972). El uso de nuevas técnicas ha sido posible gracias a los recientes avances en instrumentación y tecnología que han facilitado la rápida medición de las WRCs usando medidores de actividad de agua (*water activity meters*) (WAMs) (Gee *et al.*, 1992; Scanlon *et al.*, 2002; Perfect *et al.*, 2004).

Muy pronto se intentó definir las funciones matemáticas apropiadas que caracterizasen la WRC (Brooks y Corey, 1964; van Genuchten, 1980), existiendo en el caso de los WAM una gran cantidad de ecuaciones, una de ellas es la función de la ley potencial de Campbell (1974) usada en Campbell y Shiozawa (1992) y Perfect *et al.*, (2002).

Las muestras utilizadas para la determinación de la WRC pueden ser alteradas o inalteradas. En algunos casos la imposibilidad de conseguir muestras inalteradas, o porque no es conveniente invertir el esfuerzo requerido para obtenerlas, pueden realizarse los estudios con muestras alteradas, conociendo previamente la densidad aparente (DAP). Es importante mencionar que las muestras alteradas, al realizarse las WRC, van a ver modificado su trazado a potenciales altos, mientras que el resultado de la medida de contenido de agua se ve menos afectada cuanto más bajo sea el potencial por el estado de

alteración de las muestras. Por tanto, muestras alteradas pueden ser aceptadas para mediciones de potencial en muestras secas (Campbell y Gardner, 1971; Gee *et al.*, 1992). Townend *et al.*, (2001) y Scanlon *et al.*, (2002) consideran que los WAMs están particularmente indicados para este tipo de muestras incluidas en el rango de -0,10 a -100 MPa.

La elección de una adecuada metodología o protocolo de medición que permita al usuario la obtención de resultados en un corto espacio de tiempo, deberá ser considerada para la obtención de la WRC utilizando WAMs con este (u otro) tipo de muestra. A pesar de las diferentes propuestas que se han realizado, el tiempo total requerido en el proceso no ha sido analizado adecuadamente.

Considerando que los WAMs poseen la característica intrínseca de aportar mediciones rápidas (Gee *et al.*, 1992), la verificación de la repetibilidad de las mediciones correspondientes a las estimaciones del PWP en suelos del NO de España adquiere una gran relevancia en esta investigación, permitiendo definir un adecuado método de estimación del PWP en un tiempo lo más breve posible. A fin de validar la repetibilidad del método sugerido, los resultados obtenidos son discutidos y comparados con los resultados obtenidos con la PP.

2. Material y métodos.

2.1 Descripción del área de estudio.

Las muestras de suelo han sido recogidas en una zona regable de Galicia: Terra Chá, situada en el NO de España (Fig. IX.1) (Cancela *et al.* 2006a).

Terra Chá es una zona con débiles contrastes topográficos y con una altitud media de 420 metros sobre el nivel del mar. Constituye la subcuenca hidrográfica de cabecera de la cuenca hidrográfica del Río Miño. Se caracteriza por una precipitación media anual de 1.063,20 mm, situándose la ET_0 media anual en 866 mm distinguiéndose cuatro periodos diferenciados: una estación lluviosa durante los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero; un periodo de transición durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo; un periodo con sequedad acusada durante el mes de junio, julio y agosto y finalmente un pequeño periodo representado por septiembre en que las lluvias vuelven a aumentar hasta alcanzar la estación lluviosa.

El estudio de los suelos y de la geomorfología del área se basan en estudios previos (Castelao, 1989). Los materiales de origen son sedimentos terciarios y sedimentos aluviales recientes. Por lo tanto, tres tipos de suelos pueden ser distinguidos: Fluvisoles, Gleysoles y Cambisoles. Los Fluvisoles se caracterizan por su proximidad a los cauces de los ríos, con respecto a las características hidromórficas de los Cambisoles, los cuales se muestran en pendientes escarpadas. Los Gleysoles están situados en áreas con pendientes más escarpadas que los otros tipos de suelos. Los suelos demuestran una profundidad limitada, con una capa impermeable en apenas 40 centímetros. La distribución de suelos en el área del estudio sigue: el 68% Cambisoles, el 22% Gleysoles, y el 10% Fluvisoles.

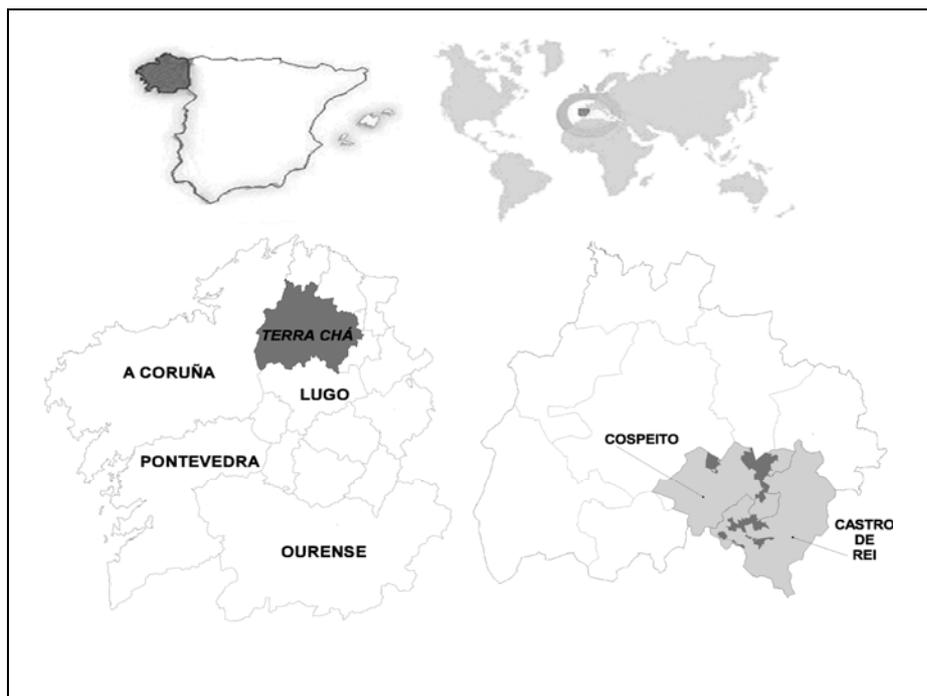


Figura. IX.1. “Localización de la zona de estudio”

2.2 Muestras de suelo y técnicas de análisis de laboratorio.

Dada la variabilidad espacial de las características de los suelos, se hace necesario seguir un método de muestreo sistemático aleatorio, por ser el que más se adecua para la toma de muestras. Se establece una malla de 500x500 metros que cubre la superficie de estudio, dicha malla está constituida por 83 nodos, de los que inicialmente se tomaron 24 puntos de la malla (Fig. IX.2).

La recogida de muestras se ha realizado en dos períodos: del 27 de junio al 24 de julio del 2002 y del 24 de abril al 9 de mayo del 2003, ubicándose los puntos de muestreo en campo mediante el empleo de un GPS.

En cada punto se han estimado los valores de DAP y textura, y se ha anotado el tipo de suelo y el cultivo (Tabla IX.1 y IX.2).

Para la DAP, según estudios realizados por Cancela (2004), debido a la pedregosidad del suelo, se ha utilizado el “*bulk density test for gravelly and rocky soils*” propuesto por el USDA (2004) para la estimación de esta variable.

En caso de la textura, la distribución del tamaño de las partículas (*particle size distribution*) (PSD) del suelo [arena (ARE), limo (LIM), arcilla (ARC)] se determina por métodos estándar (MAPA, 1986). Previamente a los análisis, todas las muestras han sido secadas y tamizadas (2 mm).

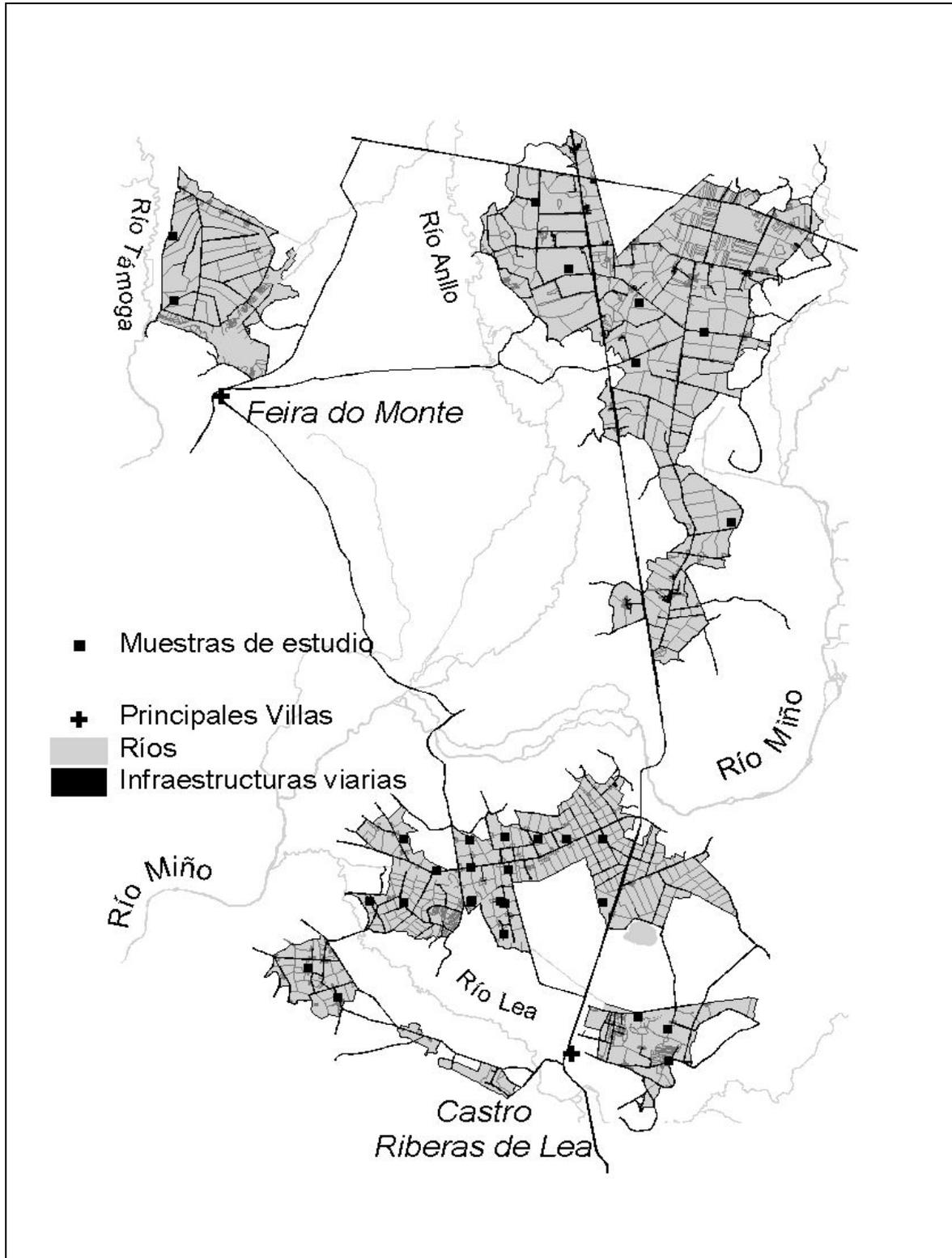


Figura IX.2. "Red de muestreo de suelo"

Tabla IX.1. “Distribución las muestras según tipo de suelo y cultivo”

Suelo / Cultivo	Maíz	Pradera Natural	Pradera Artificial	Total
<i>Cambisol</i>	2 (66,60%)	3 (37,50%)	8 (61,50%)	13 (54,20%)
<i>Fluvisol</i>	1 (33,30%)	4 (50%)	-	5 (20,80%)
<i>Gleysol</i>	-	1 (12,50%)	5 (38,50%)	6 (25,00%)
Total	3	8	13	24

Estudios realizados con anterioridad por Cancela (2004) aconsejan la toma de muestras alteradas utilizando muestras completas de los 20 cm iniciales de suelo, y con 4 cm de diámetro la muestra. La muestra se homogeniza y tamiza a 2 mm, trabajando con la fracción fina (FF) de la misma para las medidas tanto en la PP como en el WAM.

Tabla IX.2. “Resumen estadístico de las variables del suelo”

	Contenido en gravas (%)	DAP (kg/m ³)	Distribución tamaño de partícula (% en peso)		
			ARE	LIM	ARC
<i>Media aritmética</i>	16,87	1010	53,30%	23,50%	23,10%
<i>Desviación estandar</i>	9,54	190	9,80%	4,50%	8,70%
<i>n</i>	24	24	24	24	24

DAP: Densidad aparente, ARE: Contenido en arena, LIM: Contenido en limo, ARC: Contenido en arcilla.

2.2.1 Medidor de actividad de agua.

La estimación del valor del PWP se realiza con el WAM, WP4 *Dewpoint PotentiaMeter* (Decagon Device, Inc). El WP4 está basado en “*the chilled mirror dew point technique*” (Gee *et al.*, 1992; Scanlon *et al.*, 1997; Mullins, 2001). Con este instrumento, asumiendo que el potencial osmótico debido a las sales disueltas en la solución del suelo es insignificante con respecto a fuerzas matricias, la tensión del agua del suelo se puede calcular usando la ecuación de Kelvin (Rawlins y Campbell, 1986). El método de análisis conducirá a la obtención de la relación existente entre el potencial de agua y el contenido de la misma para cada porcentaje de humedad descrito a continuación.

Una vez tomadas las muestras y llevadas al laboratorio, se vierte el contenido de las bolsas que las contienen en unos envases de aluminio y se someten posteriormente a un secado. Transcurrida esta operación, se disponen 20 gramos de suelo seco y tamizado a 2 mm en unos vasos de plástico con capacidad para 0,20 litros. Dichos vasos son humectados en una proporción creciente de modo que se tengan 8 vasos con los siguientes porcentajes en peso de humedad: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 % (Capítulo VII). A continuación, se remueve el contenido para homogenizar la muestra y se tapan, dejándolos reposar durante 24 horas. Para realizar las mediciones de la serie de humedades correspondiente a cada muestra, estas se deben trasvasar a unos envases cuyas características permiten ser

utilizados por el WAM⁵³. Se introducen de 5 a 7 gramos de suelo de cada porcentaje de humedad en sus correspondientes cápsulas.

De cada porcentaje de humedad se toman cuatro lecturas consecutivas, de las cuales para el posterior análisis de los resultados se realizará la media aritmética de las mismas. Es por ello que en cada muestra se realizan 32 lecturas distintas. Tras cada porcentaje de humedad medido, se extrae la cápsula del WAM y se pesa. Posteriormente, se tapa y se lleva a un horno a 105° C y se deja 24 horas⁵⁴. Transcurrido ese tiempo se pesa de nuevo y se obtiene el contenido de agua para cada nivel de humectación (Decagon Devices, 2002).

2.2.2 Placa de presión.

Para contrastar las medidas realizadas con el WAM se realizan determinaciones del PWP en la PP, usando la metodología que se describe a continuación.

Se colocan las muestras de suelo sobre los platos porosos (12 muestras por tanda), contenidas por anillos de altura 2 cm (Black *et al.*, 1965), el conjunto es entonces saturado con agua (24 h). Después de que la placa porosa y las muestras estén completamente saturadas de agua, la placa puede ser montada y se usará nitrógeno a presión para la extracción de humedad de las muestras de suelo bajo condiciones controladas. Doce horas serán requeridas hasta que las muestras alcancen el equilibrio a la presión establecida. Las muestras se mantendrán en equilibrio a la presión de trabajo durante 48 horas (Capítulo V).

Tan pronto como el nitrógeno a presión dentro de la cámara suba por encima de la presión atmosférica, la mayor presión dentro de la cámara forzará el exceso de agua a través de los poros microscópicos en la placa cerámica y a través de la boquilla de salida hacia el desagüe del plato de presión.

Durante una extracción, para cada presión de aire fijada en el extractor, la humedad del suelo fluirá desde cada partícula de suelo y saldrá a través de la placa hasta el momento que la curvatura de la película de agua en todo el suelo sea la misma que en los poros de la placa. Cuando esto ocurre se alcanza un equilibrio y el flujo de humedad se detiene. A continuación, se pesan las muestras húmedas a la salida del plato, para su posterior secado en el horno a 105° C durante 24 h, momento en que se repite la pesada. Ambas mediciones permiten la obtención del contenido de agua gravimétrico a la presión de trabajo.

⁵³ Las cápsulas empleadas son de material plástico, polietileno de baja densidad, disponiendo de tapas de semejantes características.

⁵⁴ Este secado se puede obviar realizando una “*corrección inicial de la humedad*” presente en el suelo. Se trata de una operación consistente en determinar el contenido de agua presente en la muestra inicialmente, previo al humectado de forma gravimétrica, de modo que el potencial medido se asociará al contenido real de la muestra resultante del sumatorio del contenido de humedad inicial determinado y del contenido de agua adicionado según porcentajes de humedad considerados. De esta forma el secado posterior al proceso de lectura se podrá obviar simultaneando la operación con las restantes etapas del protocolo, de modo que el tiempo empleado en el mismo se ve acortado.

2.3 Análisis de los datos y procedimientos estadísticos.

Considerando que las muestras utilizadas son alteradas y se toma solamente la fracción fina (<2 mm), se introduce un factor de corrección (Ec. IX.1) en la estimación del contenido de humedad gravimétrico. Se considera que la fracción gruesa (>2 mm) tiene una contribución casi nula al contenido de agua en PWP (Tokunaga *et al.*, 2003; Cancela, 2004):

$$w = \frac{(\text{Peso húmedo } FF - \text{Peso seco } FF)}{(\text{Peso seco } FF) \cdot \left(1 + \frac{\%FG}{\%FF}\right)} \quad (\text{IX.1})$$

donde:

w(g/g): contenido de humedad gravimétrico.

FF: fracción fina.

%FF : porcentaje en peso de la fracción fina de la muestra compuesta.

%FG : porcentaje en peso de la fracción gruesa de la muestra compuesta.

En el caso del WAM, con la introducción del factor de corrección se obtiene el contenido de humedad gravimétrico considerando la fracción gruesa de la muestra. Durante el análisis de los datos se representa el potencial de agua en MPa frente al contenido de agua gravimétrico en g/g y se calculan los coeficientes de la ecuación potencial (Ec. IX. 2) que mejor se ajustan a cada nube de puntos, obteniendo el coeficiente de ajuste (r^2) y mostrando valores superiores a 0,74 en los 24 puntos analizados.

$$y = ax^{-b} \quad (\text{IX.2})$$

donde:

x: potencial del agua (MPa).

y: contenido gravimétrico de agua (g/g).

a y b: parámetros.

Para la determinación del contenido de humedad en el PWP se considera un valor de -1,55 MPa (Richards y Weaver, 1943; Klute, 1986; Savage *et al.*, 1996; Earl *et al.*, 2003). De esta forma, a partir de la ecuación utilizada para la WRC se estima el PWP para cada muestra. Asimismo, se obtiene el contenido gravimétrico de humedad, utilizando la DAP previamente calculada para su transformación a volumétrico. A fin de poder realizar la comparación de los resultados obtenidos para el PWP del WAM con los obtenidos con la PP, se consideró la misma presión de extracción, introduciendo como factor de corrección el expresado en la Ec. IX.1.

La WRC y el valor de PWP determinados con el WAM para cada punto de muestreo han sido empleados para el estudio de la repetibilidad de las mediciones en el análisis de suelos. Para el test de repetibilidad, el PWP hubo de ser calculado de nuevo para cada punto de muestreo, utilizando la misma muestra de suelo, lo cual implica que las estimaciones hayan sido realizadas en dos periodos diferentes. Los valores de los dos PWP estimados para cada punto de muestreo se obtienen mediante un análisis de regresión lineal simple. La bondad del ajuste obtenido ha sido analizado mediante el coeficiente de determinación del modelo y a través de un test-*t* de los parámetros del modelo de regresión, considerando un nivel de confianza del 95% para la pendiente de la curva. Inclusive los resultados han sido llevados a la línea 1:1. Después de la verificación de la repetibilidad de las mediciones para los suelos estudiados, se analiza el efecto sobre la determinación del PWP, modificando la metodología inicial, estimando los resultados y estudiando los tiempos de lectura para ambas metodologías. Con la metodología inicial se determina el PWP mediante el desarrollo de la WRC con ocho contenidos de humedad (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40%), y con cuatro lecturas para cada potencial de agua. En la metodología reducida se considera una reducción en el número de puntos utilizados para el desarrollo de la WRC y en el número de lecturas realizadas para cada contenido de agua. Esto significa que en vez de utilizar ocho contenidos de agua para la estimación de la WRC y el PWP, correspondiente a la metodología inicial (cuatro lecturas por contenido de agua y ocho contenidos de agua), se emplean cuatro contenidos de agua (5, 10, 15 y 20%) y dos lecturas por cada contenido de agua utilizado, lo cual se corresponde con la metodología alternativa (dos lecturas por contenido de agua y cuatro contenidos de agua).

La metodología propuesta en este estudio reduce a dos el número de lecturas, lo cual supone una reducción del tiempo de medición (tiempo de humectado y tiempo de lectura). El mismo proceso de análisis que se ha empleado para la verificación de la repetibilidad se utiliza para la estimación del PWP obtenido por ambas metodologías, es decir, un análisis de regresión lineal simple y la interpretación de la bondad de ajuste de los análisis. Para el estudio de los tiempos de lectura, se cuantifican los tiempos requeridos para cada muestra en función de la metodología empleada y posteriormente se compara la media de los tiempos obtenidos. Para contrastar los valores de PWP obtenidos con el WAM, se relacionan estos valores con los obtenidos con la PP y se analiza el modelo de regresión lineal más adecuado dentro de los posibles, mediante la interpretación de los coeficientes de ajuste obtenidos. Además, las diferencias en el tiempo total por muestra ha sido analizado tomando en consideración los tiempos utilizados con el WAM para el secado, equilibrado, humectado, realización de las lecturas⁵⁵, y en el caso de la PP, los tiempos empleados en la saturación de las muestras, equilibrado, extracción, pesado, secado posterior y repetición del pesado. Dado que diferentes muestras han sido secadas cada día, el tiempo de humectado y de secado de las muestras se divide entre el número de muestras leídas el mismo día. De esta forma los tiempos totales obtenidos tanto con el WAM como con la PP pueden ser comparados.

⁵⁵ No se consideran los tiempos correspondientes al pesado, secado posterior y repetición del pesado para cada muestra, por haberse realizado la “*corrección inicial de la humedad*”. En caso de no realizarla, se incluirían, no obstante, se incrementaría el tiempo empleado en el protocolo, lo cual ralentizaría el proceso.

3. Resultados y discusión.

3.1 Análisis de los datos obtenidos con el medidor de actividad de agua.

Para la validación de la repetitibilidad del método del WAM, a partir de las dos lecturas de las muestras obtenidas en los distintos puntos de Terra Chá, se comparan los resultados en la estimación de PWP obtenidos con el WAM en dos épocas diferentes sobre la misma muestra de suelo. En la figura IX.3 se representan los resultados obtenidos para el PWP considerando tanto la primera lectura como la segunda.

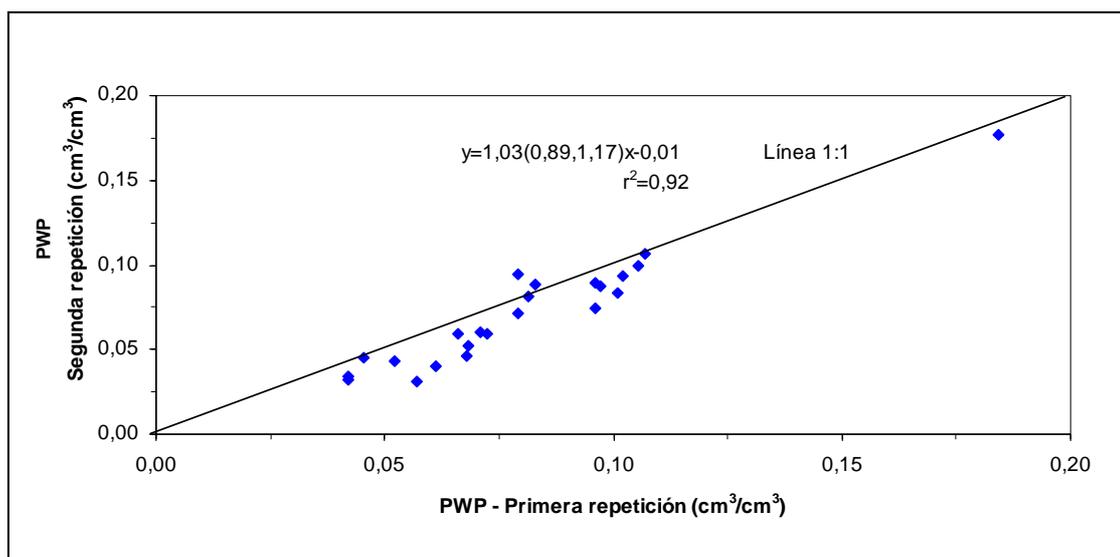


Figura IX.3. “Repetibilidad en la estimación del PWP mediante el empleo de un WAM de acuerdo a la metodología inicial”⁵⁶

Se obtienen buenos resultados de repetibilidad del método para la estimación del valor del PWP, con un alto coeficiente de determinación de los datos (r^2) 0,92, del test- t de los parámetros del modelo de regresión se obtiene que el valor de interceptación es despreciable (P-valor = 0,05). Por lo que se puede afirmar que los datos se ajustan significativamente a la recta 1:1.

El efecto que sobre el PWP tiene el empleo de contenidos de agua comprendidos entre el 5 y el 20% ha sido testado mediante la medición de cada contenido de agua dos veces en vez de cuatro, tal como sugería la metodología inicial. Dicha reducción no afecta significativamente al valor del PWP estimado (Fig. IX.4).

Tanto en el caso de la primera repetición como en la segunda, el r^2 es muy alto 0,99 y 0,95 respectivamente, del test- t de los parámetros del modelo de regresión se obtiene que los valores de interceptación son despreciables (P-valor = 0,07 y 0,65, respectivamente).

⁵⁶ Los valores entre paréntesis muestran un nivel de confianza del 95% para la pendiente de la línea. r^2 : coeficiente de determinación.

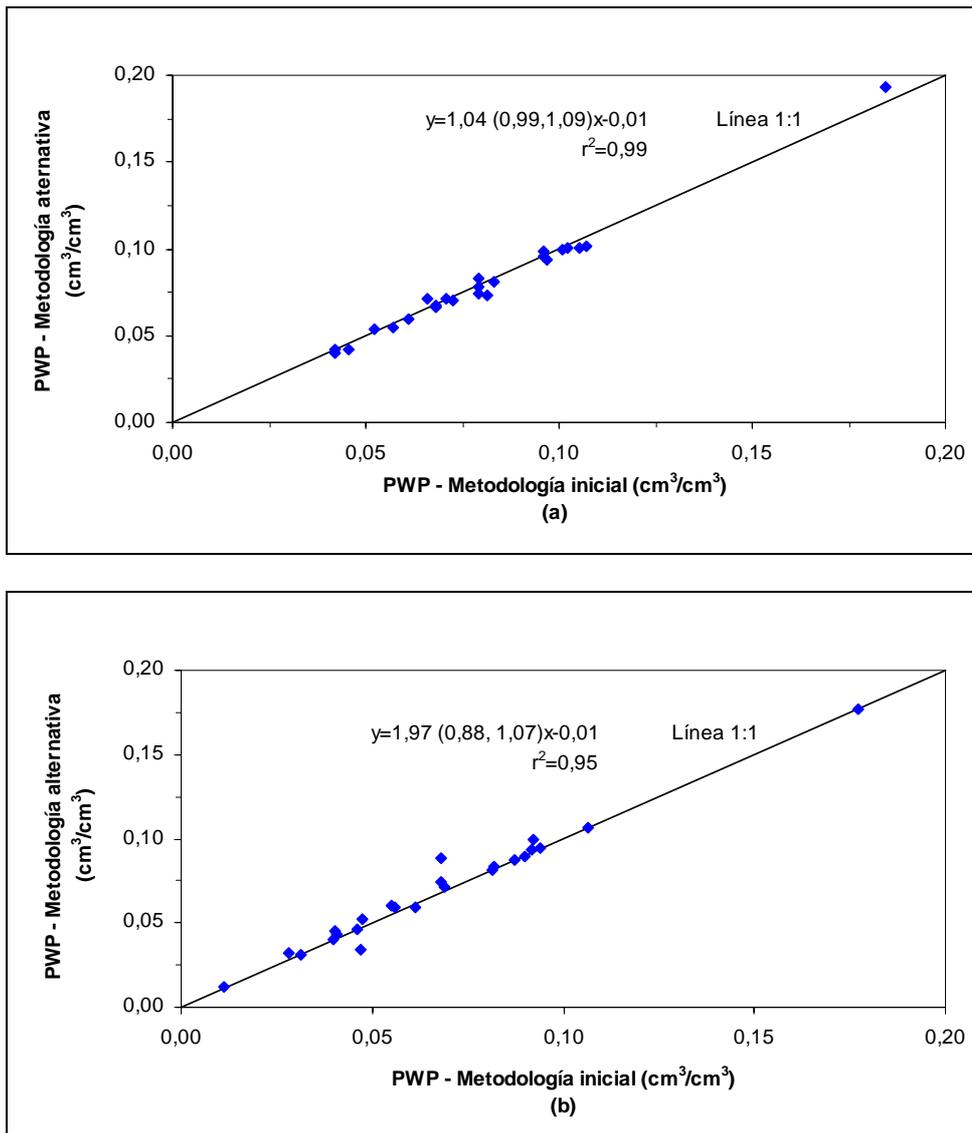


Figura IX.4. “Comparación del PWP obtenido a partir de la metodología inicial y de la metodología alternativa para la primera repetición (a) y la segunda repetición (b)”⁵⁷

Los tiempos de lectura se han cuantificado para el WAM de acuerdo a las dos metodologías descritas en el apartado 2 “Material y métodos” del presente capítulo.

Los tiempos empleados en las lecturas para cada muestra completa de acuerdo con la metodología inicial y la metodología sugerida, se sumaron. Los resultados se representaron en un diagrama de barras para su mayor clarificación (Fig. IX.5). Se obtuvieron evidentes reducciones en el tiempo empleado por muestra con las modificaciones realizadas a la metodología inicial. La figura IX.5 muestra la media de los tiempos utilizados de acuerdo a las diferentes metodologías empleadas. El valor medio

⁵⁷ Los valores entre paréntesis muestran un nivel de confianza del 95% para la pendiente de la línea. r^2 : coeficiente de determinación.

obtenido con la metodología inicial fue de 107,00 minutos, mientras que el valor medio obtenido con al metodología alternativa fue de 30,90 min.

Considerando jornadas de ocho horas al día de trabajo del operario encargado de la realización de las lecturas, son necesarios inicialmente 5,40 días. Sin embargo, solamente son requeridos 1,50 días si se toman las lecturas con la metodología alternativa.

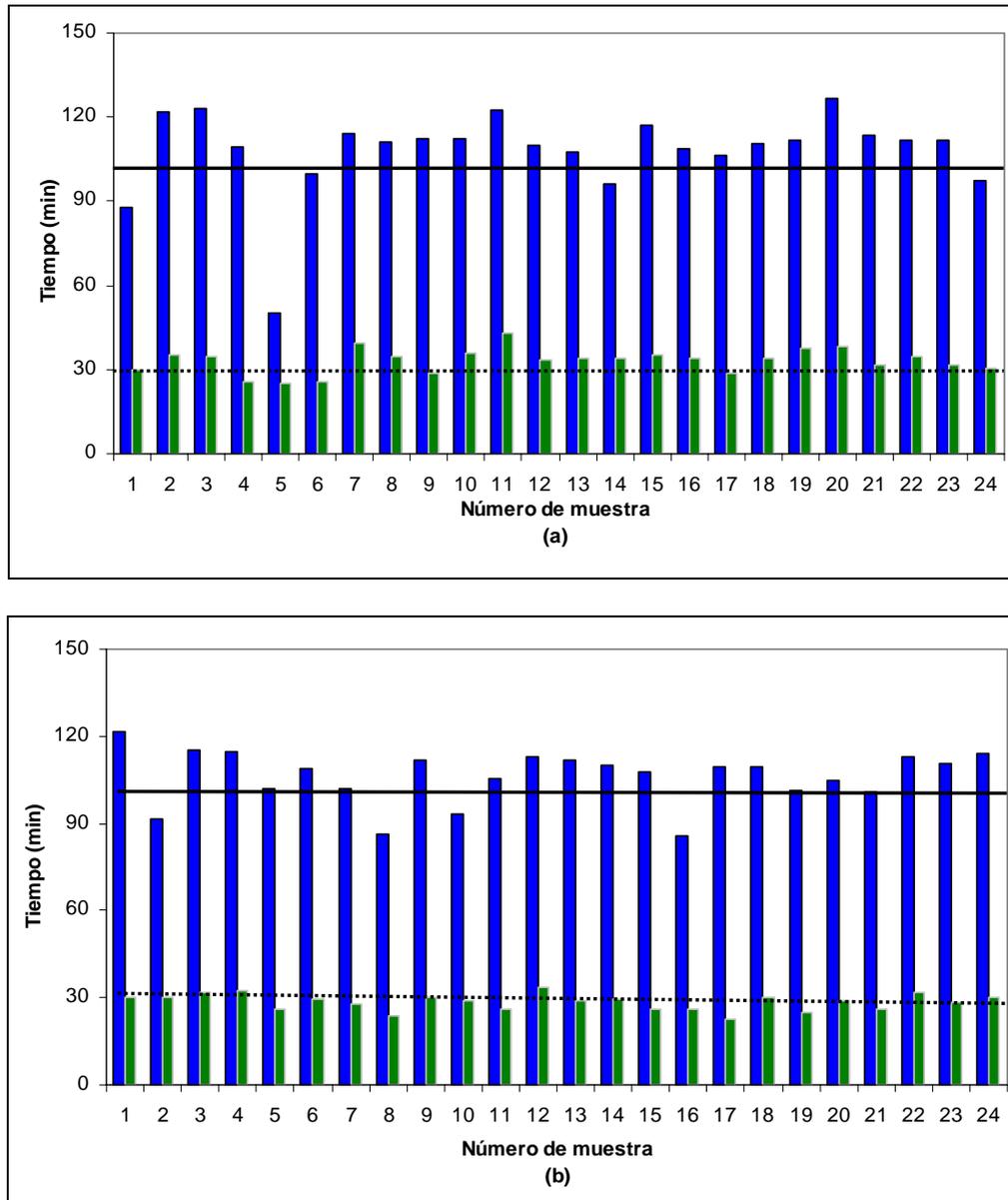


Figura IX.5. “Tiempo empleado en cada muestra con la metodología inicial y la metodología alternativa para la determinación del PWP, para la primera repetición (a) y la segunda repetición (b)”; metodología inicial (■) y tiempo medio (—); metodología alternativa (■) y tiempo medio (.....).

3.2 Comparación de metodologías alternativas.

La figura IX.6 muestra una correlación aceptable entre el PWP estimado con la PP y el PWP estimado con el WAM de acuerdo con la metodología alternativa. El punto que muestra el más alto valor de PWP (tanto con la PP como con el WAM) se corresponde con una muestra de suelo con un contenido en arcilla del 55%. La figura IX.6 muestra que, en general, los valores de PWP estimados utilizando el WAM muestran valores inferiores que los obtenidos con la PP. El error medio cometido se cifra en $0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Hay que tener en cuenta que Klute (1986) recomendaba preferiblemente 2 ó 3 días de equilibrado, mientras que Gee *et al.* (2002) no alcanzaron el equilibrio en una muestra limo-arcillosa con un tiempo de medida de 10 días a una presión de 1,55 MPa utilizando la PP⁵⁸.

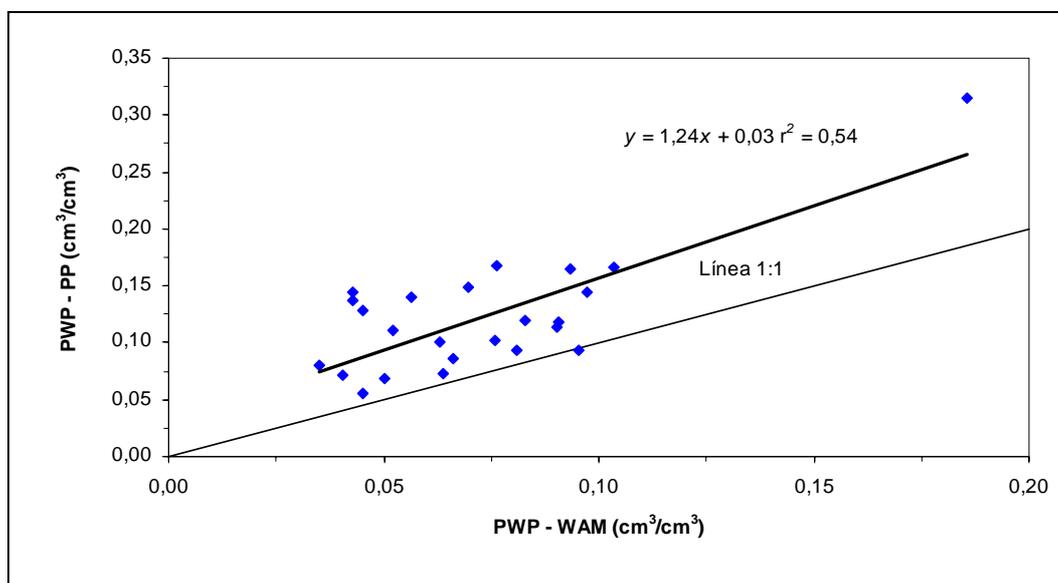


Figura IX.6. “Método de la PP vs. método del WAM para la estimación del PWP”. Los valores se corresponden para el WAM con la media de las dos repeticiones siguiendo la metodología alternativa; modelo de regresión lineal (—); r^2 , coeficiente de ajuste.

Para la estimación del PWP con el WAM, los tiempos de humectado, secado posterior y pesado han sido considerados a mayores de los tiempos de medida analizados en la sección previa. El tiempo de humectado por muestra es el siguiente: 8 horas con la metodología inicial y 4 horas con la metodología alternativa (debido a la posibilidad de tomar más lecturas por día). Para la PP, los diferentes tiempos son divididos en función de que 12 muestras pueden ser analizadas en cada turno, es decir, 24 horas para la saturación, 12 horas para el equilibrado, 48 horas para la extracción y 24 horas para el secado y posterior pesado.

⁵⁸ Durante el transcurso de esta investigación, determinados autores cuestionan la idoneidad del empleo de la PP como método para la determinación del PWP argumentando que para el potencial considerado la conductividad hidráulica de las muestras en el plato de presión es demasiado baja como para que se lleve a cabo el equilibrio a esos potenciales (Decagon Devices, 2006a). En este capítulo, la autora considera que otros factores pueden ver influenciado el resultado obtenido respecto a la diferencia entre la PP y el WAM, asunto tratado posteriormente en el capítulo X.

La tabla IX.3 muestra una considerable reducción en el tiempo empleado en la totalidad de los análisis utilizando el WAM de acuerdo con la metodología alternativa. El tiempo disminuye de 9 horas con la PP a 4,5 horas con el WAM siguiendo la metodología alternativa, suponiendo una reducción a la mitad de tiempo. Sin embargo, el WAM requiere un mayor número de horas de trabajo del operario debido a que los tiempos de lectura no existen en el método de la PP. El operario utiliza un tiempo similar en el humectado de la muestra (WAM) o la saturación de la misma (PP), en colocar las muestras en el horno y pesar las muestras con ambos instrumentos. La única fase en que los tiempos requeridos son diferentes es en la lectura (tomada con el WAM) con una media de 31 minutos por muestra, y el equilibrado a 1,55 MPa, realizado gradualmente durante 12 horas. El equilibrado no requiere la presencia permanente del operador en el laboratorio en el que esté situada la PP.

Tabla IX.3. “Resumen de los tiempos requeridos para la estimación del PWP con la PP y el WAM, de acuerdo a las dos metodologías utilizadas”

Tiempo	WAM		PP
	Metodología		
	Inicial	Alternativa	
<i>Media aritmética (min)</i>	587,00	270,90	-
<i>Desviación típica (min)</i>	8,40	2,40	-
<i>Mínimo (min)</i>	556,10	265,80	-
<i>Máximo (min)</i>	599,40	274,70	-
<i>n</i>	24,00	24,00	24,00
<i>Tiempo por muestra (h)</i>	9,80	4,50	9,00

En vista de los resultados presentados, se necesita para la fase de obtención del equilibrio un tiempo más largo. Bajo esta premisa, y aumentando en un día el tiempo de equilibrado, el tiempo requerido para estimar el PWP con la PP se vería aumentado en 2 horas en comparación con los resultados obtenidos en este estudio.

4. Conclusiones.

La bibliografía existente considera el empleo de los WAMs como un método estable para la determinación del contenido de agua a bajos potenciales, particularmente para la determinación del PWP, el cual es una herramienta variable en el manejo del riego. La fiabilidad de las mediciones a bajos potenciales (-1,55 MPa) ha sido validada para el tipo de suelos estudiados en la zona regable de Terra Chá, comparando la misma muestra en diferentes sesiones, el efecto de la reducción de los porcentajes de contenido en agua

considerados inicialmente y el número de lecturas realizadas para cada porcentaje, reduciéndose a la mitad en ambos casos. La rapidez de las lecturas aportadas por el WAM se ha verificado mediante análisis estadístico, comparando ambas metodologías y también con un método alternativo como la PP.

Del estudio de las metodologías se deduce que el WAM implica una reducción de más de la mitad del tiempo de lectura por muestra, mientras que los resultados del PWP no muestran diferencias significativas; la comparación del tiempo total requerido para la estimación del PWP con ambas metodologías supone una reducción del tiempo empleado a la mitad, suponiendo en el caso de la PP el doble del tiempo considerado, siendo necesarias 4,50 y 9 horas por muestra respectivamente. Estos resultados contrastan con el hecho de que el operario necesita más horas de trabajo con el WAM que con la PP, debido a etapas que existen en la metodología del WAM y que no existen en el caso de la PP. No obstante, en el caso de la búsqueda de una metodología rápida en lo que a aportación de resultados se refiere, está perfectamente recomendada.

Finalmente, se ha observado una aceptable correlación entre los resultados de la estimación del PWP empleando el WAM y la PP. Sin embargo, los valores de PWP estimados con el WAM son inferiores a los estimados con la PP. Estos resultados pueden deberse al inadecuado equilibrado de la PP, aunque el tiempo de equilibrio considerado durante la investigación concuerda con el valor inferior sugerido por diferentes autores. En este sentido, trabajando con un tiempo superior de equilibrio en la PP haría necesario la verificación de que el pobre ajuste observado entre los valores estimados del PWP con la PP o con el WAM y la línea 1: 1 se debe a la pobre estimación del PWP con la PP o a otras causas no contempladas inicialmente en esta investigación.

5. Referencias bibliográficas.

- Álvarez, C.J., Cancela, J.J., Fandiño, M.** 2005. Characterization of irrigation holdings in the Terra Cha region of Spain: a first step towards a water management model. *Water Resources Management*. **19** (1): 23-36.
- Black, C.A.; Evans, D.D.; White, J.L.; Ensminger, L.E.; Clark, F.E.** 1965. Methods of soil analysis-Part 1: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Monograph N°9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T.** 1964. Hydraulic properties of porous media. Vol. 3. Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins. pp. 1-27.
- Brown, R.W.; van Haveren, B.P.** 1972. Psychrometry in water relations research; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan.
- Campbell, G.S.** 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Science*. **117** (6): 311-314.

- Campbell, G.S.; Gardner, W.H.** 1971. Psychrometric measurement of soil water potential: temperature and bulk density effects. *Soil Science of America Proceedings Journal*. **35**: 8-12.
- Campbell, G.S.; Shiozawa, S.** 1992. Prediction of hydraulic properties of soils using particle size distribution and bulk density data. En: Proceedings of an International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California Press, Berkeley. pp 317–328.
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X.; Pereira, L.S.** 2006a. Modelling for improved irrigation water management in a temperate region of Northern Spain. *Biosystems Engineering*. **91** (1): 151-163.
- Castelao, A.M.** 1989. Aportación al estudio de la hidromorfia de los suelos de Terra Chá y su influencia en la génesis y capacidad productiva. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.
- Cousin, I.; Nicoullaud, B.; Coutadeur, C.** 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*. **53** (2): 97-114.
- Decagon Devices.** 2002. Generating a soil moisture characteristic using the WP4. Application note. Fecha de consulta: 27/06/2002. Disponible en: <http://www.decagon.com/appnotes/SoilCurve.pdf>.
- Decagon Devices.** 2006a. Determining the -15 bar (permanent Wilt) water content of soils with the WP4. Application note. Fecha de consulta: 11/10/2007. Disponible en: <http://www.decagon.com/environmental/wp4>
- Diaz-Zorita, M.; Grove, J.H.; Murdock, L.; Herbeck, J.; Perfect, E.** 2004. Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no till production system. *Agronomy Journal*. **96**: 1651-1659.
- Earl, R.; Taylor, J.C.; Wood, G.A.; Bradley, I.; James, I.T.; Waine, T.; Wels, J.P.; Godwin, R.J.; Knight, S.M.** 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability-Part. I: field observation of soil variation. *Biosystems Engineering*. **84** (4): 425-440.
- Gee, G.W.; Campbell, M.D.; Campbell, G.S.; Campbell, J.H.** 1992. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 1068-1070.
- Gee, G.W.; Ward, A.L.; Zhang, Z.F.; Campbell, G.S.; Mathison, J.** 2002. The influence of hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. *Vadose Zone Journal*. **1**: 172–178.

- Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R.** 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science*. **23**: 93-102.
- Klute, A.** 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Monograph Number 9 (Second Edition). (Klute, A. ed.). ASA, Madison, WI. pp: 635-686.
- Mannocchi, F., Mecarelli, P.** 1993. A soil-water-crop model for a large scale. Session III: Soil water flow and crop production under irrigation and drainage. En: 15th Congress on irrigation and drainage. The Hague. The Netherlands.
- MAPA.** 1986. Métodos oficiales de análisis de suelos, aguas y plantas. Tomo III. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Servicio de Publicaciones. Madrid.
- Merril, S.D.; Rawlins, S.L.** 1972. Field measurements of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Science*. **113**: 102-109.
- Mullins, C.E.** 2001. Matric potential. En: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (2nd Edn). (Smith, K.A.; Mullins, C., eds). Marcel Dekker, New York, USA. pp: 65-93.
- Ortega, J.F.; de Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M.; López, E.** 2004. MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrigation Science*. **23**: 61-75.
- Paz, A.; Neira, X.X.; Castelao, A.** 1996. Soil water regime under pasture in the humid zone of Spain: Validation of an empirical model and prediction of irrigation requirements. *Agricultural Water Management*. **29** (2): 147-161.
- Pereira, L.S.; Teodoro, P.R.; Rodrigues, P.N.; Teixeira, J.L.** 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. En: Rossi, G.; Cancelliere, A.; Pereira, L.S.; Oweis, T.; Shatanawi, M.; Zairi, A. (eds). *Tools for drought mitigation in Mediterranean regions*. Kluwer, Dordrecht. The Netherlands.
- Perfect, E.; Sukop, M.C.; Haszler, G.R.** 2002. Prediction of dispersivity for undisturbed soil columns from water retention parameters. *Soil Science Society of America Journal*. **66**: 696-701.
- Perfect, E.; Kenst, A.B.; Díaz-Zorita, M.; Grove, J.H.** 2004. Fractal Analysis of Soil Water Desorption Data Collected on Disturbed Samples with Water Activity Meters. *Soil Science Society of America Journal*. **68**: 1177-1184.
- Rawlins, S.L.; Campbell, G.S.** 1986. Water potential: Thermocouple Psychrometry. En: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Monograph Number 9 (Second Edition). ASA, Madison, WI. pp: 597-618.

- Richards, L.A.; Weaver, L.R.** 1943. Fifteen atmosphere percentages as related to the permanent wilting percentage. *Soil Science*. **56**: 331-339.
- Savage, M.J.; Ritchie, J.T.; William, L.B.; William, A.D.** 1996. Lower limit of soil water availability. *Agronomy Journal*. **88**: 644-651.
- Scanlon, B.R.; Andraski, B.J.; Bilskie, J.** 2002. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. En: Dane, J.H.; Topp, G.C. (eds.). *Methods of soil analysis, part 4, physical methods*. SSSA, Madison, WI. pp: 643-670.
- Scanlon, B.R.; Tyler, S.W.; Wierenga, P.L.** 1997. Hydrologic issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport. *Reviews of Geophysics*. **35** (4): 461-490.
- Smith, R.E.** 1993. Simulation of crop water balance with Opus. Session III: Soil water flow and crop production under irrigation and drainage. En: 15th Congress on irrigation and drainage, The Hague, The Netherlands.
- Stričević, R.; Čaki, E.** 1997. Relationships between available soil water and indicators of plant water status of sweet sorghum to be applied in irrigation scheduling. *Irrigation Science*. **18**: 17-21.
- Tokunaga, T.K.; Olson, K.R.; Wan, J.** 2003. Moisture characteristics of Hanford gravels: Bulk, grain-surface, and intragranular components. *Vadose Zone Journal*. **2**: 322-329.
- Townend, J.; Reeve, M.J.; Carter, A.** 2001. Water release characteristic. En: Smith, K.A.; Mullins, C. (eds). *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods (Second Edition)*. Marcel Dekker, New York, NY. pp: 95-140.
- USDA.** 2004. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>
- van Genuchten, M.T.** 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. **44** (5): 892-898.
- Zairi, A.; El Amani, H.; Slatni, A.; Derouiche, A.; Pereira, L.S.; Rodrigues, P.; Teixeira, J.L.** 2000. Irrigation scheduling strategies for horticultural field crops under limited water availability. En: Ferreira, M.I.; Jones, H.G. (eds). *Proceedings of the Third International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (Estoril, Jun-Jul 1999)*, Acta Horticulturae n° 537, ISHS, Leuven. pp: 503-510.

X

**ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN
EN LAS DETERMINACIONES PSICROMÉTRICAS CON
UN MEDIDOR DE ACTIVIDAD DE AGUA**

CAPÍTULO

CAPÍTULO X

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LAS DETERMINACIONES PSICROMÉTRICAS CON UN MEDIDOR DE ACTIVIDAD DE AGUA⁵⁹

“Hemos redefinido la tarea de la Ciencia como el descubrimiento de leyes que nos permitan predecir los acontecimientos dentro de los límites marcados por el “Principio de incertidumbre””
Stephen William Hawking (1942-). Físico, cosmólogo y divulgador científico del Reino Unido.

⁵⁹ **Martínez, E.M.; Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X.** 2006. Factores que intervienen en un medidor de actividad del agua en el suelo. Punto de marchitamiento. XXIV Congreso Nacional de Riegos, Lugo. 6-8 de junio de 2006.

Martínez, E.M.; Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X. 2007. Efecto de la temperatura en el uso de un medidor de la actividad de agua. XXV Congreso Nacional de Riegos, Pamplona. 15-17 de mayo de 2007.

ÍNDICE

Resumen	277
1. Introducción y objetivos	279
2. Material y métodos	281
2.1. Descripción de las muestras implicadas en el estudio.....	281
2.2. Técnicas de análisis de laboratorio.....	282
2.3. Ajuste de las curvas de retención de agua.....	282
2.4. Factores extrínsecos	282
2.4.1. Material de la cápsula empleada y tiempos de humectación y secado necesarios	283
2.4.2. Factores dependientes de las fluctuaciones de temperatura ambiental.....	284
2.4.2.1. Influencia de la absorción y evaporación de agua.....	285
2.4.2.2. Influencia de la condensación y reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra.....	285
2.4.3. Influencia de la solución de calibración empleada.....	286
2.5. Factores intrínsecos	286
2.5.1. Influencia de la temperatura a la que se realizan las lecturas del potencial....	286
2.5.2. Influencia de la humedad relativa en el compartimento del WAM.....	287
2.5.3. Influencia del potencial osmótico.....	287
2.5.4. Influencia del ventilador del WAM.....	287
3. Resultados y discusión	287
3.1. Tiempo de humectación	287
3.2. Tiempo de secado.....	289
3.3. Influencia de la evaporación y absorción de agua.....	291
3.4. Influencia de la condensación y reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra	292
3.4.1. Influencia de la condensación.....	292
3.4.2. Influencia de la reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra.....	294
3.5. Influencia de la solución de calibración empleada.....	295
3.6. Influencia de la temperatura ambiental y la temperatura de lectura.....	296
3.7. Influencia de la humedad relativa en el compartimento del WAM	302
3.8. Influencia del potencial osmótico.....	303
3.9. Influencia del ventilador del WAM.....	304
3.10. Tiempos empleados en la realización de las lecturas	304
3.11. Reducción del tiempo de obtención del PWP en función de los factores considerados	306
4. Conclusiones y recomendaciones prácticas.....	308
5. Referencias bibliográficas	310

RESUMEN

La determinación de los factores influyentes en las determinaciones psicrométricas se presenta como un aspecto a resolver cuando el dispositivo empleado se trata de un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM). Este trabajo analiza la influencia de diversos factores sobre la determinación del potencial, la obtención de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC) y, consecuentemente, sobre la obtención del punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP). Los factores analizados dependen tanto de las condiciones propias del aparato como de las condiciones externas al mismo, siendo los considerados: material de la cápsula utilizada, tiempos de humectación y secado necesarios, evaporación o absorción de agua por la muestra, condensación e influencia de la reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra, solución de calibración empleada, temperatura a la que se realizan las lecturas, efecto de la presión osmótica, influencia de la humedad relativa y, por último, el efecto del ventilador del compartimento de lectura.

El empleo de cápsulas metálicas se presenta como un factor importantísimo de cara a establecer una metodología rápida y concisa, permitiendo el ahorro de 1 minuto por cápsula, lo que supone 4 minutos por muestra. Resultan igualmente determinantes los tiempos de humectación y secado considerados en el protocolo, pudiéndose reducir estos a 20 horas y 8 horas respectivamente frente a la metodología tomada inicialmente como referencia que propone 24 horas. Se propone obviar la fase de secado realizando una corrección inicial de la humedad de las muestras, lo cual es factible siempre y cuando se tomen las medidas oportunas para evitar la influencia de los otros factores considerados. Para ello, se propone la humectación en las propias cápsulas de lectura, sellándolas de forma que su estanqueidad quede asegurada, para posteriormente introducirlas en un envase de plástico y este en uno de fibra de vidrio. De este modo se evitan los factores vinculados con la modificación del contenido de agua tanto en la muestra como en el espacio de cabeza del recipiente que la contiene, así como la variación de temperatura. Respecto a este factor se proponen ecuaciones que nos permiten obtener los parámetros que definen las ecuaciones que describen la variación del potencial con la temperatura de forma bastante fiable. No obstante se recomienda realizar un futuro análisis considerando un mayor número de temperaturas para el estudio.

Se recomienda evitar fluctuaciones de temperatura que lleven asociadas la variación de la humedad relativa ya que ambos factores ocasionan variaciones de potencial y por tanto de PWP. Así mismo, se procurará minimizar al máximo el tiempo de permanencia de la cápsula en el compartimento con el ventilador en funcionamiento.

La humectación de las cápsulas, debido a las características del agua de abastecimiento local, podrá realizarse indistintamente con agua desmineralizada o de abastecimiento.

Por último, a tenor de los resultados obtenidos se recomienda emplear con precaución para el área considerada el WAM con control de temperatura, frente al modelo que no dispone de esta característica, recomendando un análisis de los distintos factores tanto intrínsecos como extrínsecos al mismo, que puedan ocasionar las discrepancias en los resultados observadas.

1. Introducción y objetivos.

Cada vez se hace más patente la limitación de los recursos hídricos disponibles y la competencia entre los diversos sectores que pretenden acceder a los mismos. Especialmente desde nuestro ámbito de actuación, la agricultura, donde el uso consuntivo del agua es el más elevado, preocupa especialmente articular modelos de gestión del recurso que permitan su uso racional, garantizando su calidad y compatibilizando los usos con todos los demás sectores demandantes.

La medida y el seguimiento del agua aplicada en el riego es un aspecto esencial en la gestión eficiente de la misma. Para la determinación de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC) existe una amplia metodología, permitiendo establecer los “*hydrolimits*”⁶⁰, necesarios para cuantificar la reserva de agua útil (*available water content*) (AWC) disponible para diferentes cultivos (Klute, 1986; Zazueta y Xin, 1994; Mullins, 2001). Los “*hydrolimits*” se consideran como determinados contenidos de agua asociados a valores de potencial (Skalová *et al.*, 2000; Štekauerová *et al.*, 2002; Orfánus, 2005; Orfanus y Mikulec, 2005). Presentan especial significación los referidos al punto de marchitamiento (*permanent wilting point*) (PWP) y la capacidad de campo (*field capacity*) (FC), que adquieren importancia a la hora de diseñar calendarios de riego y gestionar el agua requerida para ello.

Existe una clasificación genérica que escinde estos en dos subgrupos: los métodos que determinan el contenido de agua en el suelo y los métodos que determinan el potencial al que dicha agua está sometida (Villar y Ferrer, 2005). Este último subgrupo ha experimentado una evolución basada en la aplicación de la Psicrometría (Capítulo VIII).

Esta técnica surgió con la proposición de uno de los primeros psicrómetros (Spanner, 1951), experimentando desde entonces continuas evoluciones a través de la proposición de nuevos tipos de dispositivos. Destacar los estudios centrados en su uso en diferentes condiciones y campos de aplicación (Moore y Caldwell, 1972; Daniel, 1982; Barker y McKell, 1983), así como los centrados en la detección de los problemas que durante su aplicación pudiesen acontecer (Ficus, 1972; Brown y Johnston, 1976; Wiebe *et al.*, 1977; Wullschleger *et al.*, 1988).

De esta forma, las técnicas existentes inicialmente, se ven afectadas por diferentes factores tanto extrínsecos como intrínsecos al propio dispositivo, presentando problemas tanto en sus determinaciones de campo como de laboratorio; lo cual impedía centrarse adecuadamente en las determinaciones solicitadas, de forma que las investigaciones desarrolladas pasaron a centrarse en la detección y/o solución de los factores influyentes, y no en las determinaciones de potencial propiamente dichas sobre diferentes sustratos.

Considerando los principios de la Psicrometría, la determinación del tiempo de equilibrio de vapor entre la muestra y el aire que la rodea es un aspecto crítico para la obtención de resultados fiables (Brown y Oosterhuis, 1992). Además, se han detectado problemas con la conservación y tratamiento adecuado de las muestras y con la existencia

⁶⁰ Se refiere al término anglosajón empleado a nivel internacional para la denominación de los contenidos de agua a FC y PWP.

de gradientes y fluctuaciones de temperatura, aspectos característicos de los suelos (Brown y van Haveren, 1972). En este sentido, sobre la influencia de la temperatura en el potencial han versado las investigaciones de diversos autores (Gardner, 1955; Babcock y Overstreet, 1955; Taylor, 1958; Peck, 1960; Campbell y Gardner, 1971; Hopmans y Dane, 1986a; Hopmans y Dane, 1986b; Nimmo y Millar, 1986; Bach, 1992; Liu y Dane, 1993). Algunos de estos trabajos han llegado incluso a cifrar dicha relación (Hsieh *et al.*, 1972; Livingston, 1993; Passioura, 2001). El efecto de la temperatura, conjuntamente con los restantes factores implicados, provoca la obtención de lecturas nada fiables, resultando variables y por tanto dependientes de las condiciones ambientales.

Los fenómenos de condensación en las paredes del recipiente que contiene la muestra y la evaporación en superficie de la misma con la consiguiente pérdida de humedad, se solventarían estableciendo unas pautas adecuadas de tratamiento de la muestra que toda metodología de medición requiere. El establecimiento del tiempo de equilibrio necesario, por el contrario, no se consigue tan fácilmente.

Ante esta situación, Gee *et al.* (1992) hace referencia, por primera vez, a la determinación del potencial de agua en suelos con el empleo de los medidores de actividad de agua (*water activity meters*) (WAMs). Se trata de un aparato totalmente novedoso que revoluciona la Psicrometría con la aplicación de la “*chilled mirror dewpoint technique*”⁶¹. Esta técnica permite la obtención de medidas rápidas y confiables, estando teóricamente exento de los problemas anteriormente mencionados. Así, la obtención del tiempo de equilibrio adecuado y las mediciones independientes de las condiciones exteriores aparentemente parecen aseguradas, permitiendo incluso realizar determinaciones en muestras secas que anteriormente resultaban dificultosas. Su uso se generalizó rápidamente, sobre todo en la determinación del potencial de agua en suelos. Numerosos autores (Scanlon *et al.*, 1997; Mullins, 2001; Andraski y Scanlon, 2002; Scanlon *et al.*, 2002; Petry y Jiang, 2003; Rodríguez, 2004) describen y aplican este reciente progreso en la instrumentación.

Sin embargo, la detección y el análisis de los errores posibles, se presenta como un campo aún por resolver y analizar de forma pormenorizada en los WAMs, pese a llevar funcionando más de veinte años. En los últimos años, mientras esta investigación se llevaba a cabo, algunos autores han profundizado en la controversia surgida con este tipo de dispositivos y la teórica fiabilidad de los resultados aportados por ellos. Son de destacar en este sentido los estudios de Sreedeeep y Singh (2006a; 2006b), Thakur *et al.* (2006), Cardoso *et al.* (2007) y Patrick *et al.* (2007). Por otro lado, diferentes estudios han puesto de manifiesto la no idoneidad de este tipo de dispositivos para la determinación de uno de los “*hydrolimits*”, la FC (Cancela, 2004; Díaz-Zorita *et al.*, 2004; Perfect *et al.*, 2004) (Capítulos VII y IX). Por tanto, en este capítulo, se parte de la premisa inicial de que la resolución del propio dispositivo no lo permite y queda su uso reducido a la obtención del PWP.

Establecido el campo de aplicación idóneo en estos dispositivos, se plantea la posibilidad de observación de los factores de influencia en las determinaciones

⁶¹ “*Chilled mirror dewpoint technique*”: Podría traducirse como “*técnica enfriada del punto de condensación del espejo*”, no obstante se desconoce la existencia de un término castellano que la defina.

psicrométricas obtenidas con este aparato, permitiendo el establecimiento de un protocolo de medición fiable, riguroso y que a su vez resulte conciso.

Los objetivos del estudio son: la observación de los factores implicados en el proceso de medición con el uso de WAMs, en concreto el WP4-T y WP4 (Decagon Devices, Inc), con y sin control de la temperatura, y su análisis, siendo los factores considerados tanto intrínsecos como extrínsecos al propio dispositivo: material de la cápsula utilizada, tiempos de humectación y secado necesarios, evaporación o absorción de agua por la muestra, condensación e influencia de la reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra, solución de calibración empleada, temperatura a la que se realizan las lecturas, efecto del potencial osmótico, influencia de la humedad relativa (HR) y efecto del ventilador del compartimento de lectura. Derivado de este análisis se cuantificarán las posibles variaciones en el protocolo de medición inicial en términos de tiempo demandado.

2. Material y métodos.

2.1. Descripción de las muestras implicadas en el estudio.

El estudio se realiza a partir de 25 muestras procedentes de la zona de regadío de Terra Chá (Galicia, NO España) (Cancela *et al.*, 2006a). Los puntos de recogida de las muestras se determinan estableciendo una malla de 500x500 m situada sobre la zona de estudio, para posteriormente elegir aleatoriamente los puntos significativos de la misma.

Las muestras están constuídas por los cuatro tipos de suelos existentes en la zona considerada, 14 cambisoles, 9 gleysoles, 1 alisol y 1 fluvisol (Tabla X.1).

Tabla X.1. “Características físicas y químicas de los suelos analizados”

Muestras n=25	FG	FF	DAP	ARE	LIM	ARC	CO	MO	PH_A	PH_CL
<i>Mínimo</i>	1,56	58,94	0,66	29,47	15,34	14,20	1,93	3,32	4,30	3,80
<i>Máximo</i>	41,06	98,44	1,39	70,28	31,46	54,53	4,88	8,42	6,40	6,00
<i>Media arit.</i>	16,30	83,70	1,00	54,64	21,47	23,89	3,39	5,84	5,37	4,78
<i>Desv. típica</i>	9,26	9,26	0,21	9,43	4,31	8,89	0,82	1,41	0,46	0,52

FG: Fracción gruesa (%), FF: Fracción fina (%), DAP: Densidad aparente (gr/cm³), ARE: Contenido en arena (%), LIM: contenido en limo (%), ARC: Contenido en arcilla (%), CO: Contenido en carbono orgánico (%), MO: Contenido en materia orgánica (%), PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en Cl.

El tratamiento de las muestras se realiza en laboratorio mediante su tamizado a 2 mm, para posteriormente someterlas a un secado. Su conservación, hasta la humectación, se realiza en recipientes estancos a fin de evitar la posible ganancia de agua por parte de la muestra, lo cual podría alterar su contenido final de agua una vez humectada, no correspondiéndose con los porcentajes de humedad esperados (Capítulo IV).

No se considera la totalidad de las muestras a fin de agilizar el proceso en función de la metodología requerida en cada caso. De esta forma, 25 muestras se consideraron para el análisis de la temperatura, 24 para el análisis de la humedad relativa, 10 para los análisis referentes al material de la cápsula empleada, tiempos de humectación y secado y solución de calibración y 4 muestras en los restantes análisis.

2.2. Técnicas de análisis de laboratorio.

Para la determinación de la relación existente entre el potencial y el contenido de agua de las diferentes muestras, estas se humectan a diferentes porcentajes de humedad (5, 10, 15 y 20 % en peso). Posteriormente se procede a su lectura en el WAM siguiendo el protocolo de medición propuesto en los capítulos VII y IX. Para ello se emplean dos tipos de WAMs disponibles en el mercado, uno con control de la temperatura y otro sin control de la misma, modelos WP4-T y WP4 (Decagon Devices, Inc.) respectivamente. La elección y utilización de un modelo u otro depende del tipo de factor analizado y de las necesidades demandadas.

2.3. Ajuste de las curvas de retención de agua.

La WRC se obtiene de cada muestra representando el contenido de agua (g/g) frente al potencial de agua (-MPa). Los puntos así obtenidos se ajustan al modelo de Campbell (Campbell, 1985) de tipo exponencial $y = ax^{-b}$, lo cual permite la obtención del PWP en cada caso. Por ello que el análisis de los diferentes factores se realice por comparación a nivel de lecturas de potencial o a nivel de WRC y, consiguientemente, del PWP.

2.4. Factores extrínsecos.

Los factores extrínsecos vienen caracterizados por aquellos fenómenos derivados de condiciones externas a las propias características del dispositivo y que afectan de alguna forma a la obtención de medidas fiables. Dentro de ellos, se analiza el material de la cápsula empleada, los tiempos de humectación y secado necesarios y factores dependientes de las fluctuaciones de la temperatura ambiental, dentro de los que destacan el análisis de la influencia de la absorción y evaporación de agua y la influencia de la condensación y reducción del espacio de cabeza que contienen la muestra. Igualmente, se hace mención a la importancia de la solución empleada en el proceso de calibración, analizando el propio proceso, en si mismo.

2.4.1. Material de la cápsula empleada y tiempos de humectación y secado necesarios.

El proceso de medición del potencial de agua en las muestras se realiza conjuntamente considerando estos tres factores, siguiendo el protocolo establecido en los capítulos VII y IX. Únicamente en la fase de humectado, en lugar de considerar 24 horas, se cuestiona la necesidad de un intervalo de tiempo tan elevado. Por ello en el análisis se emplean 8 tiempos de humectación distintos: 0, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24 horas. Las fichas empleadas en el proceso se incluyen en el anexo II.

Transcurrido el tiempo de humectación considerado, se trasvasan 3 gr del contenido de los vasos a las cápsulas de lectura. Estas se encuentran disponibles comercialmente en dos materiales distintos: plásticas (polietileno de baja densidad) y metálicas (acero inoxidable). Para el análisis de la influencia del material se disponen las muestras en ambos tipos de cápsulas realizando las lecturas a los diferentes porcentajes de humedad. En cualquiera de los casos, la muestra se dispone poniendo especial atención a la cubrición total del fondo de la cápsula. Las cápsulas se pesan antes de introducirlas en el aparato. De esta forma se evita que se pueda falsear la medición realizada⁶².

Acto seguido, se introduce en el WAM la cápsula, momento a partir del cual se establecen tres tiempos diferentes hasta que el dispositivo aporta la lectura definitiva del potencial de agua. Estos son denominados⁶³ como "*tiempo de estabilización de la temperatura*", "*tiempo de lectura*" y "*tiempo total de lectura*". El primero de ellos contabiliza el tiempo desde el momento en que se introduce la cápsula en el aparato hasta que el aparato empieza a medir el potencial de la muestra. Durante este periodo el psicrómetro estabiliza la temperatura del aparato para que esta sea inferior a la permitida por el dispositivo. Esta operación llevará más o menos tiempo en función de la diferencia de temperatura entre la muestra (dependiente de la temperatura ambiental) y la temperatura del interior de la cámara en la que se introduce la cápsula. El "*tiempo de lectura*" se mide a partir del momento en que se estabiliza la temperatura hasta que el psicrómetro aporta la lectura del potencial definitiva, tras la realización de sucesivas aproximaciones. Se considerará "*tiempo total de lectura*" a la suma de los dos tiempos anteriores. Los tres tiempos se determinan en muestras medidas en cápsulas de ambos materiales.

Obtenido el valor del potencial se extrae la cápsula del WAM y se lleva a un horno a 105° C para la determinación del contenido de agua por el método gravimétrico. Este método establece que se dejen secar las muestras durante un periodo de 24 horas hasta peso constante (Porta *et al.*, 2003). No obstante, dada la pequeña porción de suelo que es incluida en cada cápsula, se considera la posibilidad de que no sea necesario un periodo de

⁶² Algunos autores (Decagon Device, 2006b) cuestionan el orden de ejecución de estas etapas sugiriendo que se debe realizar inicialmente la medición y posteriormente el pesado. No obstante, la autora considera que si las muestras se pesan inicialmente cerradas antes de la medición, se evita el efecto de la pérdida/ganancia de humedad que se provoca al sacar la muestra del compartimento debido a la diferencia de HR de la muestra una vez ha alcanzado el equilibrio en el interior del compartimento y la HR ambiental exterior.

⁶³ La denominación ha sido adoptada por la autora debido a que no se disponen de denominaciones previas por causa de no haberse investigado el fenómeno con anterioridad por otros investigadores.

tiempo tan prolongado. Por ello, se secan durante diferentes tiempos a fin de establecer el tiempo mínimo necesario para la obtención de un peso constante. Se consideran 6 tiempos de secado diferentes: 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas.

Independientemente del tiempo de secado considerado, todas las muestras se pesan tras ser retiradas del horno. De este modo, con este valor y el que se tomó antes de introducir la muestra en el WAM, se determina el contenido real de agua de la muestra. De esta forma se evita asociar los valores de potencial a valores irreales de contenido de humedad. Esto podría ocurrir porque la muestra inicialmente ya contiene algo de agua pese al secado previo al humectado y por tanto al humectar no se obtiene el porcentaje de humedad esperado. También podría deberse a que durante el proceso de medición se vea alterado el contenido de agua de la muestra.

La primera posibilidad, es contemplada brevemente en el capítulo IX para subsanar los posibles efectos que provocan sobre el porcentaje de humectación la presencia de un cierto contenido de humedad en la muestra antes de comenzar el protocolo. El protocolo a seguir con el WAM sería el contemplado anteriormente, no obstante no sería necesario pesar las muestras ni antes de las lecturas ni después de secarlas. Simplemente habría que realizar una corrección de la humedad en la muestra de modo que se toma unos gramos de la misma, se pesan, se ponen a secar 24 horas y se determinaría su contenido de humedad. Esta operación se podría simultanear sin problemas con cualquiera de las etapas del protocolo. A continuación, cada uno de los cuatro porcentajes de humedad considerados se modificarían aumentándolos en el contenido de agua inicial, de modo que las lecturas de potencial se relacionarían con los contenidos reales de agua y no con los teóricos. De este modo, en el protocolo de medición se obviaría la fase de secado y se acortaría el tiempo empleado. Pero para ello, durante el proceso habría que evitar cualquier alteración en el contenido de agua tras la humectación, motivo por el cual resulta de importancia el análisis de los factores que influyen en ese sentido. No obstante, en este trabajo se analiza el tiempo necesario para secar las muestras, bien sea empleando un procedimiento o el otro.

2.4.2. Factores dependientes de las fluctuaciones de temperatura ambiental.

Existen una serie de factores colaterales a considerar en cualquier determinación psicrométrica que se realice con un WAM, posean control de la temperatura o no. Estos factores se encuentran íntimamente relacionados con el modo de funcionamiento del propio dispositivo, basado en la detección de la HR del vapor en equilibrio con la fase líquida presente en el suelo (Mullins, 2001). Cualquier perturbación que se produzca en las condiciones de HR el aire presente sobre la muestra, conllevará asociado una alteración en las lecturas del potencial. Estos factores se encuentran, por tanto, vinculados al entorno que rodea a dicho aire y que puede alterar el equilibrio dinámico entre las fases, estando relacionados tanto con la muestra propiamente dicha como con el envase que la contiene. Se consideran los siguientes: evaporación y absorción de agua por la muestra, condensación en las paredes del recipiente y reducción del espacio de cabeza presente en el mismo.

2.4.2.1. Influencia de la absorción y evaporación de agua.

Tanto la evaporación como la absorción que se pueda producir por la muestra provocarán que el contenido de agua que contenga no sea el esperado, lo cual conllevará una determinación del potencial que no se corresponderá con la humedad esperada debido a la humectación. Dichos factores se pueden producir a lo largo de todo el proceso de medición, tanto durante el periodo de humectado como el de lectura. En este sentido, hay que considerar que las cápsulas que se suministran comercialmente no tienen un dispositivo de cierre que les proporcione estanqueidad.

Para determinar la influencia que sobre las determinaciones psicrométricas puede tener la posible evaporación o absorción de agua se procede a medir 4 muestras empleando cápsulas selladas con un material plástico y cápsulas sin sellar, dejando ambas a temperatura ambiente. En cada caso se realizó la lectura de los potenciales y la determinación del contenido de agua para el PWP.

2.4.2.2. Influencia de la condensación y reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra.

Otro fenómeno observable durante la preparación de las muestras para el WAM es la condensación que se produce en las paredes del recipiente que contiene la muestra. Este fenómeno se produce por la diferencia de temperatura que existe entre el interior y el exterior del recipiente de modo que fácilmente es observable cuando las condiciones externas no son estables, tal es el caso de locales sin control de temperatura, situación frecuente en los laboratorios.

Este fenómeno se considera íntimamente ligado al espacio de cabeza presente en el envase que contiene la muestra. Se considera “*espacio de cabeza*” al espacio presente entre la muestra y la tapa del recipiente que contiene la misma. Este espacio contendrá aire procedente del exterior, el cual, una vez introducida la muestra en el interior del recipiente y humectada convenientemente, se encontrará en equilibrio dinámico con la fase líquida de la muestra. Se considera inicialmente que a mayor espacio de cabeza más tiempo tardará en establecerse el equilibrio en el envase y por otro lado, más cantidad de agua puede condensar, dado que al existir más cantidad de aire este aportará más cantidad de agua, aunque el contenido de humedad por unidad de volumen en ambos casos sea el mismo.

Para analizar ambos factores se humectan las muestras considerando dos tipos de recipientes, vasos de plástico y cápsulas como las empleadas en la realización de las lecturas. En ambos casos, se dispone la muestra humectándola con la cantidad de agua correspondiente para alcanzar el porcentaje de humedad deseado. Para el análisis de la influencia del espacio de cabeza considerado se dejan sellados el vaso y la cápsula, para que no afectase el efecto posible de la evaporación, a temperatura ambiente. En el caso del análisis de la condensación se dispone una segunda cápsula, pero en este caso es introducida en un contenedor de plástico para asegurar la estanqueidad de la muestra y este en un recipiente de fibra de vidrio para evitar los cambios de temperatura. En los tres casos considerados (el vaso y las dos cápsulas) se deja transcurrir el tiempo de humectado de 24 horas y posteriormente se procede a su lectura.

2.4.3. Influencia de la solución de calibración empleada.

El protocolo de calibración sugerido por el fabricante (*Decagon Device, WP4 Dewpoint PotentialMeter. Operator's manual version 2.1*) se fundamenta en la realización de una única lectura con una solución de calibración preparada a tal efecto y de molalidad y potencial conocidos. Las soluciones de calibración para este tipo de dispositivos son cloruro sódico y cloruro potásico, no existiendo al comienzo de este estudio investigaciones previas en relación a la molalidad a emplear, ni si está debe estar próxima o no al rango de lecturas que se van a realizar. En la actualidad, Cardoso *et al.* (2007) cuestionan seriamente la idoneidad del protocolo a seguir en el proceso sugiriendo la realización de una recta de calibración con diferentes soluciones y dando especial importancia a la elección de la molalidad elegida, debiendo encontrarse próxima a las lecturas a realizar. En este sentido Thakur *et al.*, (2006) recomienda igualmente el seguimiento de otro protocolo de calibración. En esta investigación se pretende analizar el sistema de calibración propuesta por el fabricante, resultando esta *a priori* más rápida y fácil de realizar que las propuestas por otros autores y que, en un principio, por ser recomendada por el propio fabricante, se presenta como la más idónea a seguir.

Para ello se dispusieron 10 muestras a las que se procedió a determinar el potencial de agua y posteriormente el contenido de agua para el PWP mediante dos lecturas con soluciones de calibración de cloruro potásico a distintas molalidades: 0,5 m y 0,1 m.

2.5. Factores intrínsecos.

Los factores intrínsecos son aquellos que dependen del propio aparato o que están vinculados y/o derivados del funcionamiento del mismo. En este sentido, se analiza la influencia de la temperatura a la que se realiza la lectura del potencial, la humedad relativa en el compartimento del WAM, el efecto de la presión osmótica y del ventilador.

2.5.1. Influencia de la temperatura a la que se realizan las lecturas del potencial.

El análisis de la temperatura se realiza siguiendo dos hipótesis. Inicialmente se pretende corroborar la influencia de la temperatura con este tipo de dispositivos cuando no poseen control de temperatura, es decir, empleando el WP4 convencional. En este tipo de dispositivos la temperatura de lectura varía a medida que estas se realizan debido a dos causas, el propio calentamiento del aparato provocado por su funcionamiento y la variación de la temperatura ambiente provocada por el transcurso de las horas diurnas durante la jornada de trabajo. Para ello empleando cuatro muestras, se determina el potencial para los cuatro porcentajes de humedad a unas temperaturas dependientes del exterior, es decir, de la temperatura ambiente y se obtuvieron las curvas de retención de agua en cada caso. Se realizan dos lecturas para cada muestra, a temperaturas diferentes.

El otro frente en la investigación consistente en que en caso de apreciarse una variación de potencial con la temperatura, comprobar la importancia de que el WAM posea control de temperatura o no. De este modo se procede a la determinación del potencial en

distintas condiciones, es decir, considerando cuatro temperaturas diferentes. Dos de ellas se realizan con un WP4-T (con control de temperatura) a 20 y 25,7° C y las otras dos se realizan con un WP4 (sin control de temperatura) a dos temperaturas diferentes dependientes de la temperatura ambiental que hubiese en el momento de la determinación. El hecho de emplear dos aparatos diferentes nos permite, determinar cual se adecúa mejor a las características de la zona de estudio en función del factor analizado.

2.5.2. Influencia de la humedad relativa en el compartimento del WAM.

Las propias características del aparato y el hecho de fundamentar la determinación del potencial en función del contenido de agua presente en el aire contenido en el espacio de cabeza existente sobre la muestra y que se encuentra en equilibrio con la fase líquida que contiene la misma, ocasionan que cualquier variación de la HR presente en compartimento provoque una variación en las lecturas realizadas. Para este análisis se realizaron dos lecturas a cada muestra a una temperatura distinta, sobre 24 de las muestras consideradas (las mismas empleadas en el capítulo IX).

2.5.3. Influencia del potencial osmótico.

Debido a las propias características de este tipo de dispositivo en el que las lecturas aportadas de potencial son el resultado del sumatorio de potencial mátrico y potencial osmótico, es importante analizar que, pese a no tratarse de suelos salinos, el empleo de agua no desmineralizada pueda afectar a los resultados de PWP, sobreestimándolos, al existir un cierto potencial osmótico. Para ello se determina el potencial del agua de red municipal para los periodos en el que se han realizado las lecturas del potencial, analizando los resultados obtenidos.

2.5.4. Influencia del ventilador del WAM.

El WAM posee un ventilador en el interior del compartimento de la muestra cuya función en principio es acelerar el proceso de equilibrado de la fase gaseosa del compartimento con la fase líquida contenida en la muestra. Cardoso *et al.* (2007) destacan este fenómeno, entre otros. No obstante, lo que en un principio pueda parecer una ventaja a lo largo de esta investigación se ha determinado que puede interferir en los distintos factores considerados y, por tanto, en las lecturas realizadas. Este fenómeno se ha observado en la realización de dos de los estudios contenidos en este capítulo, el relativo a la influencia de la solución de calibración y el relativo a la HR.

3. Resultados y discusión.

3.1. Tiempo de humectación.

Con los ocho tiempos de humectación considerados se calcula el contenido de agua para el PWP y se comparan los resultados obtenidos en cada uno de los casos considerados

frente al PWP obtenido con 24 horas de humectación. Petry y Jiang (2003) encontraron en los estudios realizados con este tipo de dispositivos que a partir de 16-20⁶⁴ horas se podía considerar estable el tiempo de humectación. No obstante, en este estudio los PWP son comparables a partir de 20 horas, considerándose insuficientes las 16 horas inicialmente sugeridas (Fig. X.1). Igualmente los resultados a tiempo de humectación de 18 horas no resultan apropiados.

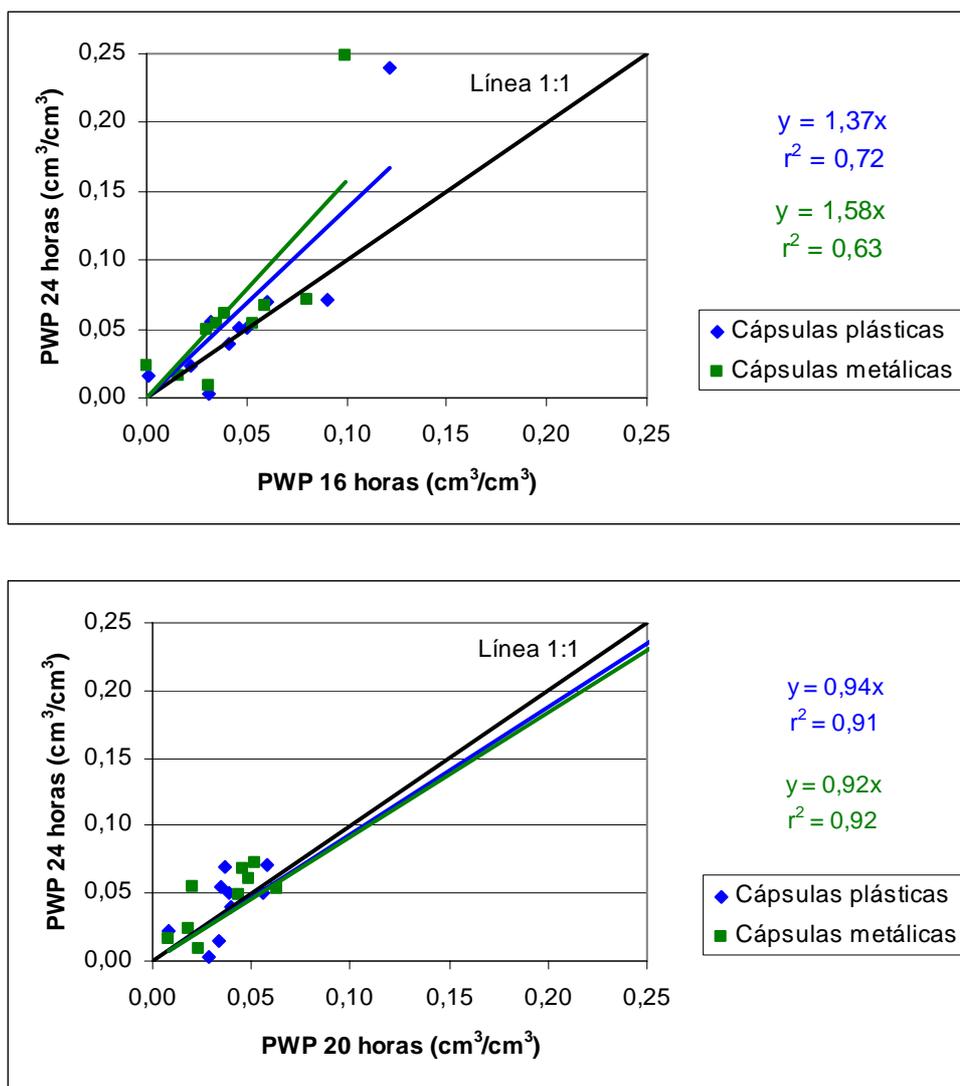


Figura X.1. "PWP en función del tiempo de humectación considerado"

Para 16 horas existen algunas muestras en las que la variación del potencial que se produce resulta significativa, al igual que sucede para las 18 horas; aguardando 4 horas más la diferencia se reduce, considerándose un tiempo más que suficiente y permitiendo reducir el tiempo empleado en el proceso de humectación, periodo durante el cual se

⁶⁴ Comunicación personal con Thomas Petry (25/02/2005).

redistribuye y homogeniza el contenido de agua de la muestra, en 4 horas frente a las 24 que en la metodología propuesta en el capítulo IX.

3.2. Tiempo de secado.

Considerando un tiempo de humectación máximo, 24 horas, a fin de que los resultados sean independientes de este factor, se observa la variación del contenido de agua en el PWP con el tiempo en que se dejaban secar las muestras, a fin de determinar su contenido de humedad real por el método gravimétrico. Los resultados obtenidos muestran que la obtención de un peso constante se produce en las cápsulas según indica la Tabla X.2.

Tabla X.2. “Estabilización del peso de las muestras según tiempos de secado y porcentaje de humedad”

Porcentaje de humedad (%)	Tiempo de secado de las cápsulas (h)					
	2	4	6	8	12	24
5	-	x	x	x	x	x
10	-	-	x	x	x	x
15	-	-	-	x	x	x
20	-	-	-	-	x	x

(x): Muestras que han alcanzado peso constante en el tiempo de secado considerado; (-) Muestras que no han alcanzado peso constante en el tiempo de secado considerado.

Independientemente del material de la cápsula empleada en la totalidad de las muestras se obtiene un valor constante del peso con 12 horas de secado. No obstante, en función de que estas tengan más o menos contenido en agua alcanzan el equilibrio a tiempos comprendidos entre las 4 h mínimas necesarias para las cápsulas con un 5% de humedad y las 12 h requeridas por las cápsulas con el 20%. Se construyó la WRC para cada uno de los casos y se determinó el contenido de agua para el PWP a fin de determinar la relevancia que tenía la obtención de un peso constante en el mismo (Figs. X.2 y X.3). La Fig. X.2 muestra la variación del PWP en función del tiempo de secado considerado, diferenciando entre los dos materiales de las cápsulas y tomando el tiempo máximo de humectación, es decir, 24 h.

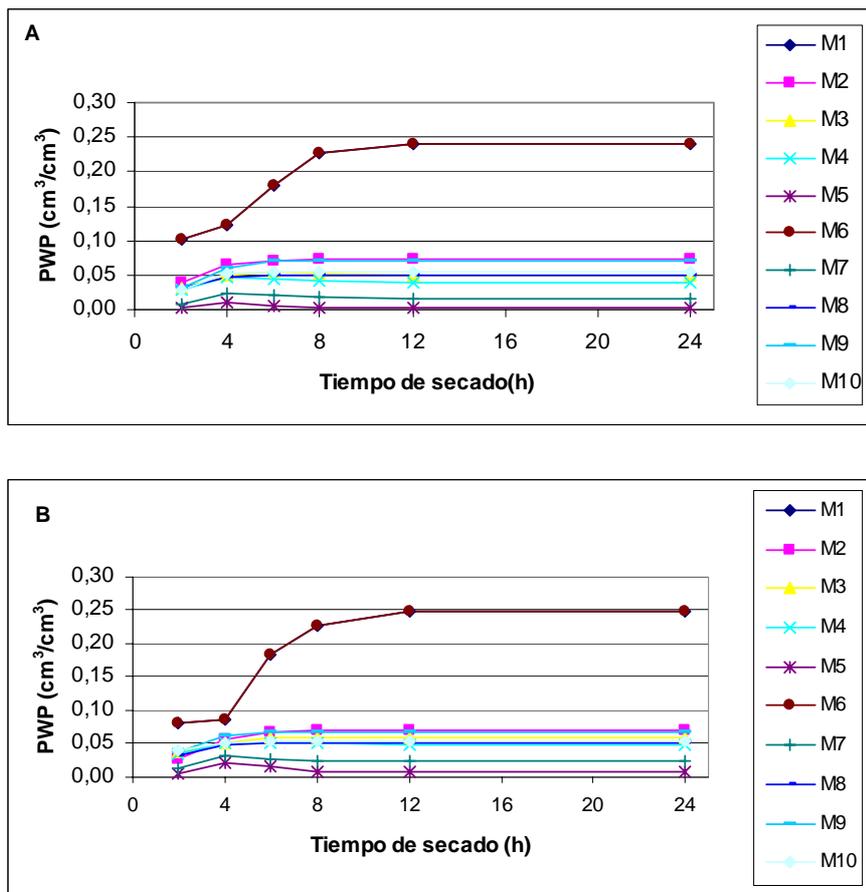


Figura X.2. “Variación PWP en función del tiempo de secado y del material de la cápsula considerados”
 A: Cápsulas plásticas; B: Cápsulas metálicas.

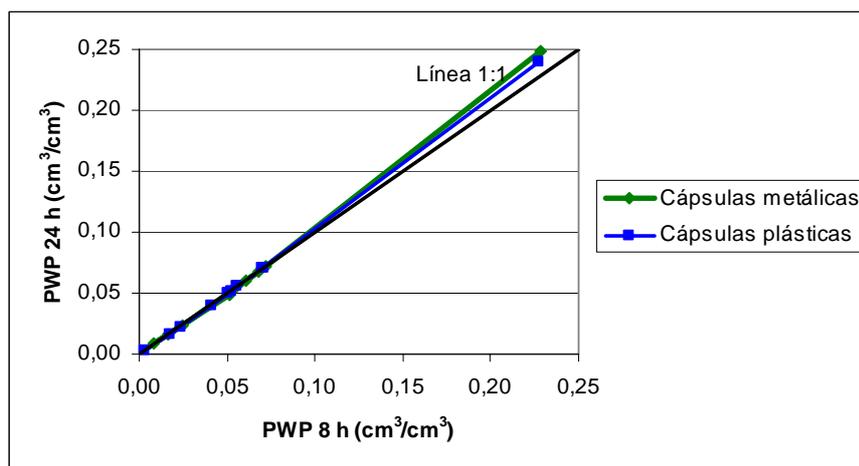


Figura X.3. “PWP obtenido con 8 y 24 horas de secado para diferentes materiales”

Los resultados son independientes del material de la cápsula empleada. El tiempo de secado mínimo necesario se estimaba en 12 horas, no obstante aunque no se alcance el

peso constante en la totalidad de los porcentajes de humedad considerados, no se ve muy afectado el contenido de agua del PWP que se obtendría con 8 horas de secado. En este sentido, se encuentra adecuado que, aunque las cápsulas con un porcentaje de humedad del 20% no han alcanzado el peso constante, con 8 horas de secado se podría calcular con fiabilidad el PWP. Considerando que la muestra M6 es donde se aprecia la máxima variación del PWP con el tiempo de secado, cifrada en $0,16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ con cápsulas metálicas y $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ con cápsulas plásticas, en caso de considerar 8 horas, esta variación se reduciría a $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectivamente.

3.3. Influencia de la evaporación y absorción de agua.

Se calcula la diferencia de potencial existente entre las lecturas consideradas con las cápsulas sin sellar y selladas (Fig. X.4), observándose que cuanto menor es el porcentaje de humedad considerado, mayor diferencia se observa entre ambas cápsulas, siendo la del 5% la más afectada. Estos resultados vienen a confirmar los trabajos de Andraski y Scanlon (2002).

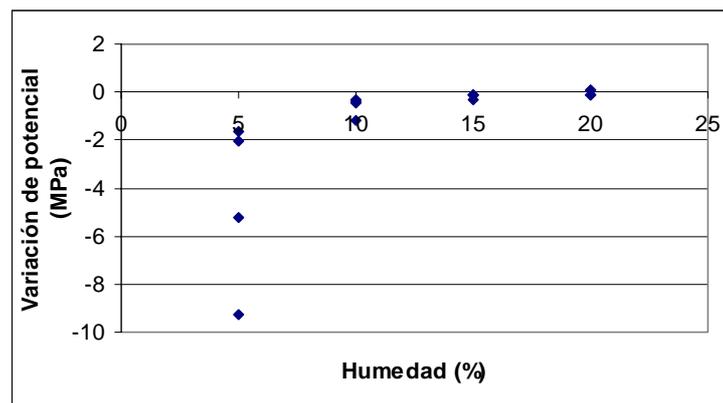


Figura X.4. “Variación del potencial obtenido entre cápsulas sin sellar y selladas en función del porcentaje de humedad”

La diferencia de potencial indica la existencia de una pérdida de agua de las muestras por evaporación, siendo superior el potencial obtenido en las cápsulas selladas que en las sin sellar, es decir, esta última tendría menos agua y por tanto el potencial sería más negativo. Esto se debe a que al tener un contenido de agua muy pequeño, es más fácil que esta se pierda por evaporación, provocando por la propia forma de la WRC, de tipo exponencial, que a pequeñas variaciones de humedad se produzcan grandes variaciones de potencial, incluso llegando a variaciones de más de 9 MPa (Tabla X.3). A un porcentaje de humedad de 20% se ha producido una ligera ganancia de agua, que provoca una variación de potencial aproximadamente igual en ambos casos, de 0,09 y 0,10 MPa, lo cual parece indicar que la ausencia de sellado si bien generalmente provocará una pérdida de agua por evaporación, puede darse el efecto contrario, es decir una ganancia de agua.

Tabla X.3. “Variación del potencial entre cápsulas sin sellar y selladas para cada porcentaje de humedad”

Muestra n = 4	HUMEDAD (%)*			
	5	10	15	20
Mínimo	-9,25	-1,16	-0,33	-0,15
Máximo	-1,66	-0,29	-0,10	0,10
Media arit.	-4,56	-0,57	-0,17	-0,03
Desv. típica	3,51	0,40	0,11	0,14

*La variación de potencial se determina por la diferencia entre el potencial obtenido con la cápsula sin sellar y la cápsula sellada (MPa).

Si se analizan como estas variaciones a nivel de potencial afectan a la determinación del PWP por efecto de la evaporación o absorción de agua, entre cápsulas sin sellar y selladas, se observa una variación media de $0,002 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. El 50% de los casos aporta un mayor contenido de agua en el PWP en la cápsula sin sellar, un 25% presenta el efecto contrario y un 25% permanece inalterable, no presentando efecto alguno sobre el PWP.

La presencia de una desviación típica superior en las cápsulas correspondientes al 5% podría interpretarse que es debido a que se trabajan con potenciales más negativos. A modo de ejemplo y para corroborar resultados, en este factor, se calculan los porcentajes medios que representa la variación sobre el potencial para cada porcentaje de humedad: 43,47% (5%), 32,85% (10%), 23,85% (15%) y 14,39% (20%). Se corrobora de esta forma que los potenciales más elevados no son la causa de una variación mayor.

3.4. Influencia de la condensación y reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra.

Si bien ambos factores se consideran relacionados se procede a su análisis por separado para su mayor clarificación.

3.4.1. Influencia de la condensación.

Una vez realizadas las mediciones de potencial se determina la variación que en ellas se produce en cada caso en función de que la cápsula sellada con la muestra haya estado a temperatura ambiente o a temperatura controlada. En función de ello, se obtienen los resultados de la figura X.5.

En tres de las cuatro muestras la mayor variación de potencial se produce cuando el contenido de humedad es el más pequeño (5%), seguido del potencial de 10% (Tabla X.4), con una desviación típica de 0,71 MPa y 0,21 MPa, respectivamente. Por el contrario, la variación que se produce en los porcentajes del 15 y 20% se presenta como semejante, con mínimo de -0,05 y -0,02 MPa, si bien difieren en la máxima variación, cifrándose esta en 0,04 MPa para el 15% de humedad y 0,19 MPa para una humedad del 20%. De esta forma,

se ven más afectadas aquellas muestras con un bajo contenido de agua al igual que sucedía con el factor anterior. No obstante, el sentido de esta variación del potencial no se muestra claramente, de modo que aunque globalmente se obtiene un potencial superior (más negativo) en la cápsula a temperatura controlada, en ocasiones se produce en sentido inverso e incluso en un caso no se aprecia variación de potencial en ambas lecturas. Este hecho se podría explicar en base a que a temperatura ambiente la muestra condensará en condiciones adversas de modo que va a presentar mayor contenido de humedad en el aire que se encuentra en el espacio de cabeza, que es en donde el WAM por su modo de funcionamiento realiza las lecturas, de modo que el potencial resultará ser menos negativo, es decir, la muestra estará más húmeda.

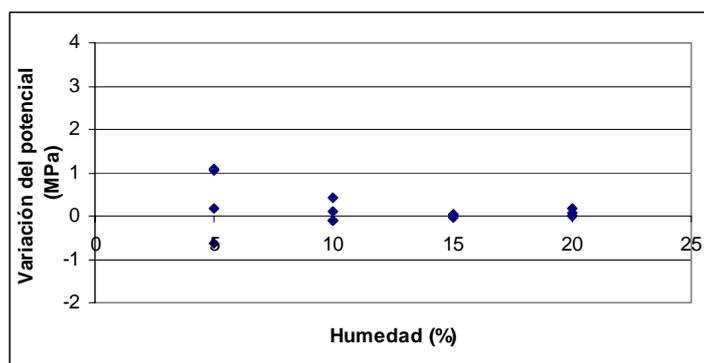


Figura X.5. “Variación del potencial obtenido entre cápsulas sellada a temperatura ambiente y a temperatura controlada en función del porcentaje de humedad”

Tabla X.4. “Variación del potencial entre las cápsulas a temperatura ambiente y a temperatura controlada”

Muestra n = 4	HUMEDAD (%)*			
	5	10	15	20
Mínimo	-0,62	-0,10	-0,05	-0,02
Máximo	1,10	0,42	0,04	0,19
Media arit.	0,42	0,08	0,00	0,06
Desv. típica	0,71	0,21	0,03	0,08

*La variación de potencial se determina por la diferencia entre el potencial obtenido con la cápsula a temperatura ambiente y la cápsula a temperatura controlada (MPa).

Si este fenómeno lo analizamos a nivel de PWP, se observa una variación media de $0,001 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, presentando un máximo de $0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. En el 50% de los casos se obtienen un contenido de agua correspondiente al PWP superior a temperatura ambiente que cuando se controla la temperatura, es decir se produjo una ganancia de agua. En uno de los casos se produce una pérdida de agua responsable de un mínimo de $-0,003 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y el 25% restante no se ve afectado por el factor permaneciendo invariable.

3.4.2. Influencia de la reducción del espacio de cabeza en el recipiente que contiene la muestra.

La influencia de la reducción del espacio de cabeza mediante el empleo de cápsulas directamente para la humectación frente a los vasos propuestos en el protocolo de medida del capítulo IX tampoco muestra de forma clara su tendencia (Fig. X.6). Si bien se vuelve a presentar una importante variación en los porcentajes bajos de humedad, concretamente en el 5%, en los restantes casos la variación producida es mínima.

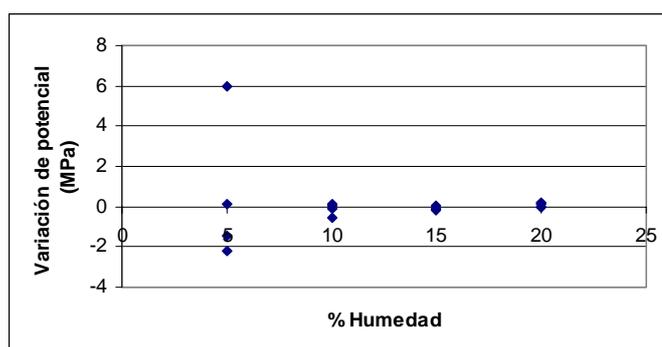


Figura X.6. “Variación del potencial obtenido entre la cápsula y el vaso en función del porcentaje de humedad”

Se presenta un máximo de variación de potencial de 5,99 MPa y un mínimo de -2,22 MPa en el porcentaje de humedad correspondiente al 5%, lo cual corrobora los resultados obtenidos gráficamente según los cuales las muestras cuanto más secas están más se ven afectadas por este factor. En el caso del 10% de humedad se obtiene también un mínimo importante respecto a los porcentajes restantes, de -0,55. Este porcentaje es igualmente el que mayor desviación típica presenta, 0,21 MPa (Tabla X.5).

Tabla X.5. “Variación del potencial entre la cápsula y el vaso ambos sellados y a temperatura ambiente”

Muestra n = 4	HUMEDAD (%)*			
	5	10	15	20
Mínimo	-2,22	-0,55	-0,16	-0,05
Máximo	5,99	0,10	0,05	0,21
Media arit.	0,60	-0,13	-0,07	0,07
Desv. típica	-0,05	0,21	0,07	0,10

*La variación de potencial se determina por la diferencia entre el potencial obtenido con la cápsula y el vaso ambos sellados y a temperatura ambiente (MPa).

Los resultados obtenidos respecto de este factor no presentan una tendencia clara, puesto que si bien se obtienen unas variaciones superiores en el caso del 5% de humedad respecto al factor anterior (la condensación), debido posiblemente a que ambos factores

están relacionados, dado que en este caso tanto el vaso como la cápsula, ambos sellados, se encuentran a temperatura ambiente, por lo que es posible que se haya producido algo de condensación por efecto de no haberse controlado la temperatura. En este sentido, se debería repetir la experiencia controlando la temperatura a fin de evitar lo máximo posible el efecto de la condensación. No obstante, el hecho de presentar unos máximos y unos mínimos para el porcentaje de humedad del 5% pone de manifiesto la influencia de la reducción del espacio de cabeza. Sin embargo, esta influencia no presenta una tendencia definida, dado que en el 50% de los casos provoca una variación de potencial entre la cápsula y el vaso totalmente o mayoritariamente negativa, es decir el potencial de la cápsula será más negativo que el del vaso y por tanto estará más seca. En el 50 % de los casos restantes se presenta el efecto contrario.

Si se analiza la repercusión que todo ello provoca en la determinación del PWP, en el 75% de los casos el contenido de humedad correspondiente al PWP es superior en las cápsulas respecto al de los vasos. Se obtiene una variación media a nivel de PWP de $0,002 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, llegando a ser de $0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ como máximo. El 25 % restante presenta el efecto contrario siendo responsable de la presencia de un mínimo en la variación de $-0,003 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

En este sentido, se deberá realizar la humectación directamente en la cápsula de lectura a fin de minimizar este efecto, lo cual concuerda con la propuesta de reducir el espacio de cabeza de Andraski y Scanlon (2002) y la humectación directa en cápsulas realizada por Perfect *et al.* (2004). Por el contrario, Brye (2003) realiza la humectación en envases independientes y a continuación trasvasa a las cápsulas para un posterior periodo de humectado, lo cual no se considera recomendable a tenor de la posible evaporación que durante dicho proceso se pudiese producir, tal como se observó en el factor analizado anteriormente.

3.5. Influencia de la solución de calibración empleada.

Representando los valores del PWP obtenidos con ambas soluciones de calibración de cloruro potásico, de 0,5 y 0,1 m, no se aprecian variaciones significativas entre ambas (Fig. X.7).

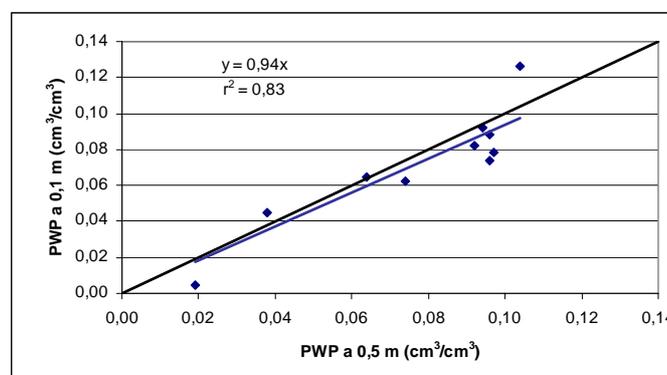


Figura X.7. “Influencia de la determinación del PWP empleando como solución de calibración cloruro potásico 0,5 y 0,1 m”

Se cifra el error medio cometido en $0,011 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, y siendo superior el PWP obtenido con la solución de 0,5 m en un 80% de los casos.

Considerando que las lecturas del WAM son inferiores a las obtenidas con el método considerado de referencia, la placa de presión (*pressure plate*) (PP) (Capítulo IX), parece más indicado el empleo de esta solución a fin de reducir el propio error que genera el WAM *per se*. El empleo de otros protocolos de calibración con este tipo de dispositivos en principio no parece indicada, dado que tal como reconocen sus autores se producen igualmente errores cuantificables con futuras correcciones a realizar en las lecturas, lo cual indica que no se solventaría el problema de un cierto error ocasionado por el propio proceso de calibración.

3.6. Influencia de la temperatura ambiental y la temperatura de lectura.

La determinación del potencial se realiza, siguiendo el primer frente considerado, en un rango de temperaturas comprendido entre $20,65$ y $26,76^\circ \text{C}$, dependiente esta en el momento de la lectura de la temperatura exterior, y, en menor medida, del propio calentamiento del dispositivo, por realizarse con el modelo WP4 (sin control de temperatura). Se determina la variación de potencial para cada porcentaje de humedad que se produce por la citada variación de temperatura, apreciándose claramente la influencia de la temperatura especialmente a bajos porcentajes de humedad de modo que las muestras más secas se verían más afectadas por este factor (Fig. X.8), tal como viene sucediendo en los otros factores analizados, y concordando con los estudios de Campbell y Gardner (1971) y Bach (1992). No se han podido corroborar los resultados aportados por Romero *et al.* (2001), respecto al sentido de variación de la temperatura con el potencial ni tampoco los aportados por Mohamed *et al.* (1992), observando una mayor influencia en suelos arcillosos.

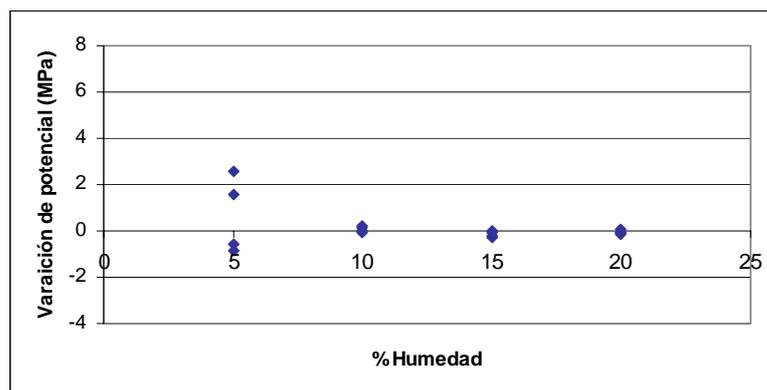


Figura X.8. “Variación del potencial en función de los porcentajes de humedad por efecto de la temperatura”

De este modo la máxima variación de potencial se produce entre las cápsulas con el 5% de humedad, 2,54 MPa, muy superior a la variación producida con el 10%, cifrada esta

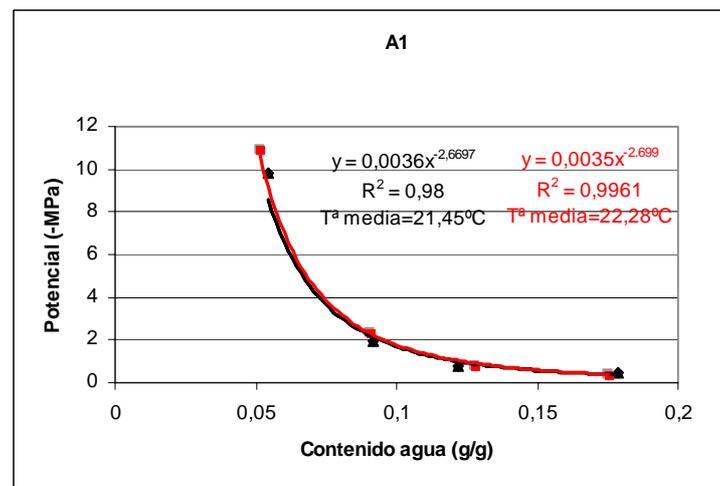
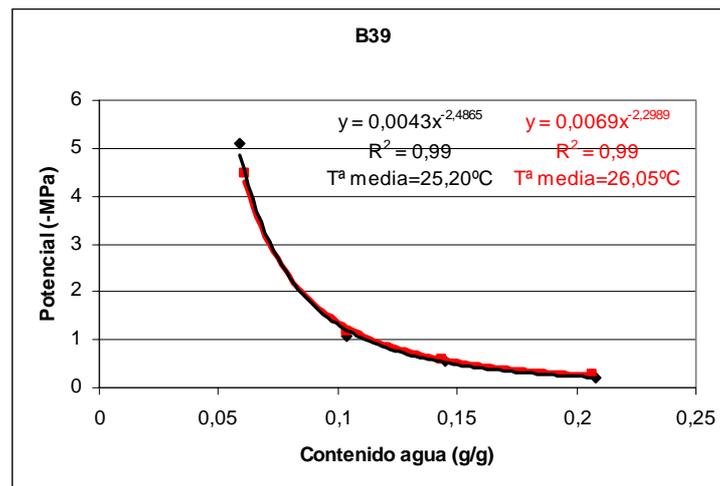
en 0,23 MPa. Asimismo, la máxima desviación típica se produce en las capsulas más secas, siendo parejas la producida en las restantes humedades (Tabla X.6).

Tabla X.6. “Variación del potencial entre cápsulas medidas a diferente temperatura”

Muestra n = 4	HUMEDAD (%)*			
	5	10	15	20
Mínimo	-0,85	-0,11	-0,26	-0,15
Máximo	2,54	0,23	0,00	0,08
Media arit.	0,66	0,07	-0,12	-0,05
Desv. típica	1,43	0,12	0,10	0,08

*La variación de potencial se determina por la diferencia entre el potencial obtenido con temperatura creciente (MPa).

Considerando que el WAM en el área de estudio se emplea para la determinación del PWP a partir de la WRC generada a partir de las lecturas, se intenta determinar la influencia o no de las variaciones observadas a nivel de potencial sobre la citada curva. Para ello se obtiene la WRC para cada muestra para las dos lecturas realizadas (Fig. X.9).



(Continúa)

(Continúa)

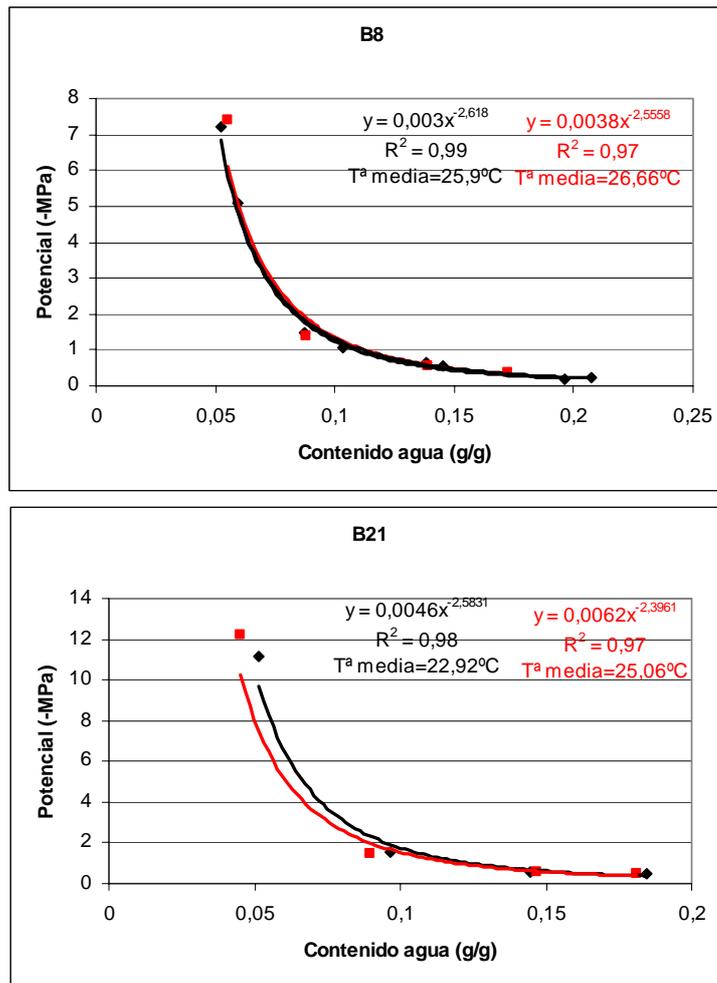


Figura X.9. “WRCs en función de la temperatura”

En la figura anterior se muestra la WRC obtenida a menor temperatura en color negro y la obtenida a temperatura superior en color rojo. En tres de las muestras en las que la variación de temperatura entre lecturas se encontraba comprendida entre 0,77 y 0,85° C no obtienen variaciones apreciables a nivel de curva. No obstante, en la muestra B21 en la que el incremento de temperatura se cifró en 2,14° C, las curvas presentan una discrepancia a bajos contenidos de agua, precisamente en el área donde debido a la forma de la curva de tipo exponencial se producen grandes cambios de potencial a pequeños cambios que se produzcan en el contenido de dicha agua. Se produce un desplazamiento de la WRC a la izquierda, fenómeno observable también en los estudios de Hopmans y Dane (1986a; 1986b). Es por ello que se procede a ver si este fenómeno se aprecia a nivel de obtención del PWP a partir de estas curvas.

Comparando el PWP obtenido a ambas temperaturas (Fig. X.10), el ajuste de los datos obtenidos se corresponde con un r^2 de 0,75, debiéndose este hecho a uno de los puntos que como puede observarse se distancia bastante de la línea 1:1, tratándose de la citada muestra B21. Ante la observación experimental del hecho de producirse variaciones en el PWP si la diferencia de temperatura es de varios grados, se procede a la realización

de cuatro lecturas a distintas temperaturas a un mayor tamaño muestral, considerándose en este caso 25 muestras. De esta forma se analiza que el problema no se encuentre en los datos de partida.

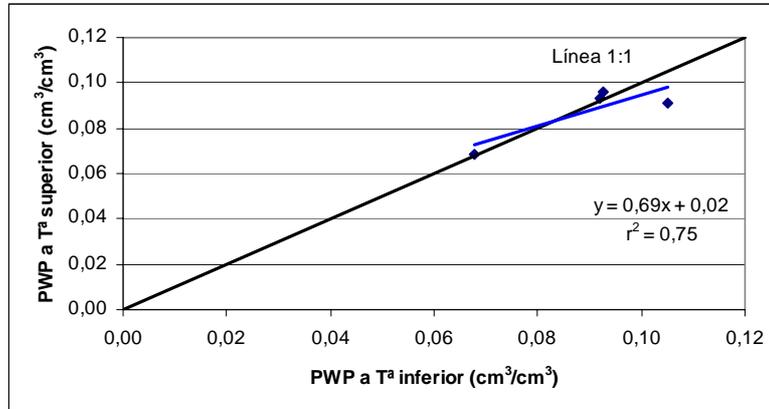


Figura X.10. “Variación del PWP en función de la temperatura de las lecturas realizadas”

Se procede a comparar el PWP a las cuatro temperaturas con el PWP obtenido con la PP, utilizando este como método comparativo. Dado que los valores de la PP fueron obtenidos empleando un tiempo de equilibrio de 48 horas y en el capítulo IX se ha recomendado la consideración de que este tiempo sea superior, se procede a estimar el PM empleando un tiempo de equilibrado de 5 días, pero utilizando en este caso una presión de 10 bar en vez de los 15 bar habituales. Esta modificación se realizó para evitar que se formasen burbujas ya que la placa porosa empleada en este tipo de determinaciones está diseñada para soportar como máximo la presión de 15 bar y cualquier exceso de presión puede desvirtuar los resultados obtenidos, por tanto se desaconseja llevarla a su límite de presión. Es por ello, que se aproximen los 15 bar recomendados a 10 bar para el PWP. En cualquier caso la idoneidad de esta aproximación se comprobó previamente con 20 muestras, tal como muestra la figura X.11.

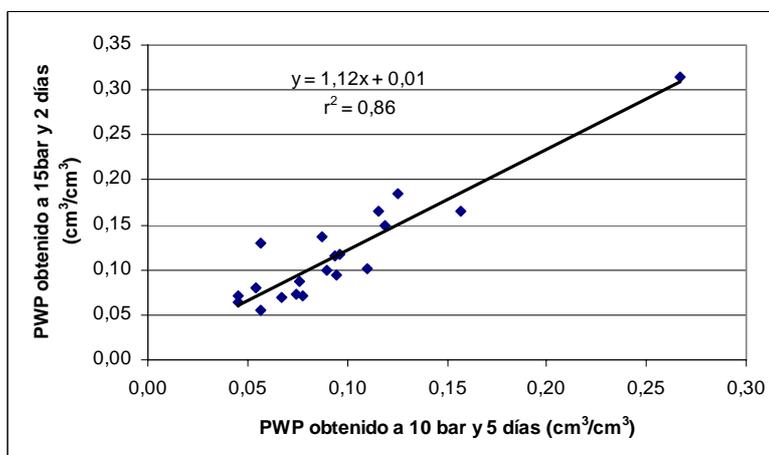


Figura X.11. “Comparación del PWP obtenido con la PP en función del tiempo de equilibrio y la presión considerados”

A continuación se muestran los datos obtenidos en las nuevas condiciones de equilibrado y presión comparándolos con las lecturas procedentes de los WAMs, realizadas según la metodología del capítulo IX (Fig. X.12).

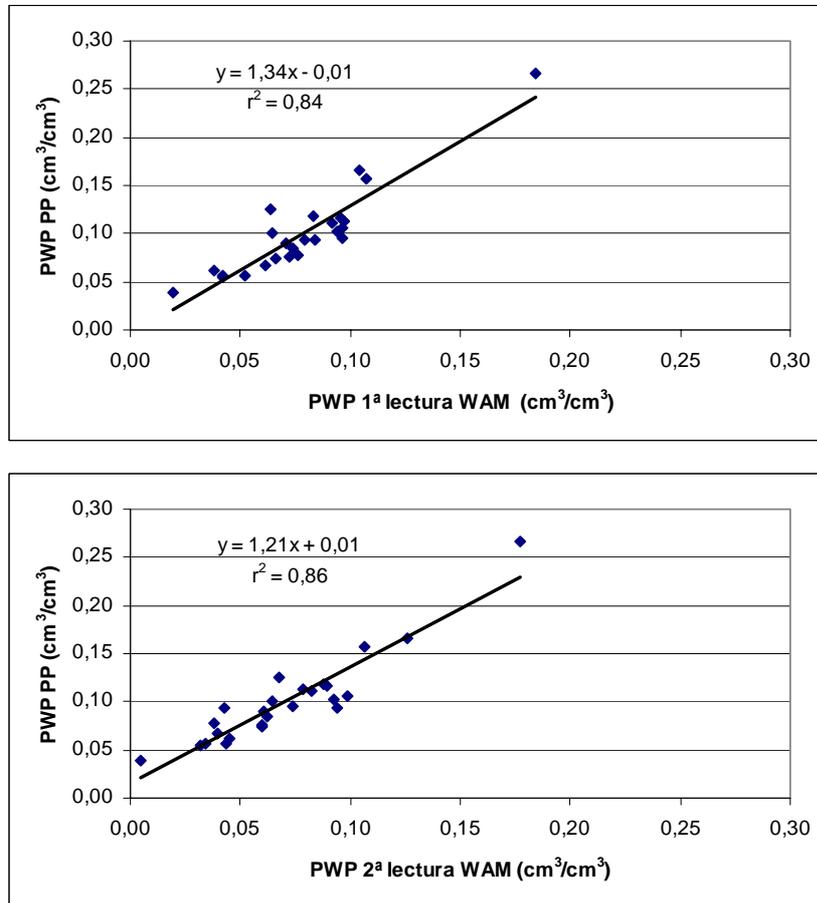


Figura X.12. “Comparación del PWP obtenido con la PP y con el WAM sin control de temperatura”

Si se comparan las dos lecturas realizadas en el WP4, sin control de temperatura, se observa que si bien el WAM produce una subestimación de los valores del PWP, lo cual corrobora los resultados obtenidos en el capítulo IX, mejorándose en este caso el coeficiente de ajuste obtenido que en ambas lecturas es superior a 0,8, lo cual indica que el problema no se encuentra en las lecturas realizadas sin control de temperatura y ni en las nuevas condiciones consideradas en la PP. Por el contrario, cuando se comparan los resultados obtenidos con el WP4-T, con control de temperatura, con la PP, se observa una discrepancia entre los mismos, obteniéndose a las dos temperaturas consideradas unos coeficientes de ajuste muy pobres (Fig. X.13).

Profundizando en el análisis y obviando la PP, si se comparan los resultados obtenidos por las dos lecturas del WAM sin control de temperatura entre si, cuando estas obviamente se realizaron a distinta temperatura, se observa la existencia de una relación entre ambas, con las consiguientes discrepancias debido a la ya mencionada diferencia de temperatura.

No obstante, cuando la comparación se realiza con las dos lecturas realizadas con el WP4-T con control de temperatura los resultados muestran la inexistencia de relación entre las lecturas realizadas (Fig. X.14).

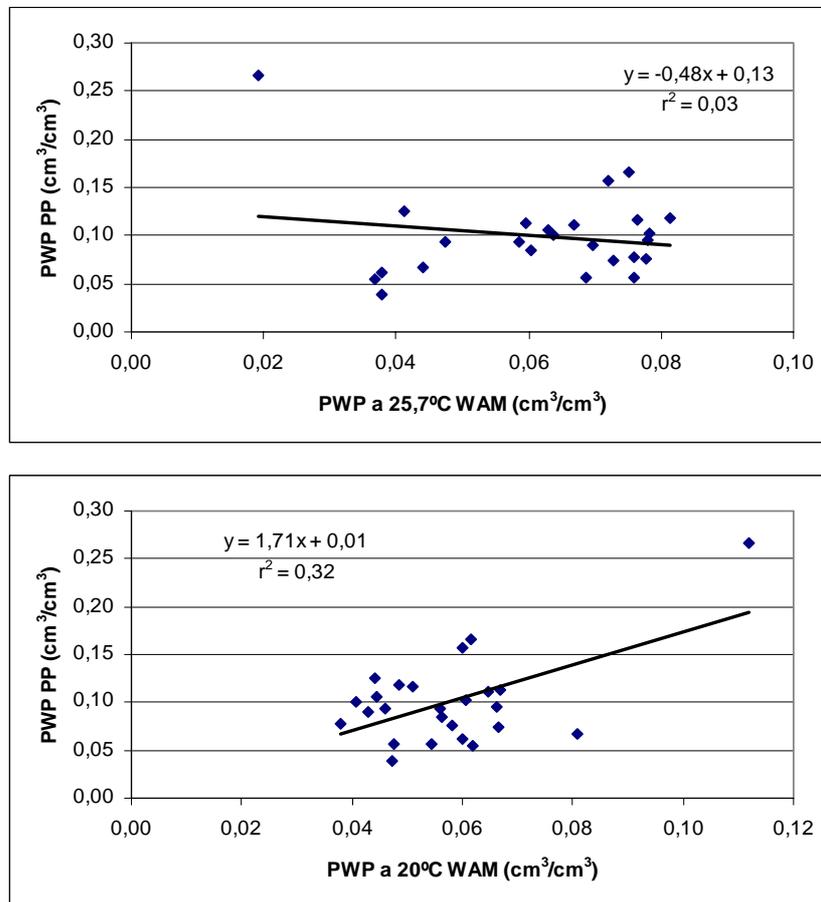


Figura X.13. “Comparación del PWP obtenido con la PP y con el WAM con control de temperatura”

A la vista de los resultados, se presenta un claro problema a la hora de realizar las mediciones con el dispositivo de temperatura controlada en el que, si bien el fabricante del dispositivo garantiza la realización de la totalidad de las lecturas a la temperatura fijada previamente por el usuario, no se obtiene resultados consistentes que puedan resultar fiables. Por el contrario, el dispositivo sin control de temperatura, aunque las lecturas sean dependientes de las condiciones externas y del propio calentamiento del aparato, a nivel de PWP no se aprecia una dependencia excesiva de la variable considerada, de modo que este podría emplearse sin necesidad de preocuparse por la temperatura externa.

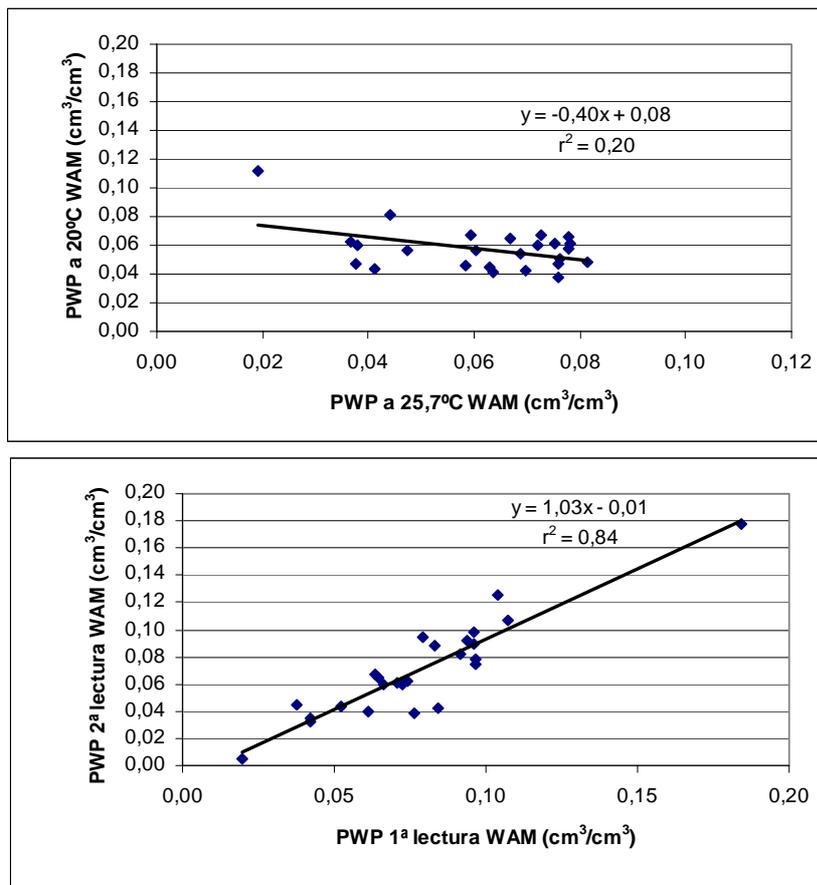


Figura X.14. “Comparación del PWP obtenido para cada una de las dos condiciones empleando los WAMs con y sin control de temperatura”

3.7. Influencia de la humedad relativa en el compartimento del WAM.

Con los datos procedentes de la Estación meteorológica más cercana (*Estación Meteorológica de Rozas*) se dispuso de los datos medios de temperatura y HR correspondiente al periodo en el que fueron realizadas las lecturas a las muestras. A partir de estos datos, se obtuvo la HR a la que se realizaron cada una de las mediciones en función de la temperatura de lectura. Por comparación entre las dos lecturas realizadas se obtuvo una variación media de $0,011 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en la determinación del PWP por una variación de 5,36% de HR. Si el análisis se realiza a nivel interno del aparato, la HR a la que se realizará la lectura viene determinada por la HR del compartimento y la humedad de la muestra. Las muestras fueron humectadas a cuatro porcentajes de humedad, correspondientes al 5, 10, 15 y 20% en peso. La humedad del compartimento dado que este se abre al exterior a fin de poder colocar la cápsula con la muestra en su interior, viene dada por la HR presente en el exterior. Como dato medio, se considera que para el periodo considerado la HR era del 49%. En función de ello, una vez introducida la muestra en la cámara se producirá un equilibrio dinámico entre la fase líquida de la muestra y la fase gaseosa del compartimento. La diferencia entre la humedad lograda en el equilibrio y la

humedad real de la muestra, será denominada “*amplitud del equilibrio dinámico*”⁶⁵. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla X.7.

Tabla X.7. “Valores de la amplitud del equilibrio dinámico en función de la HR interior y exterior del compartimento de lectura”

Humedad muestra (%)	Humedad relativa exterior (%)	Amplitud equilibrio dinámico (%)
5	49	22,00
10	49	19,50
15	49	17,00
20	49	14,50

Las muestras que se ven más afectadas por las variaciones producidas en la HR son las muestras más secas. Los resultados aportados no coinciden con Cardoso *et al.* (2007), en cuyo caso se producía una cesión de humedad del suelo a la atmósfera del compartimento, no al revés. En cualquier caso, en este apartado se analiza el posible incremento teórico, el cual puede verse modificado por las características del compartimento de lectura y su naturaleza estanca cuestionable.

3.8. Influencia del potencial osmótico.

La influencia del potencial osmótico se cuantifica a partir de los datos de conductividad eléctrica media para el período considerado durante el desarrollo de las mediciones. Dichos datos han sido facilitados por el Ayuntamiento de Lugo, para puntos de muestreo cercanos al Centro donde se realizaron los diferentes ensayos. La conductividad eléctrica se determinó por el método de ensayo *NF T 90-031: 1977*, siendo el máximo permitido para aguas de destinadas para este uso, de 2500 $\mu\text{S/cm}$. Como valor medio se obtienen 382,91 $\mu\text{S/cm}$, siendo el máximo alcanzado durante el periodo 4360 $\mu\text{S/cm}$. Para conocer la magnitud del potencial osmótico existe una relación:

$$\text{Potencial osmótico (MPa)} = - 0,036 \text{ Conductividad eléctrica (dS / m)} \quad (\text{X.1})$$

Si consideramos que para el máximo valor de conductividad eléctrica medida el valor asociado de potencial osmótico obtenido es de $4,360 \times 10^{-4}$ MPa, se puede afirmar que para esta tipología de suelos, el agua de abastecimiento empleada y la precisión del WAM empleado, no existe influencia alguna en las determinaciones de potencial.

⁶⁵ Se desconoce de un término adecuado para el parámetro considerado. Por semejanza a otros conceptos de “*amplitud*” empleados en otras disciplinas, se opta por tal denominación.

3.9. Influencia del ventilador del WAM.

La influencia se determina a dos niveles: sobre la solución de calibración y sobre la HR. En el primer aspecto, debido a las bajas molalidades empleadas, cualquier variación en la solución por evaporación puede provocar la variación del contenido de sales presente en el preparado. Por ello que no se deban de reutilizar las soluciones y estas, al igual que sucede con las muestras, se abran inmediatamente al ser introducidas en el compartimento, no antes. Respecto a la HR, se ha observado que si bien el ventilador puede, en efecto, acelerar la obtención del equilibrio dinámico, puede, por otro lado, provocar su alteración por evaporación de parte del contenido de humedad presente en el interior del compartimento. Por ello, que se deba minimizar su efecto lo máximo posible.

Es importante destacar la presencia de no uno, sino, dos ventiladores en el WAM (Anexo IV), localizados uno en el interior del compartimento y de reducidas dimensiones y otro en la parte posterior del dispositivo y de dimensiones mayores. Esto ha provocado que, si bien, el efecto más destacable pueda provocarse por el localizado en el compartimento de lectura, se deba considerar el efecto provocado por el segundo ventilador. Para ello se abrió el dispositivo y se analizó el funcionamiento de cada uno de ellos. Desde el momento de encendido del WAM el ventilador de la parte posterior entra en funcionamiento. No obstante, el ventilador del compartimento únicamente entra en funcionamiento cuando se gira el interruptor para comenzar las mediciones, por acción de una palanca unida al conmutador que acciona el ventilador a la vez que eleva la cápsula en el compartimento, para que quede lo más estanca posible. Durante esta investigación se ha corroborado que la estanqueidad inicialmente supuesta del compartimento de lectura es más que cuestionable, por el propio diseño del mismo. Al deslizarse el bloque que estructura el compartimento sobre unas guías, estas poseen cierta holgura, para permitir tal acción y que se pueda abrir para introducir la muestra. A su vez, el bloque que tapa el compartimento en donde se localizan los diferentes elementos para la medición (espejo, ventilador, sensor óptico y “*thermopile*”), se ensambla al aparato mediante elementos roscados, no disponiendo de junta alguna en su unión con el compartimento que asegure la estanqueidad. Intentar, por parte del fabricante, que se logre por simple elevación de la cápsula una cierta altura para que haga tope con el bloque superior, con cápsulas en perfectas condiciones e indeformables, puede que en alguna ocasión se obtenga, no obstante con cápsulas plásticas un tanto maleables, es difícil de obtener. En este sentido se establece como más idóneas las cápsulas metálicas. Considerando la no estanqueidad existirá un intercambio, aunque a pequeña escala, entre el compartimento de medición y el habitáculo del interior del WP4, el cual se encuentra ventilado por acción del ventilador posterior. Ante esta situación, la atmósfera del interior del compartimento se ve claramente alterada y, por tanto, que sea de importancia el controlar la misma como se indica en el apartado 3.7.

3.10. Tiempos empleados en la realización de las lecturas.

En cada una de las muestras se determinan los tres tiempos considerados, empleando el WP4-T, obteniendo en la totalidad de los casos un valor superior en las cápsulas plásticas frente a las metálicas, tal como se muestra en la figura X.15.

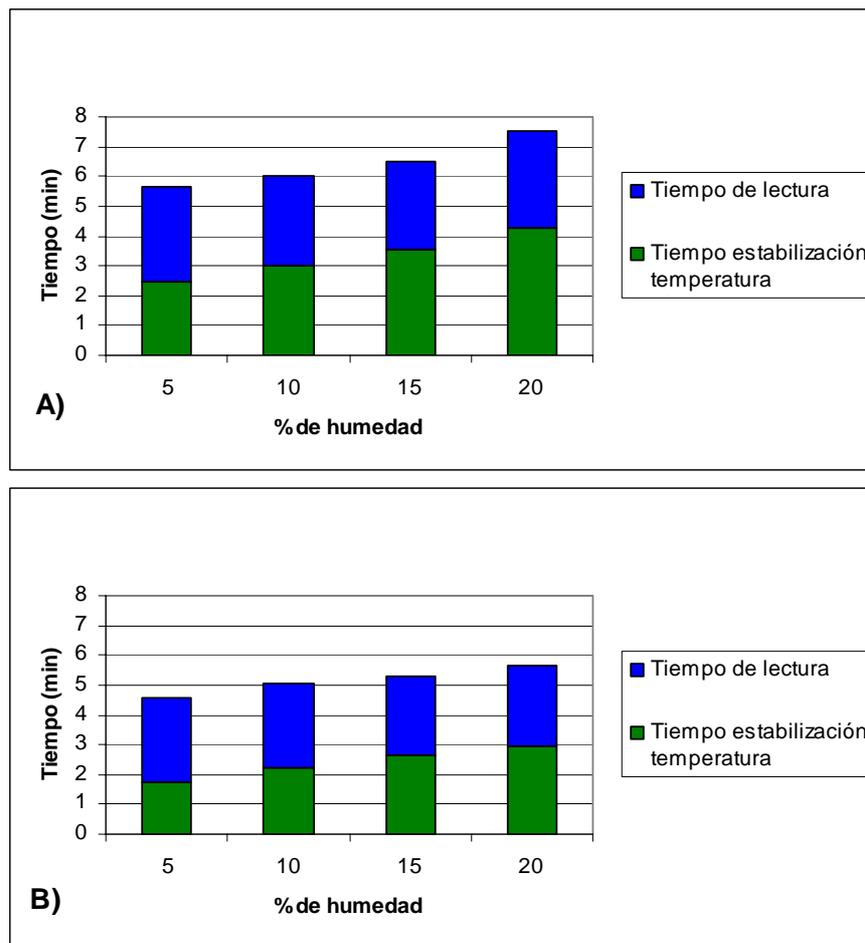


Figura X.15. “Tiempos medios para la obtención de la lectura del potencial con el WP4-T”

A) Cápsulas plásticas, B) cápsulas metálicas.

Existe una relación entre el tiempo de estabilización de la temperatura y el porcentaje de humedad considerado, de modo que a mayor contenido de humedad se requiere más tiempo de estabilización de la temperatura. Estos resultados se corroboran en el tiempo total de lectura, no obstante una vez estabilizada la temperatura el tiempo que tarda el WAM en aportar el valor del potencial se ve reducido a medida que aumenta dicha humedad, considerándose que le “cuesta” más la determinación del potencial cuanto más negativo sea este, es decir, cuanto más seca se encuentre la muestra.

Analizando la variación de dichos tiempos frente a otro de los factores considerados, el tiempo de humectado, los resultados que se obtienen se muestran en la Tabla X.8.

Se presenta una evolución en aumento progresivo generalizado en la totalidad de los casos considerados, alcanzándose un valor máximo tanto en el tiempo de estabilización de la temperatura como en el tiempo total de lectura a un tiempo de humectado de 24 horas. Por el contrario, el tiempo de lectura es máximo a las 18 horas. Es por ello que se deban evitar tanto las 18 como las 24 horas como tiempo considerados para humectar las

muestras. Los valores mínimos se alcanzan cuando no se dejan homogenizar las muestras, procediendo inmediatamente a su lectura tras aplicarles la cantidad de agua pertinente, si bien este tiempo se considera insuficiente dado que no se obtendrían valores de potencial correctos.

Tabla X.8. “Tiempos medios empleados en la obtención del potencial en función del tiempo de humectado considerado y material de las cápsulas empleadas”

Tiempo humectado (h)	Cápsulas metálicas			Cápsulas plásticas		
	Tiempo estabilización temperatura (min)	Tiempo lectura (min)	Tiempo total de lectura (min)	Tiempo estabilización temperatura (min)	Tiempo lectura (min)	Tiempo total de lectura (min)
0	1,76	2,81	4,57	2,53	2,97	5,50
12	2,32	2,51	4,83	3,48	2,86	6,34
14	2,28	2,82	5,10	3,98	3,07	7,06
16	2,46	2,79	5,25	3,06	3,06	6,12
18	2,01	2,94	4,95	2,74	3,41	6,15
20	2,43	2,77	5,20	3,28	3,17	6,45
22	2,77	2,65	5,42	3,54	3,13	6,66
24	3,12	2,66	5,78	4,00	3,08	7,08

3.11. Reducción del tiempo de obtención del PWP en función de los factores considerados.

En función de los diferentes factores considerados el tiempo total empleado en la obtención del PWP se ve notablemente alterado agilizando el conjunto del proceso.

De esta forma, el tiempo de humectado pasa a ser de 20 horas y el de secado de 8 horas, frente a las 24 horas consideradas inicialmente en ambos casos. Por otro lado, el empleo de cápsulas metálicas, frente a las plásticas agiliza el proceso en aproximadamente 1 minuto por cápsula, o lo que es lo mismo, 4 minutos por muestra. Con todo ello, los tiempos contemplados en el capítulo IX, se ven reducidos en 4 horas para la humectación, 4 minutos por muestra en el proceso de lectura y 20 horas en la fase de secado (Fig. X.16).

Analizando el tiempo total empleado en el proceso, hay que considerar que en el capítulo IX a la hora de calcular el tiempo empleado por el WAM con la metodología propuesta en su desarrollo se ha obviado el tiempo de secado dado que se realiza la corrección inicial de la humedad a la muestra, tal como se sugiere en el texto. No obstante, dado que lo habitual suele ser la determinación de la humedad gravimétricamente en la totalidad de las cápsulas empleadas durante el proceso debido a las posibles alteraciones que se puedan provocar por los factores mencionados en este texto, en el análisis se detallan ambos casos.

Se emplea como método de comparación la PP, considerando con ambos métodos el número máximo de muestras que se pueden analizar simultáneamente a la hora de estimar los tiempos de la totalidad de los protocolos. En este sentido, en la PP se pueden simultanear 12 muestras y en el WAM 6 muestras. Con estas consideraciones, los tiempos

empleados para la determinación del PWP, con un tamaño muestral como el considerado en el capítulo IX, de 24 muestras, se recogen en la Tabla X.9.

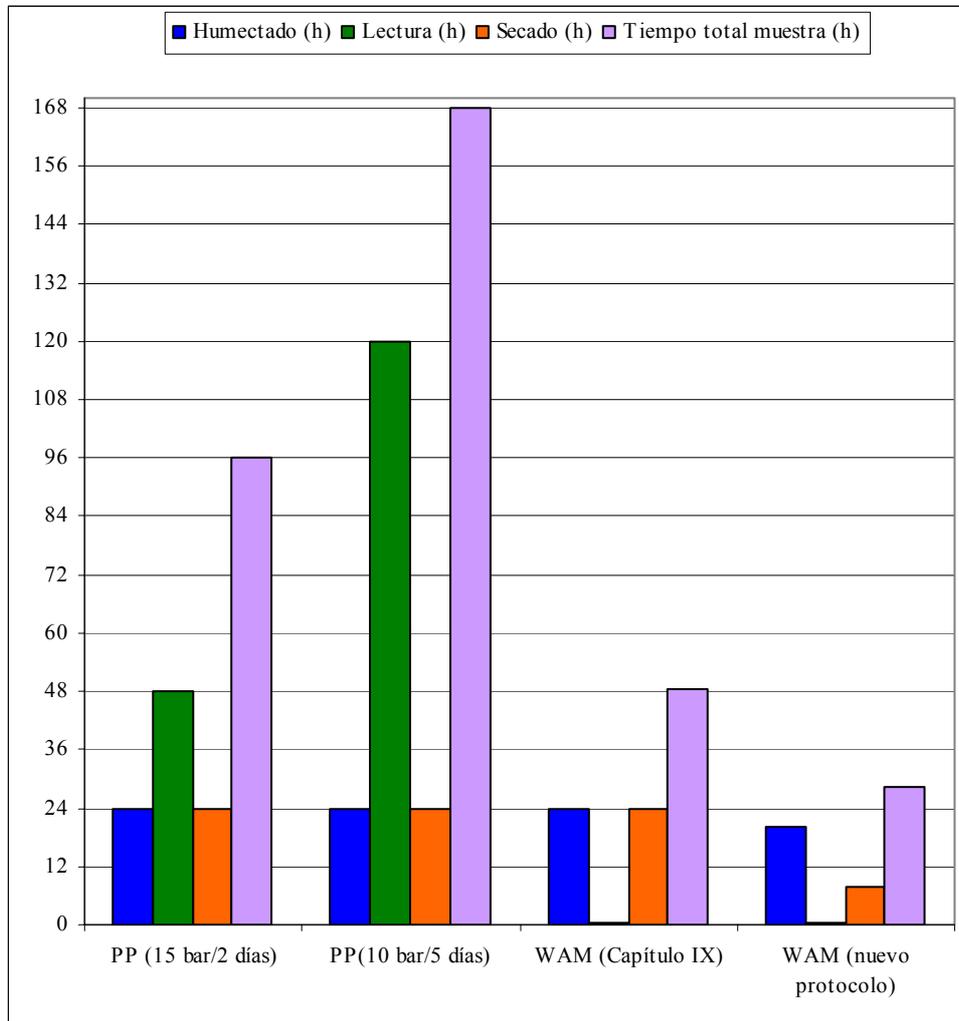


Figura X.16. “Tiempos empleados en las diferentes etapas según los protocolos seguidos y la metodología empleada por muestra”

Independientemente de la metodología empleada con el WAM, el tiempo requerido siempre es inferior al empleado con la PP. En caso de emplear la presión de 10 bar y un tiempo de aplicación de presión de 5 días esta diferencia se hace más notable reduciéndose de 15 horas a incluso 3,78 con la metodología más breve del WAM. Esta última requiere que se realice la corrección de la humedad inicialmente de modo que permite obviar la fase de secado ahorrando las 32 horas que como mínimo serían necesarias en el proceso para el tamaño muestral considerado. No obstante, para poder emplear esta metodología se deberán evitar los diferentes factores que se citan en el texto de modo que se mantenga el contenido de agua correspondiente al porcentaje de humedad considerado en cada cápsula, en caso contrario se realizaría una correspondencia entre el potencial y el contenido de agua que no sería el adecuado, provocando modificaciones a nivel de WRC y, consecuentemente, a nivel de PWP. Con todo ello, las 4,51 horas requeridas por muestra

con la metodología del capítulo IX se verían reducidas en este caso a 3,78 horas, es decir, en un 16,18%.

Tabla X.9. “Tiempos requeridos en función de la metodología y el dispositivo utilizado para 24 muestras”

n= 24 muestras		Tiempo (h)					
		Humectado	Estabilización presión	Lectura/ Presión	Secado	Tiempo Total	
						24 muestras	Por muestra
PP	Con fase de secado y P=15 bar	48	24	96	48	216	9
	Con fase de secado y P=10 bar	48	24	240	48	360	15
WAM (Capítulo IX)	Con corrección inicial humedad	96	-	12,34	-	108,34	4,51
	Con fase de secado	96	-	12,34	96	204,34	8,51
WAM metodología propuesta en capítulo X	Con corrección inicial humedad	80	-	10,74	-	90,74	3,78
	Con fase de secado	80	-	10,74	32	122,74	5,11

4. Conclusiones y recomendaciones prácticas.

En este trabajo se analizan los factores que afectan a las determinaciones psicrométricas, demostrándose la idoneidad de controlar tanto el entorno como las propias muestras, cuando estas se realizan con un WAM.

Frente a la recomendación generalizada de emplear un tiempo de humectado y un tiempo de secado de 24 horas, se propone y demuestra la posible reducción de los mismos a 20 en el caso de la fase de humectado y 8 horas en la fase de secado. Ello permite una reducción de la metodología en 20 horas. En este sentido, se propone la alternativa de obviar la fase de secado propiamente dicha y realizar una corrección inicial de la humedad de la muestra, pudiéndose asociar los valores de potencial a los valores correctos relativos al contenido de agua. Esta operación se podrá realizar siempre y cuando se controlen los diferentes factores influyentes y no se produzcan variaciones en la cantidad de agua a la muestra añadida. Respecto a la fase de humectado, se recomienda que esta se realice en recipientes estancos y a la mitad del tiempo recomendado se deberá voltear el recipiente a fin de que se redistribuya el agua por toda la muestra y no se acumule en la parte inferior del recipiente.

Se recomienda el empleo de cápsulas metálicas de acero inoxidable, dado que el intercambio térmico es mejor, permitiendo acortar el tiempo de lectura de la muestra en aproximadamente cuatro minutos.

Se consideran tres factores dependientes de las condiciones ambientales externas, evaporación y absorción de agua, condensación y espacio de cabeza, cuyas variaciones o fluctuaciones ocasionan modificaciones en las determinaciones debido al mecanismo de medición *per se*. Se observa una mayor influencia de los tres factores en las muestras cuyo contenido de agua es menor, muestras más secas, recomendándose prestar una especial atención a las mismas. A fin de paliar sus efectos, se deberá humectar directamente en las cápsulas de lecturas, sellándolas con un material plástico extensible y no desprecintarlo hasta instantes previos a proceder a su lectura. Se considera idóneo ampliar en un futuro los estudios referentes a la reducción del espacio de cabeza controlando la temperatura de modo que se pueda aislar este factor de la posible condensación. Se recomienda igualmente manipular el material plástico de sellado con especial precaución y no extenderlo demasiado a fin de que no se generen microporos que permitan el intercambio con el exterior y se asegure la estanqueidad. Si esto no fuese posible, se recomienda el empleo de cinta aislante o dispositivos semejantes que palien este efecto.

Se deberá emplear la solución de calibración de 0,5 m, reduciendo de esta forma el error cometido por el WAM *per se*, por ser esta la solución de calibración que aporta PWP más próximos al método empleado como comparativo, la PP.

Se observa una influencia de la temperatura ambiental sobre las determinaciones psicrométricas, tanto a nivel de la WRC, desplazándose esta a la izquierda al aumentar la temperatura de lectura; como a nivel de determinación del PWP. No obstante, se recomienda ampliar las determinaciones considerando un mayor rango de temperaturas a fin de establecer la relación existente con mayor fiabilidad. Se propone introducir las muestras en las cápsulas selladas en un recipiente de plástico hermético y este a su vez en uno de material de fibra de vidrio, a fin de que se mantenga la temperatura de las mismas lo más homogénea posible y se palien los efectos que las fluctuaciones de temperatura pudiesen provocar.

La HR deberá ser lo más próxima posible a la de la muestra de modo que la amplitud del equilibrio dinámico que se obtiene en el interior del compartimento sea lo menor posible a fin de minimizar el error cometido en las lecturas. En este sentido, resultará más adecuado realizar las mediciones a temperaturas lo más bajas posibles de modo que la humedad relativa sea también de pequeño valor, de acuerdo con las humedades consideradas en el estudio para la preparación de las muestras.

Considerando la influencia del potencial osmótico, se empleará indistintamente agua desmineralizada como agua de abastecimiento, siempre que la conductividad eléctrica tome valores como los mostrados en la investigación, de modo que, por la propia precisión del WAM, las determinaciones de potencial no se vean comprometidas. En caso de adoptar valores superiores de conductividad eléctrica, se deberá emplear agua desmineralizada.

Debido al efecto de evaporación del ventilador sobre las muestras, estas deberán estar bajo su efecto el menor tiempo posible. En ese sentido se recomienda que aquellas

muestras más sensibles a los diferentes factores, especialmente la evaporación, y que por sus características de tratarse de las muestras más secas deben permanecer un tiempo de estabilización de la temperatura alto, se introduzcan en el compartimento pero sin accionar la llave de inicio de lectura para que el equilibrado se produzca en ausencia del funcionamiento del ventilador del compartimento. Transcurrido un tiempo que deberá ser determinado en futuros ensayos, se accionará la llave y se procederá a la lectura. De esta forma se estima que el efecto evaporativo del ventilador quedaría sino minimizado, por lo menos sí reducido. Respecto a las soluciones de calibración serán de un solo uso dado que por efecto de la evaporación se puede ver alterada su molalidad, especialmente por los valores que esta toma en esta investigación.

El dispositivo de medición sin control de temperatura muestra resultados variables en función de los distintos factores considerados, siendo inapreciables variaciones derivadas del propio dispositivo. Por el contrario, en el dispositivo con control de temperatura se aprecian discrepancias importantes en las determinaciones realizadas en las mismas condiciones. De todos los factores considerados, únicamente se observan diferencias iniciales a nivel de HR, la cual dependerá del emplazamiento del dispositivo. No obstante, se plantea igualmente la posible existencia de otros factores no considerados en este estudio. En este sentido se recomienda un futuro análisis y/o evaluación de su modo particular de funcionamiento y los diferentes factores intrínsecos y/o extrínsecos que pudiesen afectar al mismo a fin de determinar las causas, no consideradas anteriormente, de tales discrepancias.

Tras el análisis pormenorizado de los factores considerados se puede concluir que el control y/o mantenimiento del conjunto estos factores dentro de un margen mínimo de variación permite la proposición de una metodología de medición rápida y concisa; encaminada a la consecución de mediciones confiables. No obstante, el uso de este tipo de dispositivos fuera de un entorno controlado, derivado de un uso en condiciones de campo, se cuestiona seriamente.

5. Referencias bibliográficas.

- Andraski, B.J.; Scanlon, B.R.** 2002. Thermocouple Psychrometry. En: Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. Ed. J.H. Dane & G.C Topp. Soil Sci. Soc of Am. Madison, Wis. pp: 609-642.
- Babcock, K.L.; Overstreet, R.** 1955. Thermodynamics of soil moisture: a new application. *Soil Science*. **80**: 257-263.
- Bach, L.B.** 1992. Soil water movement in response to temperature gradients: experimental measurements and model evaluation. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 37-46.
- Barker, J.R.; McKell, C.M.** 1983. Habitat differences between Basin and Wyoming big sagebrush in contiguous populations. *Journal of Range Management*. **36** (4): 450-454.

- Brown, R.W.; Johnston, R.S.** 1976. Extended field use of screen-covered thermocouple psychrometers. *Agronomy Journal*. **68**: 995-996.
- Brown, R.W.; Oosterhuis, D.M.** 1992. Review and interpretation. Measuring plant and soil water potentials with thermocouple psychrometers: Some concerns. *Agronomy Journal*. **84**: 78-86.
- Brown, R.W.; van Haveren, B.P.** 1972. Psychrometry in water relations research; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan.
- Brye, K.R.** 2003. Long-term effects of cultivation on particle size and water retention characteristics determined using wetting curves. *Soil Science*. **168** (7): 459-468.
- Campbell, G.S.** 1985. Soil physics with basic. Developments in Soil Science. **14**. Elsevier. pp: 150.
- Campbell, G.S.; Gardner, W.H.** 1971. Psychrometric measurement of soil water potential: temperature and bulk density effects. *Soil Science Society of America Proceedings Journal*. **35**: 8-12.
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X.; Pereira, L.S.** 2006a. Modelling for improved irrigation water management in a temperate region of Northern Spain. *Biosystems Engineering*. **91** (1): 151-163.
- Cardoso, R.; Romero, E.; Lima, A.; Ferrari, A.** 2007. A comparative study of soil suction measurement using two different high-range psychrometers. En: Experimental Unsaturated soil Mechanics. Vol. 112. Part. I. pp: 79-93.
- Daniel, D.E.** 1982. Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Journal*. **46**: 1125-1129.
- Decagon Devices.** 2006b. Generating a soil moisture characteristic using WP4. Application note. Fecha de consulta : 11/10/2007. Disponible en : <http://www.decagon.com/environmental/wp4>
- Díaz-Zorita, M.; Grove, J.H.; Murdock, L.; Herbeck, J.; Perfect, E.** 2004. Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no-till production system. *Agronomy Journal*. **96**: 1651-1659.
- Ficus, E.L.** 1972. In situ measurement of root-water potential. *Plant Physiology*. **50**: 191-193.

- Gardner, R.** 1955. Relation of temperature to moisture tension of soil. *Soil Science*. **79**: 257-265.
- Gee, G.W.; Campbell, M.D.; Campbell, G.S.; Campbell, J.H.** 1992. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 1068-1070.
- Hopmans, J.W.; Dane, J.H.** 1986a. Temperature dependence of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 4-9.
- Hopmans, J.W.; Dane, J.H.** 1986b. Temperature dependence of soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 562-567.
- Hsieh, J.J.C.; Enfield, C.G.; Hungate, F.P.** 1972. Application of temperature-compensated psychrometers to the measurement of water potential gradients. En: *Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers*. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp:154-158.
- Klute, A.** 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Monograph Number 9 (Second Edition). (Klute, A. ed.). ASA, Madison, WI. pp: 635-686.
- Leong, E.-C.; Tripathy, S.; Rahardjo, H.** 2003. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique. *Geotechnique*. **53** (2): 173-182.
- Liu, H.H.; Dane, J.H.** 1993. Reconciliation between measured and theoretical temperature effects on soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal*. **57**: 1202-1207.
- Livingston, N.J.** 1993. Soil water potential. En: *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Carter, M.R. Lewis Publishers. pp: 559-567.
- Mohamed, A.-MO.; Yong, R.N.; Cheung, S.C.H.** 1992. Temperature dependence of soil water potential. *ASTM Geotechnical Testing Journal*. **15** (4): 330-339.
- Moore, R.T.; Caldwell, M.M.** 1972. The field use of thermocouple psychrometers in desert soils. En: *Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers*. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 165-169.
- Mullins, C.E.** 2001. Matric potential. En: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods (2nd Edn)*. (Smith, K.A.; Mullins, C., eds). Marcel Dekker, New York, USA. pp: 65-93.

- Nimmo, J.R.; Millar, E.E.** 1986. The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristic of soils. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 1105-1113.
- Orfánus, T.** 2005. Regional processing of soil drought indicators: conditional hydrolimits and water storage capacity. En: INYS Workshop on Hydrology, Smolenice.
- Orfanus, T.; Mikulec, V.** 2005. Regionalization of potential water storage capacity of agricultural landscape – a quantification of soil accumulation function. *Geophysical Research Abstracts*. **7**.
- Passioura, J.B.** 2001. Plant-water relations. Encyclopedia of Life Sciences (*on line*). pp: 1-7.
- Patrick, P.K.; Olsen, H.W.; Higgins, J.D.** 2007. Comparison of chilled-mirror measurements and filter paper estimates of total soil suction. *Geotechnical testing Journal*. **30** (5): 360-367.
- Peck, A.J.** 1960. Change of moisture tension with temperature and air pressure: theoretical. *Soil Science*. **6**: 303-310.
- Perfect, E; Kenst, A.B.; Diaz-Zorita, M.; Grove, J.H.** 2004. Fractal analysis of soil water desorption data collected on disturbed samples with water activity meters. *Soil Science Society of America Journal*. **68**: 1177-1184.
- Petry, T.M.; Jiang, C.P.** 2003. Evaluation and Utilization of the WP4 Dewpoint PotentiaMeter Phase I & II. Center for Infrastructure Engineering Studies. University Transportation Center Program at The University of Missouri-Rolla.
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C.** 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España.
- Rodríguez, A.** 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Departamento de Ingeniería Agroforestal (EPS). Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.
- Romero, E.; Gens, A.; Lloret, A.** 2001. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay. *Geotechnical and Geological Engineering*. **19** (3-4): 311-332.
- Scanlon, B.R.; Andraski, B.J.; Bilskie, J.** 2002. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. En: Dane, J.H.; Topp, G.C. (eds.). Methods of soil analysis, part 4, physical methods. SSSA, Madison, WI. pp: 643-670.
- Scanlon, B.R.; Tyler, S.W.; Wierenga, P.J.** 1997. Hydrologic issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport. *Reviews of Geophysics*. **35** (4): 461-490.

- Skalová, J.; Štekauerová, V.; Šútor, J.** 2000. Využitie pedotransferných funkcií na určenie hydrolimitov (Estimation of the hydrolimits using pedotransfer functions). Bioklimatológia a životné prostredie. In XIII. Bioklimatologická konferencia SBkS a ČBkS. Košice, Eslovaquia.
- Spanner, D.C.** 1951. The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *Journal of Experimental Botany*. **11**: 145-168.
- Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006a. Methodology for determination of osmotic suction of soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. **24**: 1469-1479.
- Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006b. Nonlinear curve-fitting procedures for developing soil-water characteristic curves. *Geotechnical Testing Journal*. **9** (5): 409-418.
- Štekauerová, V.; Skalová, J.; Šútor, J.** 2002. Using of pedotransfer functions for assessment of hydrolimits. *Rostlinná Výroba*. **48**: 407-412.
- Taylor, S.A.** 1958. The activity of water in soils. *Soil Science*. **86**: 83-90.
- Thakur, V.K.S.; Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006. Laboratory investigations on extremely high suction measurements for fine-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. **24**: 565-578.
- Villar, J.M.; Ferrer, F.** 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. pp: 23-86.
- Wiebe, H.H.; Brown, R.W.; Barker, J.** 1977. Temperature gradient effects on *in situ* hygrometer measurements of water potential. *Agronomy Journal*. **69**: 933-939.
- Wullschleger, S.D.; Dixon, M.A.; Oosterhuis, D.M.** 1988. Field measurement of leaf water potential with a temperature-corrected *in situ* thermocouple psychrometer. *Plant, Cell and Environment*. **11**: 199-203.
- Zazueta, F.S.; Xin, J.** 1994. Soil moisture sensors. Florida Cooperative Extension Service. Bulletin 292. April 1994. University of Florida.

Comunicaciones personales.

- Petry, T.** Evaluation and utilization of the WP4. petry@umr.edu. Fecha de consulta: 25/02/2005.

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE DIFERENTES
METODOLOGÍAS RELATIVAS A LAS PROPIEDADES HÍDRICAS
DE SUELOS: ESTIMACIÓN DE "HYDROLIMITS" EN EL NO DE ESPAÑA**

CAPÍTULO

CAPÍTULO XI

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE DIFERENTES METODOLOGÍAS RELATIVAS A LAS PROPIEDADES HÍDRICAS DE SUELOS: ESTIMACIÓN DE “HYDROLIMITS” EN EL NO DE ESPAÑA⁶⁶

“¿Por qué esta magnífica tecnología científica, que ahorra trabajo y nos hace la vida mas fácil, nos aporta tan poca felicidad?. La respuesta es esta, simplemente: porque aún no hemos aprendido a usarla con tino”
Albert Einstein (1879-1955). Físico estadounidense de origen alemán.

⁶⁶ **Martínez, E.M.; Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X.** 2006. Funciones de pedotransferencia para la estimación de propiedades hídricas en la comarca regable de Terra Chá. XXIV Congreso Nacional de Riegos, Lugo. 6-8 de junio de 2006.

Martínez, E.M.; Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X. 2008. Analysis and comparison of different methods for predicting soil hydraulic properties: hydrolimits in NW Spain. AgEng2008. Agricultural and Biosystems Engineering for a Sustainable World. International Conference on Agricultural Engineering. Hersonissos, Creta, Grecia. 23-25 junio 2008.

ÍNDICE

Resumen	321
1. Introducción y objetivos	323
2. Material y métodos	325
2.1. Tipos de suelo y técnicas de análisis de laboratorio.....	325
2.2. Ajuste de los datos observados.....	326
2.3. Software utilizado.....	326
2.4. Funciones de pedotransferencia de partida	327
2.5. Análisis estadístico	327
2.6. Análisis de incertidumbre.....	328
3. Resultados y discusión	329
3.1. Evaluación y validación de los distintos modelos en la determinación del PWP y la FC mediante <i>SOILPAR 2.00</i>	329
3.2. Evaluación y validación de las PTFs propuestas por Soto <i>et al.</i> (2001)	331
3.3. Proposición de PTF específicas para la zona de estudio	332
3.3.1. Para la totalidad de la zona de estudio.....	332
3.3.2. Proposición de PTFs específicas según diversas categorías.....	335
3.3.2.1.1. En función del tipo de suelo	335
3.3.2.1.2. En función de la profundidad de toma de muestras.....	336
3.3.2.1.3. En función de la tipología del cultivo.....	336
4. Conclusiones.....	338
5. Referencias bibliográficas	339

RESUMEN

La estimación de propiedades hídricas de suelos, especialmente las denominadas “*hydrolimits*”, acapara la atención de diversos campos de la investigación, siendo en ocasiones dificultosa y repetitiva su determinación. En las últimas décadas se han propuesto diversos métodos indirectos, que permiten su modelización y estimación a partir de propiedades fácilmente medibles, tales como granulometría, contenidos de materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO) y pH, tanto en agua (PH_A) como en cloruro (PH_CL). Todos ellos se fundamentan en el empleo de funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs), pudiéndose considerar dos enfoques dentro de la metodología existente. Por un lado se encuentra el empleo de modelos genéricos propuestos por diversos autores tanto a nivel internacional como a nivel nacional, los cuales pueden, a su vez, aplicarse de forma directa o bien mediante la ayuda de programas informáticos. Por otro lado, cuando lo que se pretende es la búsqueda de funciones más específicas, es recomendable la modelización a nivel local a partir de la información disponible para la zona de estudio. Independientemente del método o la forma de aplicación del mismo que se elija, el fin perseguido será la adecuación de los valores estimados a los obtenidos por medición en campo.

En este trabajo, referido al NO de España, se analiza y compara el uso de PTFs propuestas por diversos autores, tanto de carácter internacional: a través del software *SOILPAR 2.00* (2002), como a nivel nacional propuestas por Soto *et al.* (2001) en el NO de España, con un tercer método, a nivel local, donde se proponen, por una parte, PTFs específicas para la zona de estudio de forma global y, por otra, diferenciando en función de la tipología de suelo, cultivo y profundidad de exploración radicular.

Se obtienen resultados favorables para la estimación del punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP) con los tres métodos empleados partiendo de los datos provenientes para su estimación indirecta de la placa de presión (PP) y de un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM). Con el empleo de *SOILPAR 2.00* los modelos más idóneos son “*Mayr-Jarvis*” para el WAM y “*EPIC*” para la PP con r^2 de 0,81 en ambos casos. En caso de emplear PTFs de carácter nacional se obtiene como máximo un r^2 de 0,66, resultando más indicado la proposición de PTFs específicas para la zona de estudio. En este caso los resultados son favorables tanto para la estimación del PWP como para la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y el contenido de agua disponible, también denominada reserva de agua útil (*available water content*) (AWC), siempre y cuando se desglose, para estas dos últimas, el área considerada en función de las tres categorías consideradas en el análisis. No obstante, en algunos casos los resultados relativos a estas dos propiedades deberán tomarse con precaución considerando las escasas muestras representativas de las categorías consideradas.

1. Introducción y objetivos.

El manejo racional del suelo y su utilización, conjuntamente con la conservación del agua, constituye un aspecto de gran relevancia para una producción agrícola sostenible (Solano *et al.*, 2002; Nemes, 2003). Uno de los objetivos perseguidos es la modelización del comportamiento del agua en la zona no saturada, adquiriendo una gran relevancia en los últimos años ante la necesidad del estudio de los procesos de adsorción de agua y nutrientes por las raíces, la contaminación de suelos y acuíferos, la erosión edáfica, la recarga subterránea o el establecimiento del balance hídrico (Martínez y Ceballos, 2001). En este sentido, se buscan tecnologías o fuentes de información que permitan un adecuado manejo del riego y del uso del agua necesaria para ello (Solano *et al.*, 2002). En estos modelos es frecuente que se requieran datos relativos tanto a retención de agua en el suelo como a conductividad hidráulica (Nemes, 2003). Desde hace años se vienen desarrollando numerosos métodos para la determinación de “*hydrolimits*”⁶⁷ del suelo, entendidos como determinados contenidos de agua definidos por valores concretos de potencial (Skalová *et al.*, 2000; Štekauerová *et al.*, 2002; Orfánus, 2005; Orfanus y Mikulec, 2005), tanto en condiciones de campo como de laboratorio. Generalmente se consideran dos: capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP), permitiendo calcular el balance de agua en un perfil de suelo y por tanto definir la reserva de agua útil (*available water content*) (AWC), para la planta (Nagy *et al.*, 2005). Se trata de propiedades que influyen en los flujos y las reservas de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, siendo necesaria en su determinación una elevada inversión económica y de tiempo debido a la gran heterogeneidad y complejidad que tienen los suelos y a la variabilidad espacial de las propiedades demandadas (Rubio y Llorens, 2003). Según Rossato *et al.* (2002) estos resultan un tanto inexactos en el caso de no realizarse *in situ*, recayendo la elección de un método u otro en un análisis de la idoneidad del mismo en función de los requerimientos demandados (Williams *et al.*, 1992; Marion *et al.*, 1994; Minasny *et al.*, 1999; Christiaens y Reyen, 2001). Una de las mayores preocupaciones tanto para hidrólogos, agrónomos o meteorólogos, entre otros, es la obtención y disponibilidad de las variables requeridas para la realización de las investigaciones encaminadas a esa modelización (Rawls *et al.*, 1991). Los datos requeridos generalmente se encuentran fragmentados, con diferente nivel de detalle, de fiabilidad cuestionable y de los que se dispone en localizaciones muy concretas. A día de hoy, en varios campos, como el de la Hidrología, las características mencionadas, especialmente respecto a la hidráulica del suelo, son el mayor obstáculo a superar para el progreso (Wösten, 1997). Esto ha provocado el desarrollo de fórmulas empíricas que describiesen la relación de las variables demandadas con propiedades del suelo fácilmente medibles, basándose en la aplicación de la Estadística mediante regresiones entre las propiedades físico-químicas y las propiedades hidrodinámicas del suelo (Rubio y Llorens, 2003). Con estas relaciones se está hablando de las funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs) (Capítulo VI).

Las PTFs fueron propuestas por Bouma (1989), que las define como un procedimiento para transformar los datos que “*tenemos*” en los que “*necesitamos*”. Estas, se denominan igualmente “*funciones de edafotransferencia*” e incluso en sus inicios como

⁶⁷ Se refiere al término anglosajón empleado a nivel internacional para la denominación de los contenidos de agua a FC y PWP.

“funciones de transferencia”. Se trata de funciones predictivas de ciertas propiedades de los suelos, o incluso de la curva de retención de agua (WRC) completa (Cornelis *et al.*, 2001; Mugabe, 2004), a partir de otras propiedades fácilmente medibles, pudiéndose obtener de forma rutinaria a un coste sensiblemente inferior (Minasny *et al.*, 2003), y lo que es más importante, sin ocasionar ningún perjuicio al medio ambiente (Nemes, 2003).

Cuando se aplican PTFs se dan dos principios que estas deben cumplir. El primero de ellos afirma que “no se debe pronosticar algo que es más fácil y más barato medir o determinar”. El segundo que “no se deben usar PTFs a menos que se pueda evaluar la incertidumbre asociada y, si para un determinado problema se dispone de un conjunto de PTFs alternativas disponibles, utilizar aquella con menor varianza” (Minasny *et al.*, 2003). El primero de ellos se determina a través de la eficiencia (Minasny y McBratney, 2002; Rubio, 2005) y el segundo a partir de la varianza (Minasny, 2000). Sin embargo, en ocasiones la determinación de la idoneidad de un método se limita al cálculo de los errores asociados al mismo y su coeficiente de ajuste (Martínez y Ceballos, 2001; Martínez *et al.*, 2004).

Asimismo, en la aplicación de PTFs existen dos circunstancias, la proposición de PTFs propias para el área de estudio (Bell y van Keulen, 1995; Soto *et al.*, 2001; Martínez *et al.*, 2004; Mugabe, 2004; Rajkai *et al.*, 2004) o la aplicación a dicha área de los modelos existentes, los cuales son numerosos tanto en número como en complejidad. No obstante, todo modelo antes de su aplicación requiere de una evaluación y validación previa, siendo numerosos los estudios encaminados con este propósito (Tietje y Tapkenhinrichs, 1993; Bonilla y Cancino, 2001). Esta labor suele resultar dificultosa, por lo cual han surgido diferentes programas o softwares de libre disposición en red que agilizan el proceso (Acutis y Donatelli, 2003) y que en las últimas décadas se han utilizado frecuentemente (Vanderlinden *et al.*, 2003, Wang *et al.*, 2003). Sin embargo, no todos se adecuan de igual manera a las necesidades del investigador, por lo que resulta conveniente realizar una evaluación previa de los mismos (Rubio y Llorens, 2003).

En el NO de España, concretamente en Galicia, se aprecia una carencia de investigaciones encaminadas al uso de estas herramientas, siendo contados los estudios existentes a nivel global de Comunidad Autónoma (Soto *et al.*, 2001) e inexistentes los realizados a un nivel local más concreto. Para el análisis y comparación de las distintas metodologías se considera la comarca de Terra Chá (Galicia, NO de España). Para ello se proponen tres líneas de actuación:

1) Evaluación y validación de modelos propuestos a nivel internacional mediante el empleo del software *SOILPAR 2.00* en la estimación de parámetros hidrológicos.

2) Evaluación y validación del modelo propuesto a nivel nacional por Soto *et al.* (2001) para suelos de la Comunidad Autónoma de Galicia.

3) Proponer PTFs para la determinación de los “*hydrolimits*” en la zona de estudio. Para su proposición se considerará el conjunto de la zona de estudio, para posteriormente diferenciarla en función de los distintos tipos de suelo, la profundidad considerada en la toma de muestras y la diferente tipología del cultivo.

2. Material y métodos.

2.1. Tipos de suelo y técnicas de análisis de laboratorio.

El muestreo ha sido realizado en la comarca de Terra Chá - Galicia (NO España) (Cancela *et al.*, 2006a). Estudios previos en la zona sobre los suelos y la geomorfología (Castelao 1989), distinguen tres tipos de suelos con la siguiente distribución: 68% de Cambisoles, 22% de Gleysoles y el 10% de Fluvisoles.

Dada la variabilidad espacial de las características de los suelos, se aplicó el mismo procedimiento de toma de muestras descrito en los capítulos IV y el IX.

Cada una de las muestras fue analizada en laboratorio para la determinación de una serie de propiedades físicas e hídricas: distribución tamaño de partícula (*particle size distribution*) (PSD), densidad aparente (DAP), pH en agua (PH_A) y en cloruro potásico 1M (PH_CL), porcentaje de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), PWP, FC y AWC. Se analizó la PSD mediante análisis granulométrico utilizando el “*método de la pipeta*” (MAPA, 1995). El CO y la MO se obtienen empleando el “*método de Sauerlandt modificado*” (Gutián y Carballás, 1976). Para la obtención de la DAP se empleó el método del United States Department of Agricultura (USDA, 2004), el cual es idóneo para suelos con elevada pedregosidad (Cancela, 2004). Las propiedades físicas obtenidas se detallan en la tabla XI.1. Se trata de las mismas muestras consideradas en el capítulo IX.

Tabla XI.1. “Características físicas de los 24 suelos analizados”

Descriptivos	DAP (gr/cm ³)	ARE (%)	LIM (%)	ARC (%)	PH_AGUA	PH_CL	CO (%)	MO (%)
<i>Mínimo</i>	0,66	29,47	15,12	13,50	4,30	3,80	1,93	3,32
<i>Máximo</i>	1,28	71,39	32,79	54,53	6,50	6,10	5,50	9,48
<i>Media aritmética</i>	1,01	53,32	23,55	23,14	5,38	4,83	3,72	6,41
<i>Desviación típica</i>	0,20	0,64	4,42	8,55	0,51	0,57	0,92	1,59

DAP: Densidad aparente, ARE: Contenido en arena, LIM: Contenido en limo, ARC: Contenido en arcilla, PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en cloruro potásico 1M, CO: Contenido en carbono orgánico, MO: Contenido en materia orgánica.

Para la determinación de las propiedades hídricas, se hizo uso de la placa de presión de Richards (*pressure plate*) (PP), modelo *Soil Moisture Equipment Corp. CA* y un psicrómetro, concretamente un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) WP4 *Dewpoint PotentiaMeter* de Decagon Device, Inc. (WAM). Debido a las características intrínsecas del propio dispositivo y considerando los estudios previos realizados (Capítulo VII) se emplea la PP como método complementario del WAM, mediante una metodología

combinada (Collares *et al.*, 2002; Costa *et al.*, 2003; Kunz *et al.*, 2003; Cancela, 2004; Rodríguez, 2004) en la que la determinación del PWP se realice con el WAM y la FC con la PP, de modo que se acorte el tiempo empleado en la misma (Capítulo IX) a fin de determinar la AWC.

2.2. Ajuste de los datos observados.

Para la construcción de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC), los datos procedentes del psicrómetro se han ajustado al modelo de Campbell de tipo exponencial, $y = ax^{-b}$ (Campbell, 1985), proporcionando ajustes con coeficientes de ajuste superiores a $r^2 = 0,74$ en todos los casos, permitiendo determinar el PWP.

2.3. Software utilizado.

Para el cálculo de los distintos parámetros a estimar se empleó el software libre denominado *SOILPAR 2.00* (Acutis y Donatelli, 2003). El software incluye varias PTFs propuestas a nivel internacional y comúnmente utilizadas en los ámbitos agronómicos, para la estimación de parámetros hidráulicos basándose en la PSD, la DAP y el CO (Wang *et al.*, 2003) (Tabla XI.2).

Tabla XI.2. “Métodos disponibles en *SOILPAR 2.00*” (Adaptado de Acutis y Donatelli, 2003)

Tipo de abordaje	Método	Variables requeridas	Parámetro estimado
“Point pedotransfer”	Baumer	PSD, CO	FC, PWP, DAP
	Brakensiek/Rawls	PSD, CO, DAP	AWC
	BSS subsoil	PSD, CO, DAP	AWC
	BSS topsoil	PSD, CO, DAP	AWC
	EPIC	PSD, DAP	FC, PWP
	Hutson	PSD, DAP	AWC
	Manrique	PSD, DAP	FC, PWP
	Rawls	PSD	FC, PWP, DAP
“Function pedotransfer”	Campbell	PSD, DAP	FC, PWP
	Mayr-Jarvis	PSD, DAP, CO	FC, PWP
	Rawls/Brakensiek	PSD, DAP	FC, PWP
	Vereecken	PSD, DAP	FC, PWP

PSD: Distribución del tamaño de partícula, CO: Contenido en carbono orgánico (%), DAP: Densidad aparente, FC: Capacidad de campo, PWP: Punto de marchitamiento permanente, AWC: Reserva de agua útil.

El abordaje se produce mediante dos frentes, por un lado, “*point pedotransfer*” que permite, a través de 8 métodos diferentes, la estimación de puntos característicos de retención de agua de interés; por otro, a través de “*function pedotransfer*” que permite la estimación de parámetros de funciones de retención y del PWP y la FC.

2.4. Funciones de pedotransferencia de partida.

Soto *et al.* (2001) desarrollaron las siguientes PTFs mediante regresión para la predicción de los valores de contenido hídrico del PWP y la FC:

$$\Theta_{\text{PWP}} = 0,38 \text{ ARC} + 6,30 \quad (\text{XI.1})$$

$$\Theta_{\text{FC}} = 21,52 + 0,37 \text{ ARC} + 0,11 \text{ LIM} + 10,51 \text{ DAP} - 2,80 \text{ PH_A} + 1,25 \text{ CO} \quad (\text{XI.2})$$

$$\Theta_{\text{FC}} = 0,33 \text{ ARC} + 0,15 \text{ LIM} + 1,54 \text{ CO} + 17,30 \quad (\text{XI.3})$$

siendo:

ARC: contenido en arcilla (%).

CO: contenido en carbono orgánico (%).

DAP: densidad aparente (kg/dm^3).

LIM: contenido en limo (%).

PH_A: pH en agua.

Θ_{FC} : contenido hídrico a 0,033 MPa (%vol/vol).

Θ_{PWP} : contenido hídrico a 1,5 MPa (%vol/vol).

2.5. Análisis estadístico.

El procedimiento para la formulación de las PTFs a partir de los datos disponibles de las zonas estudiadas se ha basado en el establecimiento de un análisis de regresión lineal simple y múltiple “*por pasos*” entre las características físicas (variables independientes): DAP, ARE, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, CO y MO; y las características hídricas (variables dependientes): FC, PWP y AWC. Para ello se ha verificado la bondad de ajuste de las funciones, obteniendo las PTFs que mejor resultado ofreciesen, con un valor máximo de r^2 para un nivel de significación de 0,001 ($p < 0,001$). En el proceso se emplea el paquete estadístico SPSS.

Para la proposición de PTFs específicas en función de los distintos tipos de suelo, profundidad de toma de muestras y tipología del cultivo, se estratifican las muestras distinguiéndose tres tipos de suelos (cambisoles, fluvisoles y gleysoles), dos tipos de cultivo (maíz y pradera) y dos intervalos de profundidades a las que se han tomado las muestras y correspondientes a la zona de exploración de las raíces (25-40 y 40-55 cm).

2.6. Análisis de incertidumbre.

Para la verificación de la bondad de las estimaciones llevadas a cabo, los resultados han sido evaluados mediante el cálculo del error medio (*mean error*) (ME) y de la raíz del error cuadrático medio (*root mean square error*) (RMSE). El ME permite identificar la posible presencia de sesgo, es decir, una sistemática sobreestimación o subestimación de los valores obtenidos mediante los modelos (Ec. XI.4). Valores positivos del ME indican una sobreestimación mientras que valores negativos indican la subestimación de los valores procedentes del modelo. La RMSE aporta información sobre la dispersión entre los valores observados y los estimados mediante los modelos (Ec. XI.5).

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - M_i)}{N} \cdot 100 \quad (\text{XI.4})$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2}{N} \right]^{1/2} \cdot 100 \quad (\text{XI.5})$$

siendo:

N: número de observaciones.

(E_i-M_i): diferencia entre el valor estimado (E_i) y el valor medido (M_i).

Para el caso de los modelos calculados con *SOILPAR 2.00*, el propio programa aporta el cálculo de varios estadísticos, dentro de los cuales se van a considerar el RMSE, eficiencia del modelo (*modelling efficiency*) (EF) y el coeficiente de masa residual (*coefficient of residual mass*) (CRM). Sus expresiones se definen como sigue:

RMSE, raíz del error cuadrático medio, definido según la ecuación anterior (pero en tanto por uno).

EF, eficiencia del modelo (valor óptimo =1, valores inferiores a 0 indican que la media de los datos medidos es mayor predictor que el que las estimaciones del modelo), definido según ecuación XI.6.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \overline{M_i})^2} \quad (\text{XI.6})$$

CRM, coeficiente de masa residual (valor óptimo 0, <0 el método sobreestima, >0 el método infraestima), se define según ecuación XI.7.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (XI.7)$$

siendo:

E_i : valor estimado.

M_i : valor medido.

\overline{M}_i : media de los valores medidos.

3. Resultados y discusión.

3.1. Evaluación y validación de los distintos modelos en la determinación del PWP y la FC mediante SOILPAR 2.00.

Los datos pertenecientes tanto al PWP como a la FC se han obtenido en laboratorio a partir del WAM y de la PP respectivamente. En cada uno de los modelos se determinan los estadísticos descriptivos que se muestran en la tabla XI.3, para la estimación del PWP.

Empleando los datos procedentes de las determinaciones psicrométricas, el mejor ajuste se obtiene dentro los métodos que calculan la PTF, siendo este el modelo “*Mayr-Jarvis*” con un r^2 de 0,81. No obstante, dentro de la otra metodología disponible, el modelo “*EPIC*” presenta un r^2 de 0,79, ambos superiores al ajuste que se obtiene con el modelo de Campbell, con r^2 de 0,62.

Resulta curioso observar que el conjunto de métodos empleados sobreestima las predicciones de ambos parámetros. Solamente en el caso del método de “*Mayr-Jarvis*” se subestiman las predicciones, tal como indica el CRM.

La EF indica que al tomar la mayor parte de los modelos un valor inferior a 0, la media de los datos medidos es mejor predictor que las estimaciones realizadas.

En caso de considerar los datos obtenidos a partir de la PP, el mejor ajuste se obtiene en el modelo de “*EPIC*” con 0,81, quedando reducido en este caso el de “*Mayr-Jarvis*” a 0,64. El modelo de Campbell toma un valor de los inferiores, con 0,33. En este caso, para el índice EF, no siempre la media de los valores medidos es el mejor estimador frente a la media de los estimados, tal es el caso de los modelos de “*EPIC*”, “*Manrique*”, “*Rawls*” y “*Rawls y Brakensiek*”.

Tabla XI.3. “Estadísticos descriptivos para el PWP de los modelos disponibles en el software SOILPAR 2.00 para el WAM y la PP”

Modelo	Metodo	Pendiente	Intersección	r ²	RMSE	EF	CRM
Baumer	WAM	1,02	0,07	0,56	0,07	-4,73	-0,90
	PP	0,41	0,09	0,25	0,05	-9,10 ⁻⁴	-0,17
Brakensiek	WAM	0,99	0,14	0,53	0,14	-21,31	-1,89
	PP	0,62	0,14	0,58	0,10	-2,78	-0,77
BSS Subsoil	WAM	1,16	0,10	0,62	0,12	-13,38	-1,51
	PP	0,53	0,12	0,36	0,08	-1,31	-0,53
BSS Topsoil	WAM	0,90	0,12	0,66	0,11	-12,11	-1,46
	PP	0,52	0,12	0,36	0,08	-1,31	-0,53
EPIC	WAM	1,80	0,01	0,79	0,08	-6,29	-0,99
	PP	1,08	0,02	0,81	0,04	0,46	-0,21
Hutson	WAM	0,81	0,12	0,44	0,11	-11,09	-1,37
	PP	0,27	0,14	0,14	0,07	-1,12	-0,45
Manrique	WAM	0,88	0,04	0,69	0,04	-0,70	-0,47
	PP	0,44	0,07	0,49	0,04	0,43	0,099
Rawls	WAM	1,14	0,04	0,64	0,05	-2,18	-0,64
	PP	0,54	0,06	0,41	0,04	0,37	-2,10 ³
Campbell	WAM	1,12	0,08	0,62	0,10	-8,88	-1,24
	PP	0,49	0,11	0,33	0,06	-0,50	-0,37
Mayr-Jarvis	WAM	0,41	5,10 ⁵	0,81	0,05	-1,44	0,59
	PP	0,21	5,10 ³	0,64	0,10	-2,80	0,75
Rawls y Brakensiek	WAM	1,01	0,07	0,63	0,07	-4,76	-0,93
	PP	0,50	0,08	0,44	0,04	0,25	-0,18
Vereecken	WAM	2,02	0,16	0,25	0,26	-71,01	-3,15
	PP	0,54	0,24	0,05	0,22	-17,91	-1,53

RMSE: Raíz del error cuadrático medio, EF: Eficiencia del modelo, CRM: Coeficiente de masa residual.

Para la FC, obtenida el PWP a partir de la PP, el mayor r² resultante es el aportado por el modelo de “Manrique” con r² 0,32, siendo en el resto de los casos inferior a 0,10.

Estos resultados no concuerdan con los aportados por Donatelli y Acutis (1996), obteniendo r² superiores a 0,62 dentro de la metodología “point pedotransfer” y considerando los métodos del “BSS (top y subsoil)” y el de “Rawls y Brakensiek”, como las mejores opciones para el cálculo tanto del PWP como de la FC.

3.2. Evaluación y validación de las FPTs propuestas por Soto *et al.* (2001).

Se aplicaron las ecuaciones de Soto *et al.* (2001) a las muestras tomadas en las zonas de estudio, tanto las basadas únicamente en una única variable como las que empleaban varias variables independientes. Dada la diversidad de la metodología propuesta en la determinación de las variables hídricas, se ha procedido a su aplicación a la totalidad de los métodos empleados, tanto la PP como el WAM, y considerando en este último caso la media de dos lecturas realizadas para cada una de las muestras consideradas, dado que las condiciones en que estas fueron realizadas han sido diferentes.

Se observa que los valores estimados por el modelo sugerido provocan sobreestimación del contenido de agua a 1,5 MPa, en el caso del WAM, siendo el valor del coeficiente de ajuste obtenido de 0,66, valor semejante al obtenido por los autores del modelo propuesto. Por el contrario, considerando los datos obtenidos experimentalmente por la PP, ocurre el caso inverso, provocando tanto sobreestimación como subestimación de los valores aportados con el modelo y con un r^2 de 0,46, algo inferior al del WAM (Fig. XI.1).

En el caso del contenido de agua a 0,033 MPa, pese a considerarse solamente los datos obtenidos experimentalmente con la PP, por tratarse del método más fiable de los dos en ese rango de aplicación, los resultados del modelo de Soto *et al.* (2001) son bastante pobres, no aportando una estimación fiable tanto en el caso de la ecuación XI.2 como la XI.3, con r^2 inferiores a 0,10 en ambos casos. Los coeficientes de ajuste obtenidos por Soto *et al.* (2001) son superiores en las dos ecuaciones, lo cual indica la imposibilidad de aplicar el modelo propuesto para la estimación de la FC en la zona de Terra Chá.

Los estadísticos descriptivos vienen a corroborar los resultados obtenidos gráficamente respecto a la no idoneidad de la aplicación de las ecuaciones de Soto *et al.* (2001) para la obtención de la FC (Tabla XI.4).

Tabla XI.4. “Estadísticos descriptivos de la aplicación de las ecuaciones de Soto *et al.* (2001)”

Propiedad	PWP		FC	
	a)	b)	c)	
Ecuación				
Método	WAM	PP	PP	PP
ME	7,60	2,84	-8,92	-7,56
RMSE	7,84	4,73	22,09	21,86

PWP: Punto de marchitamiento permanente, FC: Capacidad de campo, WAM: medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión de Richards, ME: Error medio, RMSE: Raíz del error cuadrático medio.

Por otro lado, para el PWP, aunque se obtiene un mejor ajuste para el WAM que para la PP, en este último caso la dispersión entre los datos medidos y estimados es inferior

y aunque ambos métodos globalmente sobreestiman las determinaciones, en la PP este efecto es bastante menor.

Esto ocurre, debido a que los valores de los puntos en la figura XI.1 se encuentran localizados tanto por encima como por debajo de la línea 1:1.

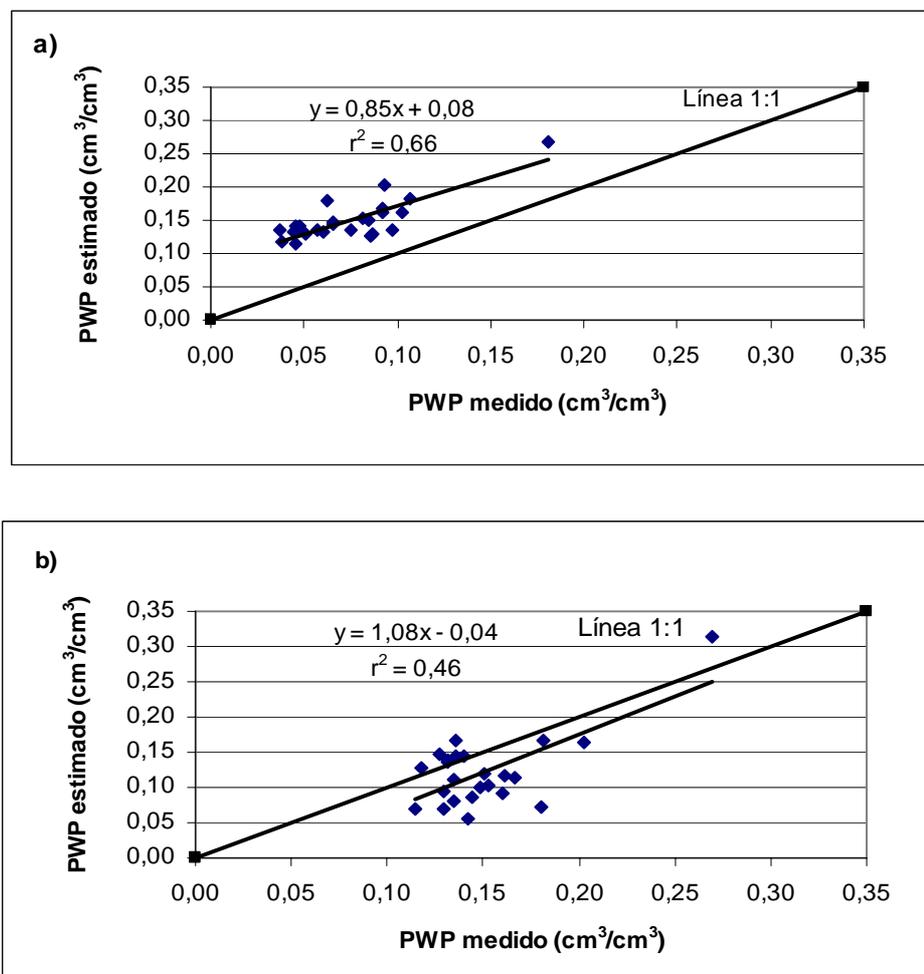


Figura XI.1. “Relación entre el contenido de agua en el PWP obtenido experimentalmente y el estimado mediante modelo de regresión de Soto et al. (2001), empleando a) WAM y b) PP”

3.3. Proposición de PTFs específicas para la zona de estudio.

3.3.1. Para la totalidad de la zona de estudio.

Se han realizado regresiones lineales tanto simples como múltiples “*por pasos*” a fin de obtener PTFs para la zona de estudio que describiesen la FC y el PWP. Para ello, como en los apartados anteriores, se han considerado los valores obtenidos experimentalmente tanto por el WAM como por la PP para el PWP, empleando solamente los de este último método para la estimación de la FC. En el caso de las regresiones

múltiples se diferencian dos casuísticas: incluyendo las mismas variables independientes que el caso de Soto *et al.* (2001) y “*por pasos*”. Los resultados se muestran en la tabla XI.5.

Tabla XI.5. “PTFs propuestas para la determinación del PWP y FC para ambos métodos”

Método utilizado	Tipo regresión	Ecuación resultante	r²
WAM	Simple	$PWP=7 \cdot 10^{-3}+3 \cdot 10^{-3}ARC$	0,66
WAM	Por pasos	$PWP=-0,18+2 \cdot 10^{-3}ARC+0,08DAP+1 \cdot 10^{-3}FF+5 \cdot 10^{-3}MO$	0,93
PP	Simple	$PWP=0,03+4 \cdot 10^{-3}ARC$	0,46
PP	Por pasos	$PWP=-0,02+4 \cdot 10^{-3}ARC+0,02CO+0,11DAP-2 \cdot 10^{-3}LIM-1 \cdot 10^{-3}FF$	0,93
PP	Múltiple	$FC=-0,89-2 \cdot 10^{-3}ARC+8 \cdot 10^{-3}LIM+0,66DAP+0,06PH_A+0,05CO$	0,41
PP	Múltiple	$FC=0,15+4 \cdot 10^{-4}ARC+3 \cdot 10^{-3}LIM+0,05CO$	0,05
PP	Por pasos	$FC=-0,19+0,60DAP$	0,29

WAM: Medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión, ARC: Contenido en arcilla (%), DAP: Densidad aparente, FF: Fracción fina (%), MO: Materia orgánica (%), CO: Carbono orgánico (%), LIM: Contenido en limo (%), PH_A: pH en agua, PWP: Punto de marchitez permanente (cm³/cm³), FC: Capacidad de campo (cm³/cm³).

De la PTF propuesta para el PWP, considerando como variable independiente únicamente el ARC, se obtiene un r² bastante representativo de 0,66 para el WAM. No obstante, cuando el método empleado es la PP este se ve reducido a 0,46. En caso de introducir más variables, sean estas el ARC y la MO, conjuntamente con la DAP y la FF para el caso del WAM y el ARC, LIM, CO, DAP y FF para la PP, los resultados son en ambos casos aproximadamente iguales en el aspecto relativo al ajuste, tomando el r² valores de 0,93 (Fig. XI.2).

No sucede de igual forma en la estimación de la FC, independientemente de que se consideren las mismas variables que Soto *et al.* (2001) o bien se escojan otras dentro de las disponibles. En ningún caso se logra superar el r² de 0,41, bastante inferior al conseguido por los autores. Es importante reseñar que partiendo de los valores estimados con la PP y considerando las mismas variables que las de la ecuación XI.3 propuesta por Soto *et al.* (2001), se obtiene una disminución importante en la dependencia entre la FC y el ARC frente a los resultados obtenidos por los autores (Tabla XI.6).

En la determinación del PWP aunque los resultados obtenidos con las regresiones lineales múltiples “*por pasos*” son semejantes en el r², difieren tanto en el ME como en RMSE. De esta forma, la mayor dispersión entre valores medidos y estimados se obtiene con el WAM produciéndose una infravaloración en las estimaciones realizadas. Con la PP globalmente se sobreestiman las mismas, observándose unos resultados contrarios a los obtenidos al aplicar las ecuaciones propuestas por Soto *et al.* (2001).

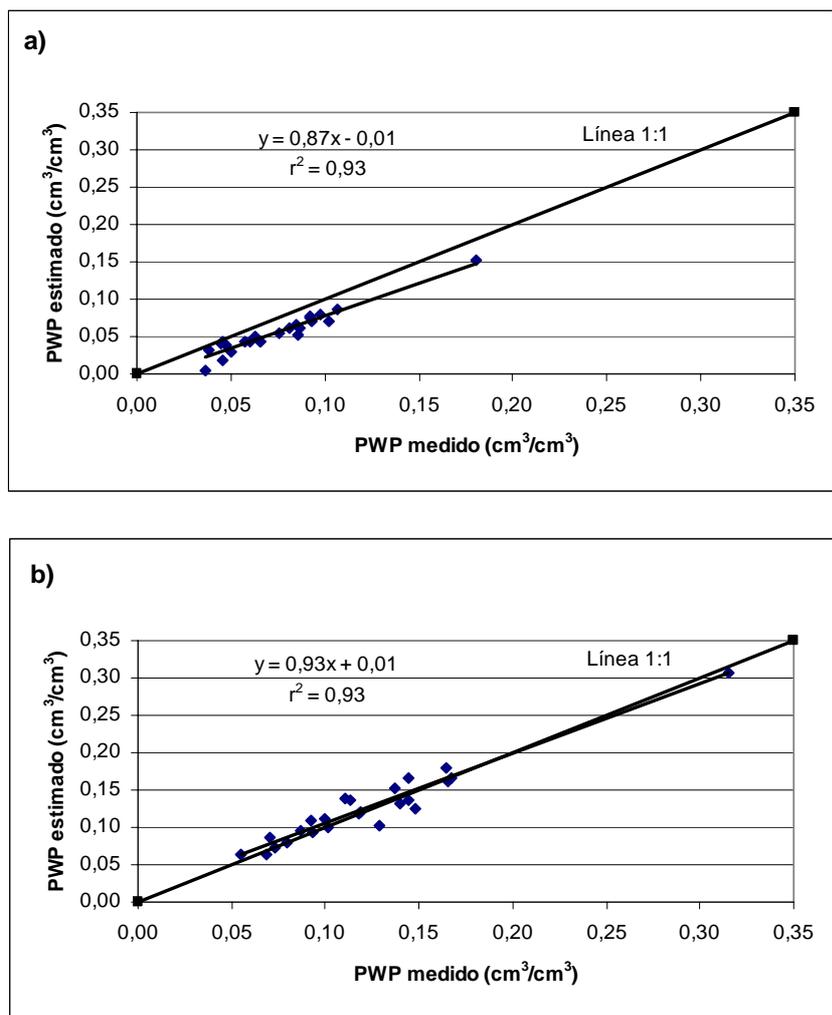


Figura XI.2. “Relación entre el contenido de agua en el PWP obtenido experimentalmente y el obtenido mediante regresión lineal múltiple “por pasos” para a) WAM y b) PP”

Tabla XI.6. “Estadísticos descriptivos de las regresiones realizadas para la determinación del PWP con el WAM y la PP”

Método utilizado	Tipo regresión	ME	RMSE	r^2
WAM	Simple	0,06	1,73	0,66
WAM	Por pasos	-1,91	2,08	0,93
PP	Simple	-0,04	3,71	0,46
PP	Por pasos	0,33	1,37	0,93

WAM: Psicrómetro o medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión de Richards, ME: Error medio, RMSE: Raíz del error cuadrático medio.

En esta situación y ante los escasos resultados positivos en la obtención de la FC a partir de los datos de partida disponibles, se consideró la posibilidad de la estimación directa de la AWC, mediante regresiones lineales múltiples “*por pasos*” (Tabla XI.7).

Tabla XI.7. “PTFs propuestas para la determinación de la AWC a partir de la metodología combinada PP-WAM”

Variable estimada	Tipo regresión	Ecuación resultante	r ²
AWC	Simple	AWC=0,42-3 10 ⁻³ ARC	0,02
AWC	Por pasos	AWC=-0,16+0,49ARC	0,21

AWC: Reserva de agua útil (cm³/cm³), ARC: Contenido en arcilla (%).

Se puede comprobar que las ecuaciones aportadas no resultan más idóneas que las obtenidas en el caso de la FC, tanto si se considera una sola variable, ARC, como si se realiza una regresión “*por pasos*”, en la que sólo se encuentra una relación y escasa, con la DAP. Por ello, se presenta un claro problema de estimación del contenido de agua a 0,033 MPa y como consecuencia de la AWC, considerando la zona de estudio en su conjunto y, por tanto, la conveniencia de desglosarla en categorías en función de determinadas características.

3.3.2. Proposición de PTFs específicas según diversas categorías.

3.3.2.1.1. En función del tipo de suelo.

A fin de observar si estos resultados se podían mejorar en la determinación de las tres propiedades hidrodinámicas consideradas, se decidió estratificar las muestras en función del tipo de suelo a fin de obtener PTFs específicas. De esta forma, se han tomado 13 muestras de cambisoles, 5 fluvisoles y 6 gleysoles. Se realizaron regresiones simples considerando las mismas propiedades propuestas por Soto *et al.* (2001), regresiones múltiples “*por pasos*” y análisis introduciendo la totalidad de propiedades disponibles. En este último caso se procede a comprobar la influencia de la profundidad de exploración de las raíces (Z) en las determinaciones mediante su inclusión/exclusión en las PTFs.

Con ambas metodologías, PP y WAM, se obtienen unos ajustes favorables en la estimación del PWP en cambisoles (Tabla XI.8) superiores a 0,87, no obstante, si bien la RMSE es pareja, en el caso de la PP se produce una subestimación de los valores frente a la sobreestimación producida en el caso del WAM. En el caso de las estimaciones para fluvisoles y gleysoles se produce en ambos casos la sobreestimación de los valores, exceptuando el caso del WAM con fluvisoles, en cuya situación se subestima. Los ajustes aportados en ambos casos son superiores a 0,80 considerándose como adecuados y favorables.

En la estimación de la FC los resultados no muestran una clara relación entre las diferentes propiedades consideradas con las propiedades hídricas demandadas. Únicamente

en el caso de los gleysoles se obtiene una ligera sobrestimación ($ME= 0,42$) en función del MO, LIM y ARC, DAP y PH_A, siendo en este caso la RMSE de 0,52 y el ajuste obtenido de 0,99.

Con la AWC se da la misma situación de modo que en los gleysoles se puede estimar a partir de los ARC, LIM y MO conjuntamente con el PH_CL y la Z con un ME de -1,98, una RMSE de 2,04 y un r^2 de 0,99. No obstante, los datos referentes tanto a la FC como a la AWC deberán tomarse con cierta precaución debido al pequeño tamaño muestral considerado.

En relación a la influencia o no de la Z en las estimaciones realizadas, los resultados son globalmente mejores en caso de que esta se incluya. Sin embargo, no existe una clara dependencia de este factor dado que su no inclusión únicamente provoca una ligera disminución en el r^2 , no resultando esta significativa.

3.3.2.1.2. En función de la profundidad de toma de muestras.

Estratificando en función de la Z, profundidad que se corresponde con la de la toma de muestras, se consideraron 10 muestras de 25-40 cm y 14 de 40-55 cm.

Al contrario que en el caso anterior, sí es posible una estimación de las tres propiedades hidrodinámicas estratificando las muestras en función de la Z (Tabla XI.8). Se observa claramente la conveniencia de introducir el mayor número de propiedades posible, de modo que se obtienen los mejores ajustes para la estimación del PWP. No obstante, pese a la dificultad encontrada hasta el momento para la estimación de la FC y por tanto la AWC, estratificando en función de la profundidad sí se podría realizar, con un r^2 de valores mínimos 0,71 y 0,69 respectivamente, para el primer extracto de profundidad. Importante destacar la elevada dispersión que se produce entre los valores de las estimaciones realizadas en dicho extracto.

Respecto a la influencia o no de la Z considerada dentro de cada uno de los extractos, no está clara la misma, dado que en ocasiones el ajuste se ve mejorado frente a ciertas disminuciones que se producen igualmente. Este fenómeno podría deberse al hecho de que al considerar los dos subgrupos ya se está considerando la profundidad y por tanto el considerarla a posterior puede carecer de sentido físico.

3.3.2.1.3. En función de la tipología del cultivo.

Si bien en la zona de estudio se distinguen tres cultivos principales, maíz, pradera natural y pradera artificial, a fin de homogenizar los resultados y facilitar las estimaciones a realizar se distinguen únicamente dos grupos de análisis: maíz y pradera. El maíz está constituido por 3 muestras y la pradera por 21 muestras.

Las estimaciones globalmente resultaron favorables, no obstante, destacar la dificultad de estimar tanto la FC como la AWC en el caso de la pradera, cuyos r^2 no superan 0,44 (Tabla XI.8). La dispersión que se observa en los valores en ambos casos es elevada, si bien el ME es de 1,26 para la FC y bastante bajo para la AWC, de -0,08.

Tabla XI.8. “PTFs propuestas para la estimación de los hydrolimits en función de los distintos subgrupos considerados”

MÉTODO	PROPIEDAD ESTIMADA	CATEGORÍA	ECUACIÓN RESULTANTE	r ²	ME	RMSE
TIPO DE SUELO						
WAM	PWP	Cambisol	$PWP=0,06+2 \cdot 10^{-3}FF-0,02DA-6 \cdot 10^{-3}LIM+4,76 \cdot 10^{-3}ARC+0,05PH_A-0,04PH_{CL}-1 \cdot 10^{-3}MO-1 \cdot 10^{-3}Z$	0,95	1,77	1,92
PP	PWP	Cambisol	$PWP=0,309-7 \cdot 10^{-3}LIM-2 \cdot 10^{-3}Z+6 \cdot 10^{-3}MO$	0,87	-1,24	1,69
WAM	PWP	Fluvisol	$PWP=-0,03+0,09DAP$	0,83	-0,25	0,84
PP	PWP	Fluvisol	$PWP=-0,32+1 \cdot 10^{-3}FF+0,20DAP+1 \cdot 10^{-3}LIM+0,02MO$	0,99	0,32	0,32
WAM	PWP	Gleysol	$PWP=-0,02+4 \cdot 10^{-3}ARC$	0,89	1,37	2,25
PP	PWP	Gleysol	$PWP=0,38-8 \cdot 10^{-2}Z-2 \cdot 10^{-3}LIM+5 \cdot 10^{-3}ARC-0,02PH_{CL}+0,02MO$	0,99	1,23	1,33
PP	FC	Gleysol	$FC=-3,36+0,09DAP+9,68 \cdot 10^{-3}ARC-6 \cdot 10^{-3}LIM+0,62PH_A+0,1IMO$	0,99	0,42	0,52
WAM-PP	AWC	Gleysol	$AWC=-4,35+0,03Z+5 \cdot 10^{-3}LIM-3 \cdot 10^{-3}ARC+0,62PH_{CL}+0,12MO$	0,99	-1,98	2,04
PROFUNDIDAD DE TOMA DE MUESTRAS						
WAM	PWP	25-40	$PWP=0,08-1,30 \cdot 10^{-4}FG+0,11DAP-6 \cdot 10^{-3}Z+1 \cdot 10^{-3}LIM-2,7 \cdot 10^{-4}ARC+0,04PH_A-0,03PH_{CL}-3 \cdot 10^{-3}MO$	0,99	-0,19	0,62
PP	PWP	25-40	$PWP=0,24+2,03 \cdot 10^{-4}FG+0,08DAP-2 \cdot 10^{-3}ARC-2 \cdot 10^{-3}LIM-0,12PH_A+0,11PH_{CL}+0,01MO$	0,97	1,68	1,84
WAM	PWP	40-55	$PWP=-0,07+2 \cdot 10^{-3}ARC+0,09DAP$	0,91	-0,95	1,45
PP	PWP	40-55	$PWP=-0,38+7 \cdot 10^{-3}ARC+0,09DAP+0,1IMO+3 \cdot 10^{-3}ARC$	0,95	-1,32	1,91
PP	FC	25-40	$FC=-0,35+0,02FG-0,20DAP+0,01Z+0,05LIM-9 \cdot 10^{-3}ARC+0,54PH_A-0,74PH_{CL}-7 \cdot 10^{-3}MO$	0,71	-1,04	10,75
PP	FC	40-55	$FC=-2,79+4 \cdot 10^{-3}ARC+0,01LIM+0,72DAP+0,33PH_A+0,08CO$	0,84	-0,58	8,27
WAM-PP	AWC	25-40	$AWC=-0,43+0,02FG-0,30DAP+0,02Z+0,05LIM-0,01ARC+0,49PH_A-0,71PH_{CL}-4 \cdot 10^{-3}MO$	0,69	-2,32	11,19
WAM-PP	AWC	40-55	$AWC=-2,54+9 \cdot 10^{-3}FG+0,58DAP-2 \cdot 10^{-3}LIM-3 \cdot 10^{-3}ARC+0,98PH_A-0,65PH_{CL}+0,02MO$	0,89	0,43	6,58
TIPO DE CULTIVO						
WAM	PWP	Maiz	$PWP=-0,08+7 \cdot 10^{-3}ARC$	0,87	-0,29	0,91
PP	PWP	Maiz	$PWP=0,15-2 \cdot 10^{-3}ARE+7 \cdot 10^{-3}MO$	0,99	0,29	0,32
WAM	PWP	Pradera	$PWP=-0,08-2 \cdot 10^{-3}FG+0,08DAP-1 \cdot 10^{-3}LIM+2 \cdot 10^{-3}ARC+1 \cdot 10^{-3}PH_A+5 \cdot 10^{-3}PH_{CL}+5 \cdot 10^{-3}MO$	0,96	-2,70	2,84
PP	PWP	Pradera	$PWP=-0,09+4,20 \cdot 10^{-4}FG+0,12DAP-2 \cdot 10^{-3}LIM+4 \cdot 10^{-3}ARC-0,04PH_A+0,03PH_{CL}+0,01MO$	0,94	0,06	1,45
PP	FC	Maiz	$FC=-0,51+0,13LIM-0,72CO$	0,99	-0,44	0,49
PP	FC	Pradera	$FC=-1,31+0,01FG+0,59DAP+8 \cdot 10^{-2}Z+6 \cdot 10^{-3}LIM-4,6 \cdot 10^{-4}ARC+0,28PH_A-0,21PH_{CL}+5 \cdot 10^{-3}MO$	0,44	1,26	15,43
WAM-PP	AWC	Maiz	$AWC=-0,57+0,04ARC$	0,99	0,28	0,68
WAM-PP	AWC	Pradera	$AWC=-0,96+8 \cdot 10^{-3}FG+0,55DAP+6 \cdot 10^{-3}LIM-4 \cdot 10^{-3}ARC+0,37PH_A-0,27PH_{CL}+7 \cdot 10^{-3}MO$	0,40	-0,08	15,76

WAM: Psicrómetro o medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión de Richards, PWP: Punto de marchitamiento permanente (cm³/cm³), FC: Capacidad de campo (cm³/cm³), ME: Error medio, RMSE: Raíz del error cuadrático medio, FF: Fracción fina (%), LIM: Contenido en limo (%), ARC: Contenido en arcilla (%), PH A: pH en agua, PH CL: pH en cloruro potásico 1 M, MO: Contenido en materia orgánica (%), Z: Profundidad radicular (cm), DAP: Densidad aparente (gr/cm³), FG: Fracción gruesa (%), CO: Contenido en carbono orgánico (%).

En cualquier caso, se recomienda tomar con cierta precaución la bondad del ajuste del otro cultivo, el maíz, referente a estas propiedades, ya que el tamaño muestral considerado en este caso respecto a la totalidad de las muestras resulta un tanto reducido.

En lo referente al PWP se observa una subestimación en los valores procedentes del WAM, sobreestimando los datos relativos a la PP, resultando r^2 superiores a 0,87.

4. Conclusiones.

En este trabajo se demuestra la idoneidad de realizar la modelización de los “*hydrolimits*” a través del uso de PTFs generadas a partir de las características y propiedades específicas que presenta la zona regable de Terra Chá (Galicia, NO de España). En este ámbito de estudio el empleo de modelos de carácter genérico, propuestos tanto a nivel internacional como a nivel nacional, aunque aportan rápidamente estimaciones del PWP, la bondad de las mismas es, en ocasiones, cuestionable, no pudiéndose obtener en ningún caso una estimación de la FC ni de la AWC. No obstante, en caso de emplear cualquiera de estas dos metodologías de carácter genérico, se proponen, como modelos internacionales más idóneos: el modelo “*Mayr-Jarvis*”, en caso de aplicarse a datos medidos directamente a partir del WAM, y el modelo de “*EPIC*”, en el caso de provenir estos de la PP. En lo relativo al modelo propuesto a nivel nacional por Soto *et al.* (2001), si bien, la fiabilidad de las estimaciones se asemeja bastante a la obtenida por los autores del mismo, es inferior a la obtenida con los modelos internacionales recomendados. En este sentido, hay que considerar que se trata de un modelo muy simplificado en el que la estimación del PWP se realiza a partir de una única propiedad. Por ello, que se recomiende el empleo de una u otra metodología, dentro de las genéricas, en función de que se valore la bondad de las estimaciones realizadas, adecuándose mejor los modelos internacionales; o la cantidad de información necesaria para su aplicación, en cuyo caso resultaría apropiada la modelización propuesta por Soto *et al.* (2001).

Dada esta situación y persiguiendo la estimación de las tres propiedades hídricas, no sólo el PWP, se considera totalmente indicada y absolutamente necesaria la proposición y empleo de modelos de carácter local, diseñados específicamente para la zona de estudio como se propone en este trabajo. En este sentido, se hace preciso el desglose del área considerada en tres categorías proponiéndose ecuaciones que logran perfectamente el objetivo buscado en función del tipo de suelo, tipo de cultivo y profundidad de exploración radicular.

No obstante, a raíz de los análisis realizados, se cuestiona en esta investigación la conveniencia del empleo del modelo propuesto por Campbell para el ajuste de las WRC empleadas inicialmente en la obtención del PWP en el caso del WAM. Se trata del modelo recomendado por el fabricante del dispositivo, de ahí su utilización, pero la presencia de modelos internacionales que presentan mejores ajustes en las estimaciones realizadas parecen indicar la posibilidad de existencia de modelos que se adecuen mejor para el establecimiento de la relación existente entre el contenido de agua y el potencial, que se relaciona a través de la WRC. Consecuentemente, se recomienda su el ajuste a otros

modelos disponibles, a fin de que se corrobore si realmente el modelo de Campbell es el más indicado.

Con estas consideraciones se podría concluir que la modelización de los “*hydrolimits*” debe ser lo más específica posible, quedando, en última instancia, a elección del usuario el empleo de una metodología u otra, dentro de las propuestas, en función de la fiabilidad demandada y las propiedades a estimar. Sin embargo, resulta recomendable la realización de un posterior análisis pormenorizado de los modelos considerados más idóneos a tal efecto, incluyendo cuestiones colaterales tales como el esfuerzo invertido en términos de coste o la calidad de la información obtenida, los cuales podrían influenciar la elección de los mismos.

5. Referencias bibliográficas.

- Acutis, M.; Donatelli, M.** 2003. *SOILPAR 2.00*: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*. **18**: 373-377.
- Bell, M.A.; van Keulen, H.** 1995. Soil pedotransfer functions for four mexican soils. *Soil Science Society of America Journal*. **59**: 865-871.
- Bonilla, C.; Cancino, J.** 2001. Estimación del contenido de humedad del suelo mediante el empleo de funciones de pedotransferencia. *Agricultura Técnica* (Chile). **61** (3): 326-338.
- Bouma, J.** 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*. **9**: 177-213.
- Campbell, G.S.** 1985. Soil physics with basic. *Developments in Soil Science*. **14**. Elsevier. pp: 150.
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.
- Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X.; Pereira, L.S.** 2006a. Modelling for improved irrigation water management in a temperate region of northern Spain. *Biosystems Engineering*. **91** (1): 151-163.
- Castelao, A.M.** 1989. Aportación al estudio de la hidromorfia de los suelos de Terra Chá y su influencia en la génesis y capacidad productiva. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.
- Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Santi, G.R.; Paulleto, E.; Leitske, V.W.; Spinelli-Pinto, L.F.** 2002. Retenção de água medida pelo método de placas porosas de Richards e pelo psicrômetro de termopar. XIX RBMCSA Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Cuiabá, M.T. 21 a 26 de julho 2002.

- Cornelis, W.M.; Ronsyn, J.; van Meirvenne, M.; Hartmann, R.** 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal*. **65**: 638-648.
- Costa, A.; Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J.; Mafra, A.L.; Bayer, C.; Passos, J.F.M.; Fontoura, S.M.V.; Camilo, K.C.** 2003. Variação temporal da humidade e água disponível em um Latossolo Bruno sob cinco sistemas de manejo. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Ribeirão Preto. S.P. 13 a 18 julho 2003.
- Christiaens, K.; Reyen, J.** 2001. Analysis of uncertainties associated with different methods to determine soil hydraulic properties and their propagation in the distributed hydrological MIKE SHE model. *Journal of Hydrology*. **246**: 63-81.
- Donatelli, M.; Acutis, M.** 1996. Evaluation of methods to estimate soil water content at field capacity and wilting point. 4th ESA Congress. The Netherlands.
- Gutián, F.; Carballás, T.** 1976. Técnicas de análisis de suelos. Pico Sacro. Santiago de Compostela, España.
- Kunz, M.; Da Silva, V.R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Kaiser, D.R.; Pellegrini, A.** 2003. Determinação da capacidade de campo em diferentes níveis de compactação em um Latossolo Argiloso. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo., Ribeirão Preto, S.P. 13 a 18 julho 2003.
- MAPA.** 1995. Métodos oficiales de análisis de suelos y agua de riego. MAPA. Madrid, España.
- Marion, J.M.; Or, D.; Rolston, D.E.; Kavvas, M.L.; Biggar, J.W.** 1994. Evaluation of methods for determining soil-water retentivity and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science*. **158** (1): 1-13.
- Martínez, J.; Ceballos, A.** 2001. Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafotransferencia. En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. pp: 45-50.
- Martínez, J.; Ceballos, A.; Casado, S.; Moran, C.** 2004. Estimación de propiedades hidrológicas de suelos y formaciones superficiales de dehesa mediante funciones de edafotransferencia. Benito, G.; Díez Herrero, A. (eds.). Contribuciones recientes sobre Geomorfología. Actas de la VII Reunión Nacional de Geomorfología. SEG y CSIC, Toledo, España.
- Minasny, B.** 2000. Efficient methods for predicting soil hydraulic properties. Doctoral Thesis. Department of Agricultural Chemistry and Soil Science, The University of Sydney, New South Wales, Australia.
- Minasny, B.; McBratney, A.B.** 2002. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. *Geoderma*. **107**: 55-70.

- Minasny, B.; McBratney, A. B.; Bristol, K. L.** 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*. **93**: 225-253.
- Minasny, B.; McBratney, A.B.; Mendonça-Santos, M. de L.; Gonçalves dos Santos, H.** 2003. Revisão sobre funções de pedotransfêrencia (FPTs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos – CNPS, Rio de Janeiro, Brasil.
- Mugabe, F.T.** 2004. Pedotransfer functions for predicting three points on the moisture characteristic curve of a Zimbabwean soil. *Asian Journal of Plants Sciences*. **3** (6): 679-682.
- Nagy, V.; Štekauerová, V.; Nemenyi, M.** 2005. Securing water for agriculturally cultivated fields and forest ecosystems. Innovation and utility in the visegrad fours. En: Research and development from idea to product. Nyíregyháza, Hungary.
- Nemes, A.** 2003. Multi-scale pedotransfer functions for Hungarian soils. Doctoral Thesis. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Orfánus, T.** 2005. Regional processing of soil drought indicators: conditional hydrolimits and water storage capacity. En: INYS Workshop on Hydrology, Smolenice.
- Orfanus, T.; Mikulec, V.** 2005. Regionalization of potential water storage capacity of agricultural landscape-a quantification of soil accumulation function. *Geophysical Research Abstracts*. **7**.
- Rajkai, K.; Kabos, S.; van Genuchten, M.T.** 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil & Tillage Research*. **79**: 145-152.
- Rawls, W.J.; Gish, T.J.; Brakensiek, D.L.** 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Advances Soil Science*. **16**: 213-234.
- Rodríguez, A.** 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Departamento de Ingeniería Agroforestal (EPS). Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.
- Rossato, G.; Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Paulette, E.A.; Spinelli, L.F.** 2002. Estimativa de retenção e água a partir de atributos do solo. En: IV Reunião Sul brasileira de Ciencia do solo. Porto Alegre, Brasil.
- Rubio, C.** 2005. Hidrodinámica de los suelos de un área de montaña media mediterranea sometida a cambios de uso y cubierta. Tesis Doctoral. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera". Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España.

- Rubio, C.; Llorens, P.** 2003. Evaluación del uso de funciones de edafotransferencia para la determinación de propiedades hidrodinámicas en suelos franco-limosos (Cuencas experimentales de Vallcebre, Alt Llobregat). En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. pp: 137-142.
- Skalová, J.; Štekauerová, V.; Šútor, J.** 2000. Využitie pedotransferných funkcií na určenie hydrolimitov (Estimation of the hydrolimits using pedotransfer functions). Bioklimatológia a životné prostredie. En: XIII. Bioklimatologická konferencia SBkS a ČBkS. Košice, Eslovaquia.
- Solano, J.E.; Reichert, J.M.; Reinert, D.V.; Satin, G.; Sequinatto, L.** 2002. Equações de pedotransferência para estimativa do ponto de murcha permanente (PMP) em solos do Rio Grande do Sul. XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Cuiabá, M.T. 21 a 26 julho 2002.
- Soto, B.; Arias, M.; Diaz-Fierros, F.** 2001. Desarrollo de una función de pedotransferencia para los suelos de Galicia (NW Spain). *Agrochimica*. **XLV** (5-6): 178-188.
- Štekauerová, V.; Skalová, J.; Šútor, J.** 2002. Using of pedotransfer functions for assessment of hydrolimits. *Rostlinná Výroba*. **48**: 407-412.
- Tietje, O.; Tapkenhinrichs, M.** 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Science Society of America Journal*. **57**: 1088-1095.
- USDA.** 2004. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>.
- Vanderlinden, K.; Giradles, J.V.; van Meirvenne, M.** 2003. Evaluación de la capacidad de retención de agua de los suelos de Andalucía mediante el análisis del balance medio anual del agua. En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, España. pp: 131-136.
- Wang, F.; Fraisse, C.W.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.** 2003. Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri clypan soils. *Agricultural Systems*. **76**: 985-1005.
- Williams, R.D.; Ahuja, L.R.; Naney, J.W.** 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density, and limited data. *Soil Science*. **153** (3): 172-184.
- Wösten, J.H.M.** 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. En: E.G. Gregorich, M.R. Carter (Eds). Soil quality for crop production and ecosystem health. *Developments in Soil Science*. **25**. Elsevier.

**EFICIENCIA EN LA ESTIMACIÓN DE
"HYDROLIMITS" CON DIFERENTES METODOLOGÍAS**

CAPÍTULO

CAPÍTULO XII

EFICIENCIA EN LA ESTIMACIÓN DE “HYDROLIMITS” CON DIFERENTES METODOLOGÍAS⁶⁸

*“Es un hecho que el hombre tiene que controlar la Ciencia y chequear ocasionalmente el avance de la
Tecnología”*

Thomas Henry Huxley (1825-1895). Biólogo británico.

⁶⁸ **Martínez, E.M.; Cuesta, T.S.; Cancela, J.J.** 2008. Eficiencia en la estimación de la reserva de agua útil con diferentes metodologías. Terra Chá-Galicia. XXVI Congreso Nacional de Riegos, Huesca. 24-26 de junio de 2008.

ÍNDICE

Resumen	349
1. Introducción y objetivo.....	351
2. Material y métodos	352
2.1. Zona de estudio y tipos de suelo	352
2.2. Análisis de la eficiencia.....	353
2.3. Metodologías empleadas en la determinación de las propiedades hídricas	354
2.4. Parámetros empleados según metodologías	356
3. Resultados y discusión	356
3.1. Determinación de los componentes de la eficiencia	356
3.1.1. Cálculo del esfuerzo	356
3.1.1.1. Medidor de actividad de agua.....	356
3.1.1.2. Placa de presión	356
3.1.1.3. Propiedades de los suelos	357
3.1.1.4. SOILPAR 2.00	358
3.1.1.5. Funciones de pedotransferencia.....	358
3.1.2. Análisis del esfuerzo.....	360
3.1.3. Cálculo y análisis del coste en función del coste del operario y de los análisis.....	361
3.1.4. Cálculo y análisis de la calidad de la información	364
3.2. Cálculo y análisis de la eficiencia	366
4. Conclusiones.....	371
5. Referencias bibliográficas	372

RESUMEN

La estimación y/o determinación de los “*hydrolimits*”, considerados como el punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP), la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y, por derivación, la reserva de agua útil (*available water content*) (AWC), lleva implícita una serie de dificultades a superar. La elección de la metodología a seguir se basa en un análisis multicriterio, no siempre claro y definitorio. Ante esta circunstancia, en este trabajo se evalúa la eficiencia de métodos de determinación tanto indirectos, basados en la determinación del potencial, como predictivos a fin de poder facilitar dicha elección. Para ello se emplean dos índices sugeridos por Minasny (2000), basados en el cálculo de la eficiencia en términos de esfuerzo y de coste, pero diversificando su aplicación a metodologías de características no semejantes. Los métodos considerados son la placa de presión (*pressure plate*) (PP) y un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM), como métodos indirectos, y las funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs) sean estas específicas para la zona de estudio o genéricas, tanto nacionales como internacionales, como métodos predictivos.

Para la obtención del PWP, se recomienda el WAM en dos de los aspectos considerados, esfuerzo demandado y coste del operario, mientras que si se consideran los costes derivados de los análisis el método que se presenta como idóneo es el WAM y en términos de calidad el *SOILPAR* a través del modelo de “*Mayr-Jarvis*”. El otro método indirecto, la PP, se recomienda en los tres aspectos, en caso de determinar la FC, lo mismo sucede con la metodología combinada PP-WAM para la AWC, salvo en caso de considerar costes derivados de los análisis, en cuyo caso se recomiendan PTFs locales. Resultados parejos en relación a la calidad de información presenta la PP. Importante destacar la relación de los resultados obtenidos con los métodos indirectos, la PP y el WAM, los cuales concuerdan con los aportados hasta el momento en los diferentes capítulos, estableciéndose el WAM como método preferente en la determinación del PWP, la PP si se determina la FC y por último muy parejos, la aplicación de la PP y la metodología WAM-PP para la determinación de la AWC.

A tenor de las discrepancias observadas en la idoneidad de los diferentes métodos según el criterio elegido, se recomienda la combinación de análisis generalistas, basados en índices de eficiencia, conjuntamente con análisis basados en los distintos factores influyentes, considerados estos de forma independiente, a fin de no enmascarar posibles ventajas o inconvenientes que no trasciendan en el cálculo de las eficiencias.

1. Introducción y objetivo.

En la determinación y conocimiento de las propiedades hídricas de los suelos en su aplicación a la gestión del agua, concretamente de los “*hydrolimits*”, destaca la aplicación de diversos métodos que facilitan y abrevian el proceso de medición a partir de determinadas propiedades fácilmente medibles y cuantificables. Se consideran “*hydrolimits*” a los límites del agua disponible para las plantas, siendo esta el volumen de agua comprendido entre la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y el punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP) (Štekauerová *et al.*, 2002; Orfanus y Mikulec, 2005). A este volumen se le denomina reserva de agua útil (*available water content*) (AWC).

La metodología existente para su determinación es variada, no obstante no toda ella presenta las mismas características, dado que puede tratarse de una medición indirecta de las propiedades hídricas a emplear, tal como se detalla en el capítulo IX (Rodríguez, 2004; Cancela, 2004) o bien una estimación a partir de otros parámetros (Vereecken, 1988; Wösten *et al.*, 1995; Minasny *et al.*, 1999; Tomasella *et al.*, 2003), como se pone de relieve en el capítulo XI.

La metodología empleada para la determinación indirecta de las propiedades hídricas del suelo se centra principalmente en el empleo de aparataje de laboratorio, tipo placa de presión de Richards (*pressure plate*) (PP) (Richards y Fireman, 1943) o bien medidores de actividad de agua (*water activity meters*) (WAMs) del tipo WP4 (Gee *et al.*, 1992; Mullins, 2001) (Capítulo V). Como métodos predictivos destaca el uso de funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs) (Vereecken, 1988, McBratney *et al.*, 2002; Štekauerová, 2002 y Cresswell, 2006) y de programas informáticos diseñados específicamente para tal efecto (Donatelli y Acutis, 1996; Acutis y Donatelli, 2003; Wang, 2003) (Capítulo VI).

Minasny *et al.* (2003) afirman que nunca se debe pronosticar aquello que es más económico de medir o determinar de forma directa. De esta forma se introduce el concepto de “*eficiencia*”. La eficiencia se puede definir de varias formas, como la “*capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado*” (Real Academia Española) o el “*criterio económico que revela la capacidad administrativa de producir el máximo de resultados con el mínimo de recursos, energía y tiempo*”⁶⁹. Cualquiera de las dos recoge aspectos relevantes a conseguir: la primera destaca la importancia del “*objetivo*”, en este caso la determinación de las propiedades hídricas, la segunda hace referencia al uso de “*recursos, energía y tiempo*” indicando un claro interés económico.

Con el transcurrir de los años, diversos autores han comparado diferentes metodologías, tal es el caso de Gee *et al.* (1992), Vereecken *et al.* (1992), Marion *et al.* (1994), Minasny *et al.* (1999), y, más recientemente, Turner *et al.* (2000), Christiaens y Reyen (2001), Rodrigues *et al.* (2003) y Rajkai *et al.* (2004), entre otros. No obstante, en escasas ocasiones se han detenido a analizar de forma pormenorizada la eficiencia de los mismos de forma cuantitativa (Minasny, 2000; Minasny y McBratney, 2002; Rubio, 2005;

⁶⁹http://www.fceia.unr.edu.ar/labinfo/facultad/decanato/secretarias/desarr_institucional/acreditacion_carreras_ingenieria/acreditacion_archivos_pdf/a_Definicion_Beno_Sander.pdf

Rubio *et al.*, 2007), quedando reducido al estudio y comparación de la eficiencia dentro de una única tipología de métodos.

Considerando que la elección de una metodología u otra se rige por diferentes criterios, tales como facilidad de manejo, rapidez y condiciones demandadas externas al dispositivo de medida (Capítulos IX y X), fiabilidad de resultados obtenidos y adaptación a la zona de estudio (Capítulo XI), así como también la incertidumbre en las determinaciones, esfuerzo requerido, personal necesario y coste, destaca la importancia de analizar la eficiencia de los distintos métodos empleados en esta investigación.

El objetivo perseguido en este capítulo es la comparación de la eficiencia de las metodologías utilizadas para la obtención de las propiedades hídricas en la zona regable de Terra Chá: método indirecto mediante estimación en laboratorio a partir de la PP y WAM, y métodos predictivos como PTFs propuestas por Soto *et al.* (2001), FPTs específicas para la zona de estudio y PTFs del programa informático *SOILPAR 2.00*; a fin de establecer la idoneidad en la determinación de los “*hydrolimits*” empleando una metodología u otra siguiendo criterios de esfuerzo y económicos.

2. Material y métodos.

Se parte de la información sobre los diferentes métodos aportada en los capítulos IX y XI, relativa a la determinación de los “*hydrolimits*” con la PP y WAM y las FTPs, tanto las de Soto *et al.*, (2001), las aplicadas mediante el programa *SOILPAR 2.00*, como las propuestas en esta investigación.

2.1. Zona de estudio y tipos de suelo.

El muestreo ha sido realizado en la zona de Terra Chá (Cancela *et al.*, 2004), más concretamente en su zona regable perteneciente a la zona de colonización. Como se describe en el capítulo II, el área está constituida por tres sectores: sector I “*A Espiñeira*” con 217 ha, el sector II, “*Arneiro-Veiga de Pumar*” con 783 ha y el sector III “*Matodoso*” con 777 ha (Cancela, 2004). La morfología de sus suelos está constituida por un 68% de cambisoles, un 22% de gleysoles y un 10% de fluvisoles (Castelao y Díaz-Fierros, 1992; Álvarez *et al.*, 2005). Para la investigación se consideraron 24 muestras (Tabla XII.1).

Tabla XII.1. “Características físicas de los 24 suelos analizados”

Descriptivos	DAP (gr/cm ³)	ARE (%)	LIM (%)	ARC (%)	PH_A	PH_CL	CO (%)	MO (%)
Mínimo	0,66	29,47	15,12	13,50	4,30	3,80	1,93	3,32
Máximo	1,28	71,39	32,79	54,53	6,50	6,10	5,50	9,48
Media aritmética	1,01	53,32	23,55	23,14	5,38	4,83	3,72	6,41
Desviación típica	0,20	0,64	4,42	8,55	0,51	0,57	0,92	1,59

DAP: Densidad aparente, ARE: Contenido en arena, LIM: Contenido en limo, PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en cloruro potásico 1M, CO: Contenido en carbono orgánico, MO: Contenido en materia orgánica.

Tomadas mediante una malla de 500 x 500 m establecida sobre el área de estudio, constituidas por 13 cambisoles, 6 gleysoles y 5 fluvisoles. A todas ellas se las sometió a secado, tamizado y posterior determinación de las siguientes propiedades: textura, materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), pH en agua (PH_A) y en cloruro (PH_CL) y densidad aparente (DAP), esta última determinada en campo.

2.2. Análisis de la eficiencia

Para el análisis de la eficiencia en las diferentes metodologías empleadas hay que considerar que el nivel de información utilizado va ligado a un esfuerzo humano y a un coste de adquisición o realización, asociada esta última a la contratación de un operario. Son escasos los autores que analizan este punto, de forma que Minasny (2000) o Minasny y McBratney, 2002 definen dos tipos de eficiencia, o índices, para el análisis de los métodos:

➤ *Eficiencia en términos de esfuerzo:*

$$\text{Eficiencia} = \text{calidad de información} / \text{esfuerzo} \quad (\text{XII.1})$$

➤ *Eficiencia en términos de coste:*

$$\text{Eficiencia} = \text{calidad de la información} / \text{coste de la información} \quad (\text{XII.2})$$

Para ello se considera que la “*calidad de la información*” puede ser evaluada en función de la desviación estándar de las propiedades hídricas que se predicen como resultado de la incertidumbre de las mediciones; el “*esfuerzo*” describe el tiempo que lleva realizar las mediciones u obtener información y el “*coste*” se asocia a lo que cuesta en términos económicos la adquisición de las mediciones y/o la información.

En este artículo se analizan estos índices extendiendo su uso no sólo a las PTFs, sino a las diferentes metodologías empleadas.

Se emplean, conjuntamente con una adaptación del índice propuesto por Rubio (2005) (Ec. XII.3):

$$E = Ee + \frac{Ef}{n} \quad (\text{XII.3})$$

siendo:

E : Esfuerzo por muestra generado por el método (h).

Ef : Esfuerzo fijo necesario para la construcción del método (trabajo de laboratorio en 24 muestras) (h.muestra).

E_e : Esfuerzo específico necesario para determinar las propiedades del suelo que se emplean en los métodos para cada muestra (h).

2.3. Metodologías empleadas en la determinación de las propiedades hídricas.

Las metodologías empleadas son tanto de tipo indirecto como predictivo para la determinación de los “*hydrolimits*”. Como métodos indirectos se han empleado la PP y el WAM (Capítulo IX). Como métodos predictivos se emplean tanto las PTFs como el uso de programas informáticos específicos para tal efecto (Capítulo XI).

El WAM elegido fue el modelo *WP4 Dewpoint PotentiaMeter (Decagon Device, Inc)*. Se trata de un dispositivo que mide la suma de los potenciales osmóticos y mátricos de la muestra, pudiéndose considerar según las características del estudio el potencial osmótico como nulo. Su elección se fundamentó en la rapidez, exactitud y fiabilidad teóricas en las lecturas, basándose para ello en la “*técnica del punto de condensación del enfriamiento del espejo*”.

Para el método de la PP se ha empleado el modelo fabricado por la empresa “*Soil Moisture Equipment Corp. (Santa Barbara CA)*”.

Referente al cálculo de los distintos parámetros a estimar se empleó el software libre: *SOILPAR 2.00* (Acutis y Donatelli, 2003), el cual, incluye varias PTFs comúnmente utilizadas en los ámbitos agronómicos, para la estimación de parámetros hidráulicos basándose en la composición textural, la DAP y el CO (Wang *et al.*, 2003). Los resultados obtenidos en el capítulo XI muestran que el programa está indicado para la obtención del PWP en la zona de estudio, pero no tanto para la FC. Dentro del PWP se consideran dos casos, que se utilicen los datos provenientes de la PP o del WAM. En el primer caso, el modelo que mejor define la estimación es el modelo de “*EPIC*” y para el psicrómetro el modelo de “*Mayr-Jarvis*”.

El empleo de las PTFs es un método sencillo de estimación de determinadas propiedades hídricas en suelos. De esta forma se relacionan propiedades fácilmente medibles con otras más difíciles de cuantificar. En Galicia existe una carencia importante de aplicación de esta metodología a sus suelos, siendo por tanto escasos los estudios relativos a ello, destacando el de Soto *et al.* (2001). Ellos proponen la estimación del PWP a partir del contenido de ARC (Tabla XII.2).

Tabla XII.2. “*Características de la PTF propuesta por Soto et al. (2001)*”

Nº	Propiedad estimada	Propiedades predictoras	Ecuación
1	PWP	ARC	$PWP = 0,376 \text{ ARC} + 6,3$

ARC: Contenido en arcilla (%), PWP: Punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3).

No obstante, en el capítulo XI se proponen otras PTFs específicas para el área de estudio considerando más variables. Para ello se realizan distintas categorías dentro del área considerada a fin de que las PTFs obtenidas resulten ser lo más específicas posibles,

empleándose en su estimación los resultados procedentes de la PP, el WAM o bien una metodología combinada PP-WAM. Las ecuaciones recomendadas se describen en la tabla XII.3, eligiendo como representativas de cada propiedad y aparataje aquellas de coeficiente de ajuste superior (Capítulo XI).

Tabla XII.3. “Características de las PTFs específicas propuestas”

Nº	Características de la ecuación	Dispositivo empleado en la estimación	Propiedad estimada	Propiedades predictoras	Ecuación
2	Totalidad de la zona de estudio	WAM	PWP	ARC, DAP, FF, MO	$PWP = -0,18 + 2 \cdot 10^{-3} \text{ARC} + 0,08 \text{DAP} + 1 \cdot 10^{-3} \text{FF} + 5 \cdot 10^{-3} \text{MO}$
3	Totalidad de la zona de estudio	PP	PWP	ARC, CO, DAP, LIM, FF	$PWP = -0,02 + 4 \cdot 10^{-3} \text{ARC} + 0,02 \text{CO} + 0,11 \text{DAP} - 2 \cdot 10^{-3} \text{LIM} - 1 \cdot 10^{-3} \text{FF}$
4	Tipo de suelo	WAM	PWP	FF, DA, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO, Z	$PWP = 0,06 + 2 \cdot 10^{-3} \text{FF} - 0,02 \text{DA} - 6 \cdot 10^{-3} \text{LIM} - 4,76 \cdot 10^{-5} \text{ARC} + 0,05 \text{PH}_A - 0,04 \text{PH}_{CL} - 1 \cdot 10^{-3} \text{MO} - 1 \cdot 10^{-3} \text{Z}$
5	Tipo de suelo	PP	PWP	Z, LIM, ARC, PH_CL, MO	$PWP = 0,38 - 8 \cdot 10^{-3} \text{Z} - 2 \cdot 10^{-3} \text{LIM} + 5 \cdot 10^{-3} \text{ARC} - 0,02 \text{PH}_{CL} + 0,02 \text{MO}$
6	Tipo de suelo	PP	FC	DAP, ARC, LIM, PH_A, MO	$FC = -3,36 + 0,09 \text{DAP} + 9,68 \cdot 10^{-5} \text{ARC} - 6 \cdot 10^{-3} \text{LIM} + 0,62 \text{PH}_A + 0,11 \text{MO}$
7	Tipo de suelo	WAM-PP	AWC	Z, LIM, ARC, PH_CL, MO	$AWC = -4,35 + 0,03 \text{Z} + 5 \cdot 10^{-3} \text{LIM} - 3 \cdot 10^{-3} \text{ARC} + 0,62 \text{PH}_{CL} + 0,12 \text{MO}$
8	Profundidad de toma de muestras	WAM	PWP	FG, DAP, Z, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	$PWP = 0,08 - 1,30 \cdot 10^{-4} \text{FG} + 0,11 \text{DAP} - 6 \cdot 10^{-3} \text{Z} + 1 \cdot 10^{-3} \text{LIM} - 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ARC} + 0,04 \text{PH}_A - 0,03 \text{PH}_{CL} - 3 \cdot 10^{-3} \text{MO}$
9	Profundidad de toma de muestras	PP	PWP	FG, DAP, ARC, LIM, PH_A, PH_CL, MO	$PWP = 0,24 + 2,03 \cdot 10^{-4} \text{FG} + 0,08 \text{DAP} - 2 \cdot 10^{-3} \text{ARC} - 2 \cdot 10^{-3} \text{LIM} - 0,12 \text{PH}_A + 0,11 \text{PH}_{CL} + 0,01 \text{MO}$
10	Profundidad de toma de muestras	PP	FC	ARC, LIM, DAP, PH_A, CO	$FC = -2,79 + 4 \cdot 10^{-3} \text{ARC} + 0,01 \text{LIM} + 0,72 \text{DAP} + 0,33 \text{PH}_A + 0,08 \text{CO}$
11	Profundidad de toma de muestras	WAM-PP	AWC	FG, DAP, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	$AWC = -2,54 + 9 \cdot 10^{-3} \text{FG} + 0,58 \text{DAP} - 2 \cdot 10^{-3} \text{LIM} - 3 \cdot 10^{-3} \text{ARC} + 0,98 \text{PH}_A - 0,65 \text{PH}_{CL} + 0,02 \text{MO}$
12	Tipo de cultivo	PP	PWP	ARE, MO	$PWP = 0,15 - 2 \cdot 10^{-3} \text{ARE} + 7 \cdot 10^{-3} \text{MO}$
13	Tipo de cultivo	WAM	PWP	FG, DAP, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	$PWP = -0,08 - 2 \cdot 10^{-3} \text{FG} + 0,08 \text{DAP} - 1 \cdot 10^{-3} \text{LIM} + 2 \cdot 10^{-3} \text{ARC} + 1 \cdot 10^{-3} \text{PH}_A + 5 \cdot 10^{-3} \text{PH}_{CL} + 5 \cdot 10^{-3} \text{MO}$
14	Tipo de cultivo	PP	AWC	ARC	$AWC = -0,57 + 0,04 \text{ARC}$

WAM: Medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión, ARC: Contenido en arcilla (%), DAP: Densidad a aparente, FF: Fracción fina (%), MO: Materia orgánica (%), CO: Carbono orgánico (%), LIM: Contenido en limo (%), PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en cloruro, PWP: Punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3), FC: Capacidad de campo (cm^3/cm^3), AWC: Reserva de agua útil (cm^3/cm^3).

2.4. Parámetros estimados según metodologías.

Las metodologías empleadas en función del “*hydrolimit*” a determinar son:

- **PWP:** PP, WAM, FTPs Soto *et al.* (2001), FTPs específicas y *SOILPAR* 2.00.
- **FC:** PP, FTPs específicas.
- **AWC:** PP, metodología combinada PP-WAM y FTPs específicas.

3. Resultados y discusión.

3.1. Determinación de los componentes de la eficiencia.

3.1.1. Cálculo del esfuerzo.

Uno de los aspectos a considerar en la determinación de la eficiencia es el esfuerzo invertido en la aplicación de los métodos para la obtención de resultados. Dado que la determinación del mismo es una tarea ardua, se procede a cuantificarlo en función del tiempo empleado. Para ello se consideran los protocolos de medición y/o determinación. Se parte de la premisa de que algunas fases en la determinación son comunes a los diferentes métodos, como por ejemplo la recogida de muestras, secado y tamizado a 2 mm de las mismas y por ello, por no suponer diferencia alguna, estas fases se obvian en el análisis.

3.1.1.1. Medidor de actividad de agua.

La metodología seguida fue la indicada por estudios precedentes de Cancela (2004) (Capítulo VII). El tiempo estimado para la determinación de las lecturas psicrométricas es de 4,5 horas por muestra (Capítulo IX). Considerando que no se pueden simultanear las muestras, en la totalidad del tamaño muestral se invierten **108 horas**⁷⁰.

3.1.1.2. Placa de presión.

El tiempo estimado para la determinación de las lecturas con la PP es de 9 horas por muestra (Capítulo IX). Considerando que se pueden simultanear las muestras y colocar 12 muestras por placa, el tiempo necesario se establece en función del número de placas porosas que se pueden disponer según la propiedad a determinar y la “*olla*” a emplear. Para la FC se pueden disponer dos placas, de modo que la totalidad de las muestras se podrían simultanear. Por el contrario, para el PWP, solamente se puede disponer una placa en el interior del dispositivo, de modo que se realizarían dos tandas (Tabla XII.4).

⁷⁰ No se considera tiempo extra de gabinete en la determinación con WAM por simultanearse con otras operaciones.

Tabla XII.4. “Tiempo necesario en las determinaciones realizadas en la PP”

Propiedad estimada	Tiempo empleado por muestra (h)	Tiempo total (h)⁷¹
<i>PWP</i>	9	216
<i>FC</i>	3	72

PWP: Punto de marchitez permanente, FC: Capacidad de campo.

3.1.1.3. Propiedades de los suelos.

Para las metodologías indirectas se emplean los datos relativos a propiedades descriptivas de los suelos especificadas en la tabla XII.5.

Tabla XII.5. “Tiempo necesario en la determinación de las propiedades descriptivas de los suelos”

PROPIEDAD	MÉTODO	FUENTE	TIEMPO	Nº MUESTRAS	TIEMPO TOTAL MUESTRAS (*)
<i>Textura</i>	Método de la pipeta	MAPA (1995)	6 días	5	(6días/5 muestras)x 24 muestras)x (8 h/día)= 230,4 h ⁷²
<i>Materia orgánica</i>	Método de Sauerlandt modificado	Gutián y Carballás (1976)	2 días	10	(2días/10 muestras) x 24 muestras)x (8 h/día)= 38,4 h
<i>Carbono orgánico</i>	Relacionado con la MO	Relacionado con la MO	2 días	10	(2días/10 muestras) x 24 muestras)x (8 h/día)= 38,4 h
<i>pH</i>	-	-	5 min	1	(5 min/muestra)x (1h/60min)x24 muestras= 2 h
<i>Densidad aparente</i>	Método del United States Department of Agriculture	USDA (2004)	1 h	1	(1h/muestra) x 24 muestras = 24 h
<i>Profundidad radicular</i>	-	-	15 min	1	(15 min/muestra)x (1h/60min)x24 muestras= 6 h

(*) En los cálculos se consideran jornadas de trabajo de 8 horas.

⁷¹ No se considera tiempo extra de gabinete en la determinación de PP por resultar este despreciable.

⁷² A efectos de cálculo, en función del protocolo considerado para el análisis textural (Anexo III), se ha considerado el orden de obtención de las diferentes propiedades, requiriéndose 1/5 del tiempo empleado en caso de la FG y FF, la totalidad del tiempo demandado menos 8 horas para la determinación del ARE y la totalidad del mismo en caso de considerar la ARC y el LIM. En caso de existir en la ecuación alguna de estas dos propiedades se considera el tiempo para el conjunto de propiedades texturales, dado que las restantes han tenido que determinarse anteriormente.

Por ello, el esfuerzo invertido en las diferentes propiedades depende del tiempo empleado en su determinación.

3.1.1.4. SOILPAR 2.00.

Los modelos aplicados mediante *SOILPAR 2.00* son dos: “*EPIC*” y “*Mayr-Jarvis*”. Para ambos modelos es necesario conocer los porcentajes de las fracciones texturales y la DAP, no obstante, para el modelo de “*Mayr-Jarvis*” es necesario conocer además el CO.

Dadas las características de la metodología, para el cálculo del esfuerzo se considera el tiempo empleado en la determinación de las propiedades de los suelos y el tiempo empleado en el manejo propio de los datos con el programa. Dentro de este último aspecto se estima que en la introducción de los datos correspondientes a las 24 muestras en la base de datos se invierten 2 horas. Por tanto, el tiempo empleado en el esfuerzo se detalla en la tabla XII.6.

Tabla XII.6. “Tiempo necesario empleando *SOILPAR 2.00*”

Método empleado en las estimación	Método empleado en la obtención de los datos de partida	Propiedad			<i>SOILPAR 2.00</i> (h)	Tiempo total (h)
		Textura (h)	DAP (h)	CO (h)		
<i>Epic</i>	PP	230,40	24,00	-	2,00	256,40
<i>Mayr-Jarvis</i>	WAM	230,40	24,00	38,40	2,00	294,80

WAM: Medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión; DAP: Densidad aparente, CO: Carbono orgánico (%).

3.1.1.5. Funciones de pedotransferencia.

La tabla XII.7 recoge los tiempos empleados en cada una de las PTFs consideradas.

Tabla XII.7. “Tiempo necesario empleando PTFs”

Nº	Propiedad estimada	Propiedades predictoras ⁷³	Tiempo empleado en SPSS (h)	Tiempo empleado en la obtención de las propiedades de partida (h)	Tiempo Total (h)
1	PWP	ARC	-	230,40	230,40
2	PWP	ARC, DAP, FF, MO	2,00	292,80	294,80

(Continúa)

ARC: Contenido en arcilla (%), DAP: Densidad aparente, FF: Fracción fina (%), MO: Materia orgánica (%), PWP: Punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3).

⁷³ En la cuantificación del tiempo se consideran las características del protocolo de determinación empleado (Anexo III).

Tabla XII.7. (Continúa)

Nº	Propiedad estimada	Propiedades predictoras	Tiempo empleado en SPSS (h)	Tiempo empleado en la obtención de las propiedades de partida (h)	Tiempo Total (h)
3	PWP	ARC, CO, DAP, LIM, FF	2,00	292,80	294,80
4	PWP	FF, DA, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO, Z	2,00	302,80	304,80
5	PWP	Z, LIM, ARC, PH_CL, MO	2,00	276,80	278,80
6	FC	DAP, ARC, LIM, PH_W, MO	2,00	294,80	296,80
7	AWC	Z, LIM, ARC, PH_CL, MO	2,00	276,80	278,80
8	PWP	FG, DAP, Z, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	2,00	302,80	304,80
9	PWP	FG, DAP, ARC, LIM, PH_A, PH_CL, MO	2,00	296,80	298,80
10	FC	ARC, LIM, DAP, PH_A, CO	2,00	294,80	296,80
11	AWC	FG, DAP, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	2,00	296,80	298,80
12	PWP	ARE, MO	2,00	260,80	262,80
		FG,	2,00	296,80	298,80
13	PWP	DAP, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO			
14	AWC	ARC	2,00	230,40	232,40

ARC: Contenido en arcilla (%), ARE: contenido en arena (%), DAP: Densidad aparente, FF: Fracción fina (%), MO: Materia orgánica (%), CO: Carbono orgánico (%), LIM: Contenido en limo (%), PH_A: pH en agua, PH_CL: pH en cloruro, Z: Profundidad radicular (cm), PWP: Punto de marchitez permanente (cm³/cm³), FC: Capacidad de campo (cm³/cm³), AWC: Reserva de agua útil (cm³/cm³).

Los tiempos se estiman a través los requerimientos en la obtención de las propiedades necesarias y en el manejo e introducción de datos en el paquete estadístico SPSS, que permitió la obtención de las mismas por regresión lineal. El tiempo de introducción de datos y obtención de FTPs se estima en 2 horas para las 24 muestras.

3.1.2. Análisis del esfuerzo.

Aunque el tiempo invertido en la obtención del PWP es variable en función del método considerado (Figura XII.1), las metodologías que más esfuerzo demandan se corresponden con los métodos predictivos, presentando un máximo la PTF 8 con 304,80 horas. No se aprecia una gran variación entre este tipo de metodología y la aplicación de *SOILPAR*, bien sea a través del modelo de “*Mayr-Jarvis*”, con 294,80 horas o el de “*EPIC*” invirtiendo 256,40 horas, este último mejorado con la propuesta de Soto *et al.* (2001), la PTF 1, con 230,40 horas.

Dentro de los métodos indirectos, es de destacar el escaso esfuerzo en términos de tiempo asociado al WAM con 108 horas, la mitad que la PP 1. La media del esfuerzo de las diferentes metodologías se cifra en 264,92 horas.

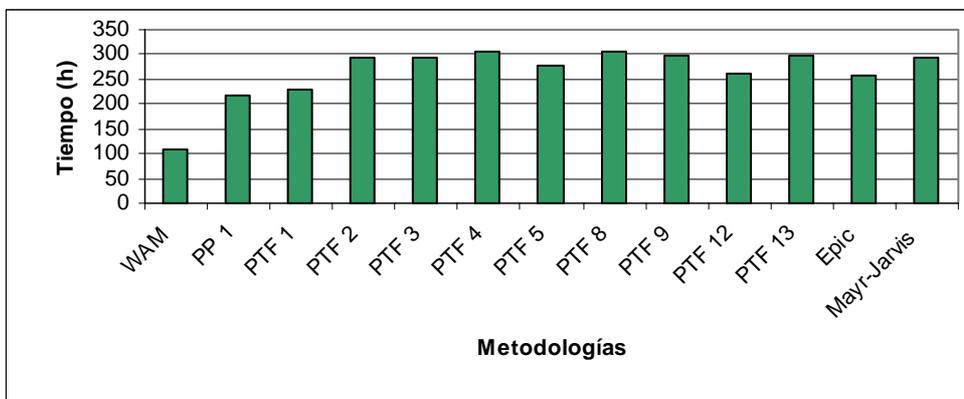


Figura XII.1. “Análisis del esfuerzo demandado para la obtención del PWP en función de las diferentes metodologías empleadas”

En caso de considerar la FC, las opciones son más reducidas, dado que solamente se pueden emplear dos de los métodos propuestos: como método indirecto la PP 2 y dos posibilidades dentro de las metodologías estimativas basado en las PTFs (Fig. XII.2).

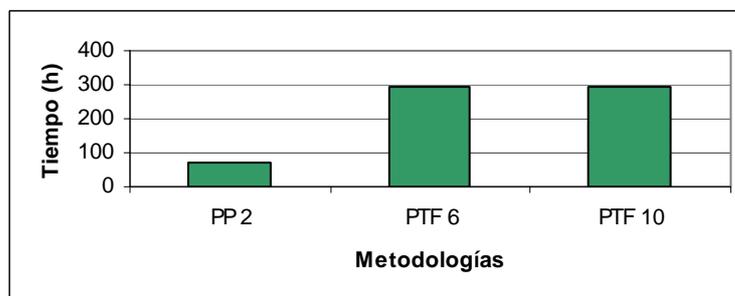


Figura XII.2. “Análisis del esfuerzo demandado para la obtención de la FC en función de las diferentes metodologías empleadas”

El menor tiempo invertido, 72 horas, se corresponde con la obtención indirecta de la FC. En caso de la estimación mediante PTFs, tanto la PTF 6 como la PTF 10 aportan el valor máximo de tiempo invertido, 296,8 horas, dado que aunque no presenten las mismas propiedades en su ecuación, las necesidades de tiempo son parejas. Se trata en ambos casos de ecuaciones específicas para la zona de estudio.

En la determinación de la AWC (Fig. XII.3) se invierten como media 255,20 horas. La PTF 11 es el método que más tiempo demanda, dentro de los tres posibles predictivos, necesitando 298,80 horas. En caso de emplear la PP 3 dentro de las metodologías indirectas, se demanda un esfuerzo de 288 horas lo cual se ve notablemente reducido si la PP se emplea solamente para la determinación de la FC y se emplea el WAM para determinar el PWP, es decir, si se emplea la metodología combinada PP-WAM, reduciéndose el tiempo en 108 horas. Dentro de las PTF, cuantas menos propiedades demanden, menor tiempo se invierte, obteniéndose el mínimo en este caso de 230,40 horas empleando la PTF 14.

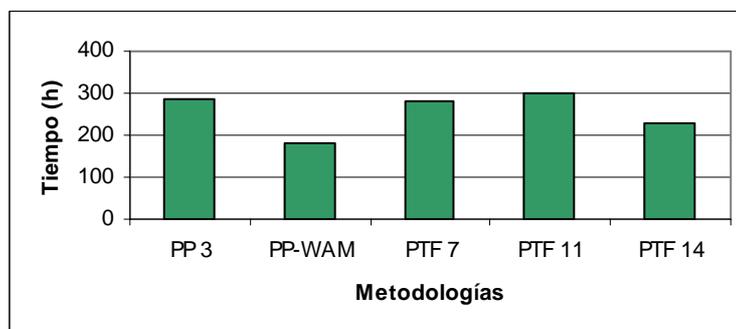


Figura XII.3. “Análisis del esfuerzo demandado para la obtención de la AWC en función de las diferentes metodologías empleadas”

3.1.3. Cálculo y análisis del coste en función del coste del operario y de los análisis.

Los costes se han estimado en función de las operaciones que son requeridas en cada una de las metodologías y considerando dos posibles casos: en función del coste de un operario contratado para tal efecto y en función del coste de los análisis, indicado por laboratorios próximos a la zona de estudio (análisis externos). A continuación se detallan los aspectos de los cálculos relativos a las 24 muestras consideradas en el estudio.

Tomando como referencia el sueldo establecido para un Ayudante de investigación, según la USC⁷⁴ (944,48 €/mes) y considerando que son contratos de 37,5 h/semana, se estima el coste en **6,30 €/h**. Por tanto, el coste en el que se incurre en los diferentes métodos empleando a un operario se detalla en la tabla XII.8

⁷⁴ <https://www1.usc.es/persoal/ret.htm>

Según el segundo criterio considerado, se ha tomado como referencia el coste de los análisis facilitado por el “Centro de investigaciones agrarias de Mabegondo”, del año 1997 y actualizados al año 2007. Hay que considerar que en el caso de las determinaciones indirectas, con los métodos de la PP y del WAM, así como la determinación de la DAP y la Z, la única forma de poder realizarse sería mediante la contratación de un operario, de ahí que el coste se considere el mismo que el apartado anterior (Tabla XII.8).

Tabla XII.8. “Coste de los métodos considerando la realización externa de los análisis de las muestras”

Método	Propiedad estimada	Nº PTF	Propiedades requeridas	Tiempo total (h)	Coste operario (€)	Coste análisis (€) ⁷⁵
WAM	PWP	-	-	108,00	680,04	680,04
PP 1	PWP	-	-	216,00	1360,80	1360,80
PP 2	FC	-	-	72,00	453,60	453,60
PP 3	AWC	-	-	288,00	1814,40	1814,40
PP-WAM	AWC	-	-	180,00	1134,00	1134,00
PTFs	PWP	1	ARC	230,4	1451,52	343,44
PTFs	PWP	2	ARC, DAP, FF, MO	294,8	1857,24	2075,76
PTFs	PWP	3	ARC, CO, DAP, LIM, FF	294,8	1857,24	2075,76
PTFs	PWP	4	FF, DA, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO, Z	304,8	1920,24	3958,2
PTFs	PWP	5	Z, LIM, ARC, PH_CL, MO	278,8	1756,44	2752,92
PTFs	FC	6	DAP, ARC, LIM, PH_W, MO	296,8	1869,84	2866,32
PTFs	AWC	7	Z, LIM, ARC, PH_CL, MO	278,8	1756,44	3016,44
PTFs	PWP	8	FG, DAP, Z, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	304,8	1920,24	3958,2
PTFs	PWP	9	FG, DAP, ARC, LIM, PH_A, PH_CL, MO	298,8	1882,44	3920,4
PTFs	FC	10	ARC, LIM, DAP, PH_A, CO	296,8	1869,84	2866,32
PTFs	AWC	11	FG, DAP, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	298,8	1882,44	3920,4
PTFs	PWP	12	ARE, MO	262,8	1655,64	1924,56
PTFs	PWP	13	FG, DAP, LIM, ARC, PH_A, PH_CL, MO	298,8	1882,44	3920,4
PTFs	AWC	14	ARC	232,4	1451,52	343,44
Epic ⁷⁶	PWP	-	TEXTURA, DAP	256,40	1615,32	507,24
Mayr-Jarvis ⁷⁷	PWP	-	TEXTURA, DAP, CO	294,80	1857,24	2088,36

WAM: Medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión, ARC: Contenido en arcilla (%), DAP: Densidad aparente, FF: Fracción fina (%), MO: Materia orgánica (%), CO: Carbono orgánico (%), LIM: Contenido en limo (%), PH_A: pH en agua, PWP: Punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3), FC: Capacidad de campo (cm^3/cm^3), AWC: Reserva de agua útil (cm^3/cm^3), PTFs: Funciones de pedotransferencia.

⁷⁵ El coste considerado para el análisis textural es global, para las cinco propiedades.

⁷⁶ Los datos empleados para la estimación proceden de la placa de presión de Richards (PP).

⁷⁷ Los datos empleados para la estimación proceden del medidor de la actividad de agua (WAM).

En el caso de la estimación indirecta mediante *SOILPAR* 2.00, se considerará el coste de los análisis de las propiedades demandadas conjuntamente con el coste del operario relativo al tiempo empleado en el manejo del programa.

Si se comparan los tipos de costes considerados (Fig. XII.4), en los métodos indirectos ambos costes están equiparados, por tratarse de la contratación de un operario la única forma de poder ser realizados. No obstante, destacar la menor inversión realizada con el WAM respecto a la PP, independientemente del tipo de coste. Considerando la estimación, destaca la aplicación del *SOILPAR* y la PTF 1 por ser las únicas casuísticas en las que resultaría más económica la realización externa de los análisis. En este sentido, los menores costes se presentan con la aplicación de la PTF de Soto *et al.* (2001) con 343,44 € como pago de los análisis (mínimo de la totalidad de los métodos) y 1451,52 € si se realizan por contratación. El máximo considerando las diferentes metodologías se obtiene en la PTF 8, 3958,20 € La media de estos costes se cifra en 2157,56 € para pago externo y 1668,99 € mediante operario.

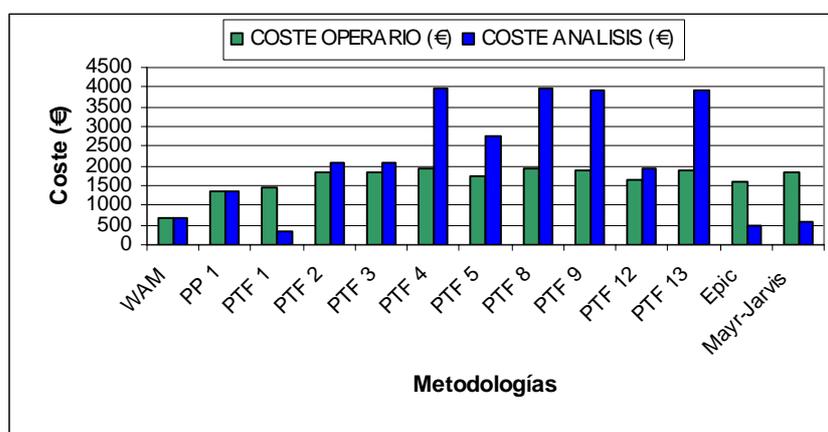


Figura XII.4. “Análisis de los costes demandados para la obtención del PWP en función de las diferentes metodologías empleadas”

En la determinación de la FC (Fig. XII.5), el menor coste invertido se obtiene empleando la PP, siendo un método en el que ambos costes vendrían determinados por la contratación de un operario, de modo que la inversión a realizar sería de 453,60 €. En los restantes métodos, la inversión es siempre mayor si se recurre a análisis externos, resultando ambos métodos parejos en cuanto a resultados con 1869,84 € si se recurre a un operario y 2866,32 € en la otra casuística. El coste medio es de 1397,76 € frente a los 2062,08 € de los análisis externos.

Si se considera la AWC (Fig. XII.6), solamente en un caso se aplica un mayor coste en su determinación en caso de emplear un operario, la PTF 14, con una diferencia de 1108,80 € representando el mínimo de los análisis (343,44 €). Tanto la PTF 7 como la PTF 11, son ecuaciones muy específicas de modo que los análisis externos resultan más costosos. La mínima inversión se realiza, con operario, con la metodología combinada PP-WAM, cifrándose en 1134,00 €. El coste medio de los análisis se cifra en 2045,74 € y 1607,76 €, este último, con operario.

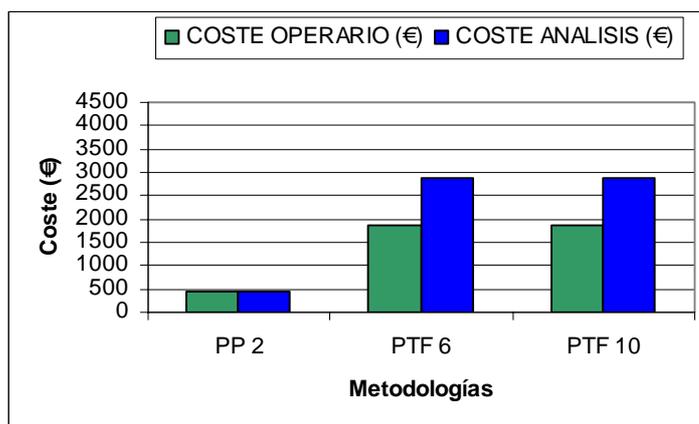


Figura XII.5. “Análisis de los costes demandados para la obtención de la FC en función de las diferentes metodologías empleadas”

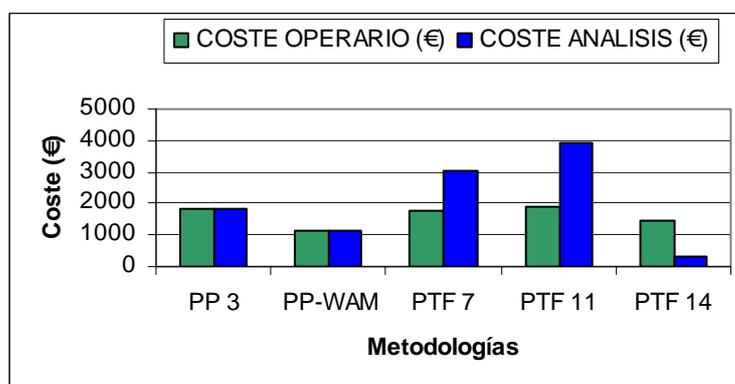


Figura XII.6. “Análisis de los costes demandados para la obtención de la AWC en función de las diferentes metodologías empleadas”

3.1.4. Cálculo y análisis de la calidad de la información.

La calidad de la información viene determinada por la desviación típica de las propiedades que se predicen como resultado de la incertidumbre en las mediciones. Los resultados se recogen en la tabla XII.9.

Es de destacar que tanto la máxima como la mínima desviación típica en las estimaciones del PWP se obtiene con la aplicación de *SOILPAR*, método de “*Mayr-Jarvis*” (Fig. XII.7), con $0,014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y método de “*EPIC*” con $0,143 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Dentro de los métodos indirectos se obtiene una desviación inferior en el WAM respecto a la PP, con $0,031$ y $0,053 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectivamente. Si se consideran las PTFs, la PTF 5 destaca con una calidad de información inferior a las restantes, $0,081 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y la PTF 12, por resultar la que menor desviación presenta, $0,020 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. La incertidumbre media de la totalidad de las metodologías apreciada es de $0,050 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Tabla XII.9. “Calidad de la información en función de las diferentes metodologías”

Método	Propiedad estimada	Nº PTF	Desviación típica (cm ³ /cm ³)
WAM	PWP	-	0,031
PP1	PWP	-	0,053
PP 2	FC	-	0,210
PP 3	AWC	-	0,203
PP-WAM	AWC	-	0,205
PTFs	PWP	1	0,033
PTFs	PWP	2	0,029
PTFs	PWP	3	0,051
PTFs	PWP	4	0,028
PTFs	PWP	5	0,081
PTFs	FC	6	0,397
PTFs	AWC	7	0,496
PTFs	PWP	8	0,042
PTFs	PWP	9	0,041
PTFs	FC	10	0,239
PTFs	AWC	11	0,230
PTFs	PWP	12	0,020
PTFs	PWP	13	0,033
PTFs	AWC	14	0,350
Epic ⁷⁸	PWP	-	0,143
Mayr-Jarvis ⁷⁹	PWP	-	0,014

WAM: Medidor de actividad de agua, PP: Placa de presión, PWP: Punto de marchitez permanente, FC: Capacidad de campo, AWC: Reserva de agua útil, PTFs: Funciones de pedotransferencia.

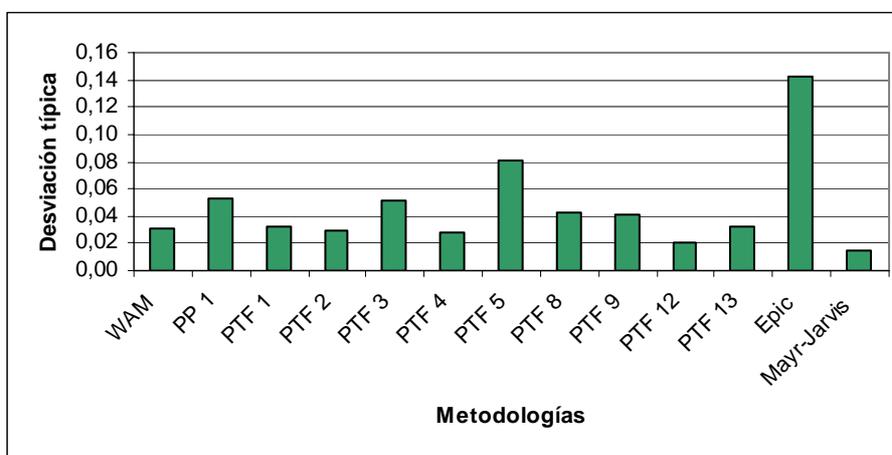


Figura XII.7. “Análisis de la calidad de la información en la obtención del PWP en función de las diferentes metodologías”

La mayor calidad de información es aportada por el método de la PP para la obtención de la FC (Fig. XII.8), en cuyo caso la desviación típica es de 0,210 cm³/cm³. La

⁷⁸ Los datos empleados para la estimación proceden de la placa de presión de Richards (PP).

⁷⁹ Los datos empleados para la estimación proceden del medidor de la actividad de agua (WAM).

desviación media es de $0,282 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, resultando un máximo de $0,397 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, correspondiente a la PTF 6.

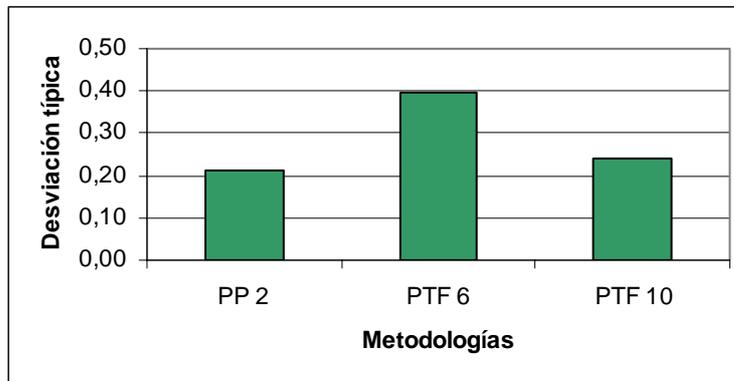


Figura XII.8. “Análisis de la calidad de la información en la obtención de la FC en función de las diferentes metodologías”

Nuevamente se obtiene la menor desviación típica en el método de la PP, $0,203 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, prácticamente igual a la aportada por la metodología PP-WAM, $0,205 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. La desviación media se cifra en $0,297 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y la máxima en $0,496 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, presentada por la PTF 7 (Fig. XII.9), para el cálculo de la AWC.

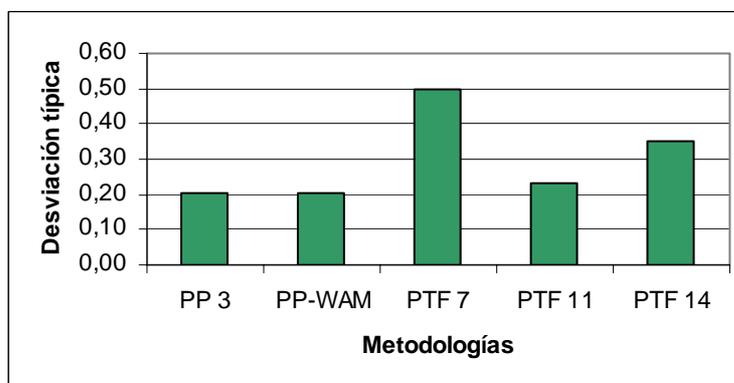


Figura XII.9. “Análisis de la calidad de la información en la obtención de la AWC en función de las diferentes metodologías”

3.2. Cálculo y análisis de la eficiencia.

Calculados los distintos elementos que caracterizan a la eficiencia, analizada esta tanto en términos de esfuerzo como de coste, aplicando los índices propuestos por Minasny (2000), se procede a su cálculo (Ecs. XII.1 y XII.2). Los resultados se desglosan en función de la propiedad estimada.

Si se analiza la eficiencia de los métodos respecto al PWP (Fig. XII.10) el método menos eficiente se corresponde a la aplicación de *SOILPAR*, con el método de “*Mayr-Jarvis*”, considerando el esfuerzo demandado y el coste del operario, y la PTF 4 en función de los análisis. La eficiencia máxima en términos tanto de esfuerzo y costes derivados de un operario y de los análisis se presenta igualmente con la aplicación de *SOILPAR*, concretamente con el modelo de “*EPIC*”. Es de destacar la importancia que tiene en la eficiencia el factor de esfuerzo, es decir, el número de horas demandadas por cada método, obteniéndose eficiencias bastante elevadas. Destacar la relevancia que adquiere el WAM frente a la PP en los tres aspectos considerados.

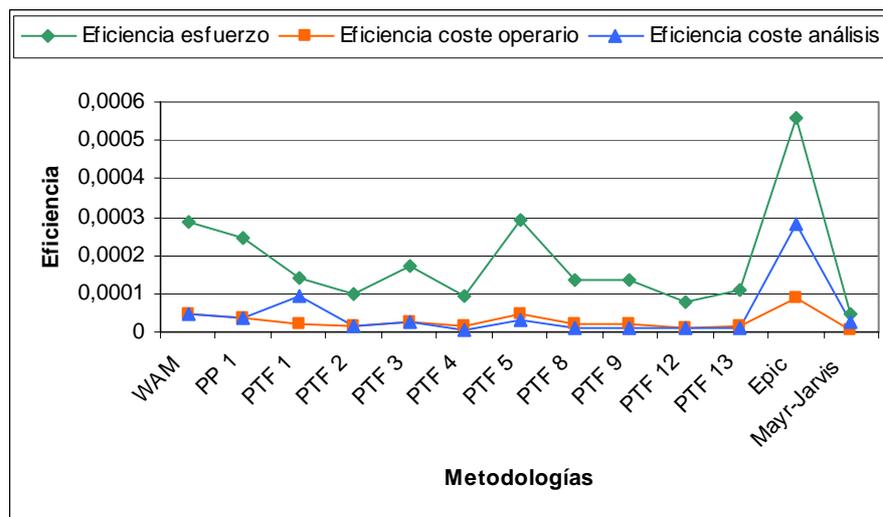


Figura XII.10. “Eficiencias en la determinación del PWP según metodologías”

Respecto a la FC, las opciones son mas reducidas, no obstante, se observa una clara diferencia entre la máxima eficiencia alcanzada por la PTF 6 frente a la PTF 10, especialmente en términos de esfuerzo. No obstante, se trata de un método que si bien no destaca frente a PTF 10 en tiempo invertido, siendo el mismo, presenta la desviación típica mayor y por tanto no es el que mejor calidad de información ofrece en las estimaciones realizadas. Importante, igualmente, la eficiencia presentada por la PP, máxima en las tres casuísticas, máxime siendo el método que presenta menor desviación típica (Fig. XII.11).

Si finalmente se analiza la eficiencia en la determinación de la AWC (Fig. XII.12), se presenta un método que destaca según dos de los tres criterios considerados, coste operario y esfuerzo, la PTF 7. Por el contrario, si se considera el coste de los análisis destaca la PTF 14, metodología de las mas sencillas presentadas [conjuntamente con la de Soto *et al.* (2001), la PTF 1] en cuanto a requerimientos, basada exclusivamente en el contenido de arcilla (ARC).

Tras el análisis presentado de las eficiencias de cada uno de los métodos se puede afirmar que la eficiencia, si bien se trata de un índice indicativo, no es un índice definitorio de un método, debiéndose tratar con precaución o analizar los criterios considerados en su determinación, ya que no necesariamente una mayor eficiencia implica un coste reducido y una desviación típica y un tiempo invertido mínimos. Por ello a continuación se procede a

evaluar dos a dos las distintas variables implicadas en el proceso considerando la totalidad de los métodos.

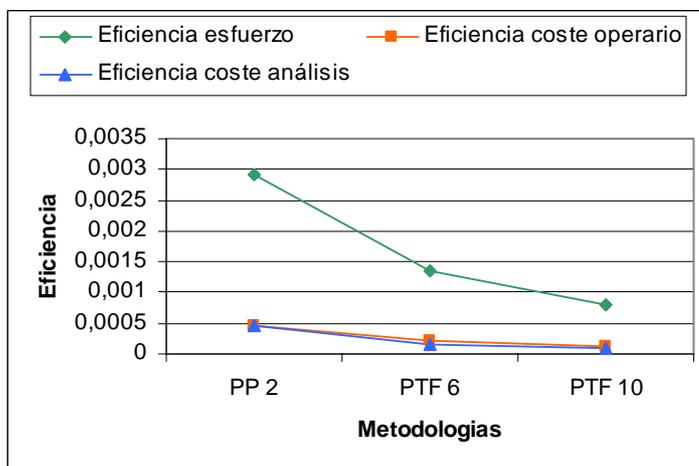


Figura XII.11. “Eficiencias en la determinación de la FC según metodologías”

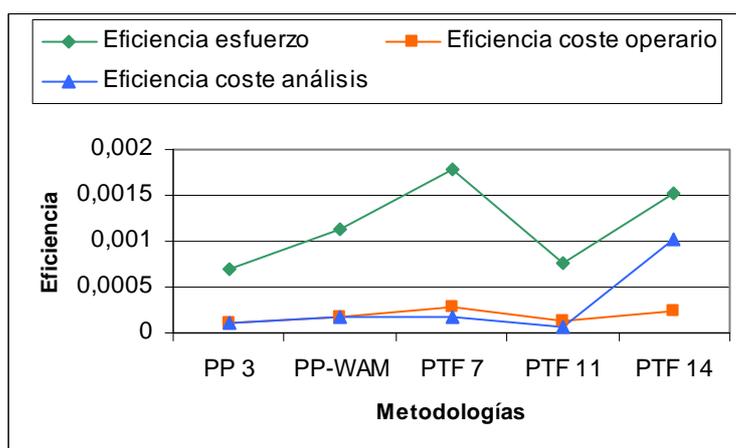


Figura XII.12. “Eficiencias en la determinación de la AWC según metodologías”

Minasny (2000), Minasny y McBratney (2002) y Rubio (2005) en su análisis aplicado sobre otros métodos observan que, en general, a medida que disminuye la incertidumbre aumenta el esfuerzo demandado, ocasionando dicho aumento que también se incrementen los costes a incurrir. Esta investigación no concuerda con los resultados obtenidos por estos autores, de forma que si bien al aumentar el tiempo demandado por los diferentes métodos, aumenta el coste del operario, no se observa relación existente entre el esfuerzo y la calidad de información, de modo que a mayor tiempo invertido, no necesariamente se tienen que obtener mejores resultados en la estimación/predicción. Igualmente al intentar relacionar el coste de los análisis con la calidad de la información obtenida, los resultados son igualmente infructuosos (Fig. XII.13).

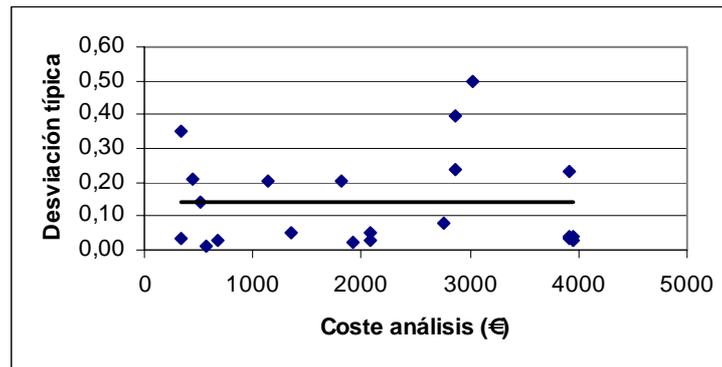


Figura XII.13. “Comparación de la desviación típica vs. coste análisis para la totalidad de los métodos y las tres propiedades consideradas”

Contrariamente, si se representa el tiempo requerido vs. coste de los análisis en el caso de estimar el PWP y para las metodologías predictivas, a mayor tiempo invertido se asocia un mayor coste de los análisis. (Fig. XII.14). Si se considera la AWC, para la totalidad de los métodos considerados se observa igualmente la relación existente entre ambos parámetros. (Fig. XII.15).

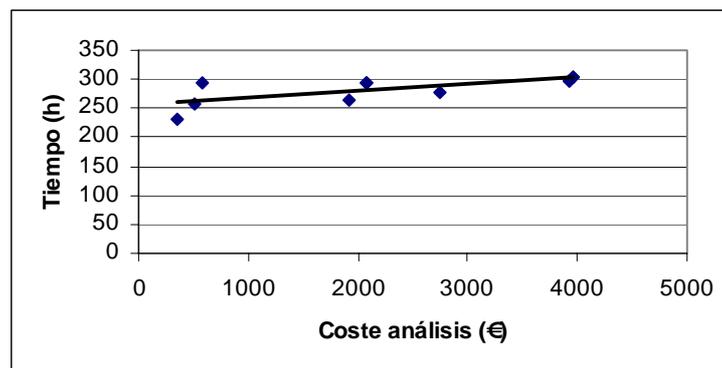


Figura XII.14. “Comparación del tiempo invertido vs. coste análisis para los métodos predictivos en la obtención del PWP”

Si el coste considerado se deriva del operario, la relación con el tiempo resulta obvia, dado que los costes se derivan directamente del tiempo invertido en la ejecución de los mismos, para la totalidad de los métodos.

El hecho de que los resultados no resulten concluyentes en algunas casuísticas para los diferentes métodos y propiedades estimadas, se debe en gran medida a lo innovador del estudio, hasta el momento relegado en otras investigaciones a la comparación de metodologías de características semejantes. La heterogeneidad existente dentro de los métodos indirectos como predictivos, como de ambos entre sí, dificulta notablemente su análisis.

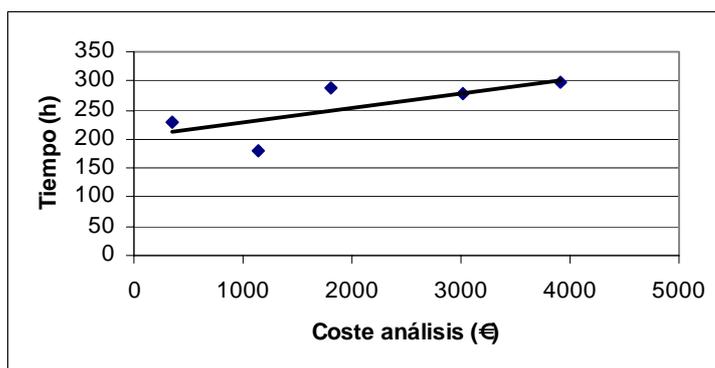


Figura XII.15. “Comparación del tiempo invertido vs. coste análisis para la totalidad de los métodos en la obtención de la AWC”

Definida la relación existente entre el esfuerzo respecto a los costes de forma clara, se considera como variable determinante el tiempo. Los análisis realizados hasta el momento se basan en la obtención de los diferentes métodos, no obstante parece indicado analizar también su aplicación. Para ello se recurre a una adaptación del índice propuesto por Rubio (2005), permitiendo determinar la influencia que sobre el elemento “tiempo” tiene el número de muestras a las que se apliquen las metodologías una vez han sido formuladas.

Para facilitar el análisis se consideran tres casos respecto al tamaño muestral al que aplicar la metodología: 5, 50 y 100 muestras (Fig. XII.16).

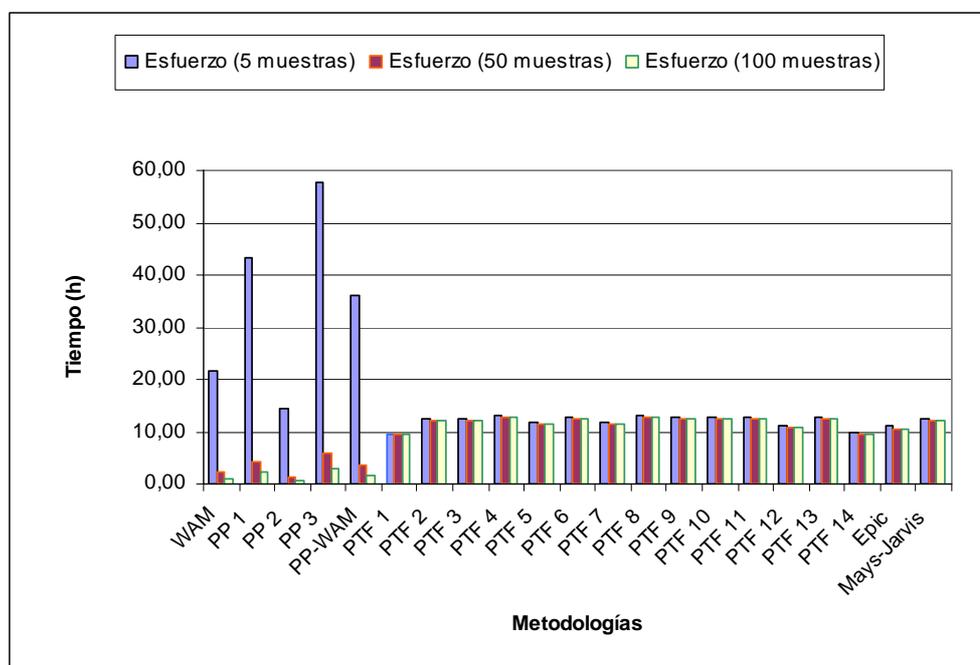


Figura XII.16. “Influencia del tamaño muestral en la aplicación sobre el esfuerzo según métodos⁸⁰”

⁸⁰ PP1: Placa de presión aplicada a la determinación del PWP, PP2: Placa de presión aplicada a la determinación a la FC, PP3: Placa de presión aplicada a la determinación de la AWC.

A medida que el tamaño muestral al que se aplique el método aumente, disminuye el esfuerzo demandado. Debido a que en el caso de los métodos indirectos no se ocasiona esfuerzo causado por la estimación de propiedades características de los suelos (ARE, LIM...), no se producen esfuerzos específicos, siendo todos fijos. Por ello que, siendo los esfuerzos específicos los que más tiempo demandan, el aumento del tamaño muestral provoca una disminución como máximo de 54,72 horas en los métodos indirectos, concretamente en la PP. Por el contrario, en los métodos predictivos, se cifra la disminución en 22,8 minutos.

4. Conclusiones.

La elección de una metodología u otra para la estimación y /o determinación de los “*hydrolimits*”, considerando estos como PWP, la FC y, por extensión, la AWC, se presenta como una tarea ardua y difícil. Para ello se debe seguir un análisis multicriterio en el que se consideren características tales como la incertidumbre obtenida en las determinaciones, el esfuerzo requerido, personal necesario y coste. Todos estos criterios se encuentran reunidos en los índices de Minasny (2000) a través del cálculo de dos tipos de eficiencia, en términos de esfuerzo y en términos de coste.

Si bien la investigación ha resultado concluyente, los resultados obtenidos han sido un tanto dispares en función del elemento caracterizado. Para la obtención del PWP, se recomienda el WAM en dos de los aspectos considerados, esfuerzo demandado y coste del operario, mientras que si se consideran los costes derivados de los análisis el método que se presenta como idóneo es la PTF 1 y en términos de calidad el *SOILPAR* a través del modelo de “*Mayr-Jarvis*”. El otro método indirecto, la PP, se recomienda en los tres aspectos, en caso de determinar la FC, lo mismo sucede con la metodología combinada PP-WAM para la AWC, salvo en caso de considerar costes derivados de los análisis, en cuyo caso se recomienda la PTF 14. Resultados parejos en relación a la calidad de información presenta la PP.

Importante destacar la relación de los resultados obtenidos con los métodos indirectos, la PP y el WAM, los cuales concuerdan con los aportados hasta el momento en los diferentes capítulos, estableciéndose el WAM como método preferente en la determinación del PWP, la PP si se determina la FC y por último muy parejos, la aplicación de la PP y la metodología WAM-PP para la determinación de la AWC.

Se observa un aumento del coste del operario al aumentar el esfuerzo invertido, al igual que en el caso del coste de los análisis y los métodos predictivos para el PWP y la totalidad de los mismos en caso de tratarse de la AWC. No obstante, no se puede concluir la relación existente entre la incertidumbre asociada a las determinaciones y el coste ocasionado o el esfuerzo demandado. Destacar igualmente, la importancia que sobre la totalidad de los análisis realizados y resultados obtenidos presenta una de las propiedades texturales, la ARC, al igual que sucede con el tamaño muestral considerado, especialmente en los métodos indirectos.

A tenor de los resultados, se recomienda la no globalización de un análisis en unos índices que definan y caractericen los distintos métodos, dado que en el resultado final de

la relación entre los distintos factores a considerar pueden quedar ocultas determinadas características no deseadas en el método elegido y características muy reseñables en un método descartado. Estos índices se deben tomar como indicativos, en ningún caso como definitorios. Por tanto, se recomienda fundamentar la elección de una metodología u otra en un análisis global, considerando conjuntamente los distintos aspectos definitorios del método, a la vez que se analicen estos independientemente unos de los otros a fin de no interferir entre sí en los resultados aportados sobre la idoneidad de la elección. Intentar determinar un solo método apropiado de acuerdo a todos los factores considerados, ha sido imposible en este caso, exponiéndose criterios tanto favorables como desfavorables de cada uno de ellos. En este punto, la elección de una u otra metodología dependerá de las características demandadas tanto por las condiciones de manejo, como por la zona de estudio, y como no, por el investigador y/o usuario.

5. Referencias bibliográficas.

Acutis, M.; Donatelli, M. 2003. *SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. European Journal of Agronomy. 18: 373-377.*

Álvarez, C.J.; Cancela, J.J.; Fandiño, M. 2005. Characterization of irrigated holdings in the Terra Chá region of Spain: a first step towards a water management model. *Water Resources Management. 19 (1): 23-36.*

Cancela, J.J. 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo.

Cancela, J.; Neira, X; Cuesta, T.; Alvarez, C.; Crecente, R. 2004. Socio-Economic Evaluation of the Terra Cha Irrigators Community by using a Geographic Information System - Spain. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript LW 04 003. July, 2004.*

Castelao, A.M.; Díaz-Fierros, F. 1992. Os solos da Terra Chá. Tipos, xénese e aproveitamento. Servicio de Publicacións da Deputación Provincial de Lugo. Lugo.

Cresswell, H. P.; Coquet, Y.; Bruand, A.; McKenzie, N.J. 2006. The transferability of Australian pedotransfer functions for predicting water retention characteristics of French soils. *Soil Use and Management. 22: 62-70.*

Christiaens, K.; Reyen, J. 2001. Analysis of uncertainties associated with different methods to determine soil hydraulic properties and their propagation in the distributed hydrological MIKE SHE model. *Journal of Hydrology. 246: 63-81.*

Donatelli, M.; Acutis, M. 1996. Evaluation of methods to estimate soil water content at field capacity and wilting point. 4th ESA Congress, 1996, The Netherlands.

- Gee, G.W.; Campbell, M.D.; Campbell, G.S.; Campbell, J.H.** 1992. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. *Soil Science Society of America Journal*. **56** (4): 1068-1070.
- Gutián, F.; Carballás, T.** 1976. Técnicas de análisis de suelos. Pico Sacro. Santiago de Compostela, España.
- MAPA.** 1995. Métodos oficiales de análisis de suelos y agua de riego. MAPA. Madrid, España.
- Marion, J.M.; Or, D.; Rolston, D.E.; Kavvas, M.L.; Biggar, J.W.** 1994. Evaluation of methods for determining soil-water retentivity and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science*. **158** (1): 1-13.
- McBratney, A.B.; Minasny, B.; Cattle, S.R.; Vervoort, R.W.** 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. **109**: 41-73.
- Minasny, B.** 2000. Efficient methods for predicting soil hydraulic properties. Doctoral Thesis. Department of Agricultural Chemistry and Soil Science. The University of Sydney. New South Wales. Australia.
- Minasny, B.; McBratney, A.B.** 2002. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. *Geoderma*. **107**: 55-70.
- Minasny, B.; McBratney, A.B.; Bristow, K.L.** 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*. **93**: 225-253.
- Minasny, B.; McBratney, A.B.; Mendonça-Santos, M. de L.; Gonçalves dos Santos, H.** 2003. Revisão sobre funções de pedotransferência (FPTs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos – CNPS, Rio de Janeiro, Brasil.
- Mullins, C.E.** 2001. Matric potential. En: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (2nd Edn). (Smith, K.A.; Mullins, C., eds). Marcel Dekker, New York, USA. pp: 65-93.
- Orfanus, T.; Mikulec, V.** 2005. Regionalization of potential water storage capacity of agricultural landscape-a quantification of soil accumulation function. *Geophysical Research Abstracts*. **7**.
- Rajkai, K.; Kabos, S.; van Genuchten, M.T.** 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil & Tillage Research*. **79**: 145-152.
- Richards, L.A., Fireman, M.** 1943. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science*. **56**: 395-404.

- Rodrigues, O.; Didonet, A.D.; Roman, E.S.** 2003. Avaliação do potencial hídrico foliar em plantas de trigo. *Embrapa Trigo. Circular Técnica Online*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **15**. Disponible en: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ci/p_ci15.htm
- Rodríguez, A.** 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Universidad de Santiago de Compostela. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Lugo.
- Rubio, C.** 2005. Hidrodinámica de los suelos de un área de montaña media mediterránea sometida a cambios de uso y cubierta. Tesis Doctoral. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera". Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España.
- Rubio, C.M.; Llorens, P.; Gallart, F.** 2008. Uncertainty and efficiency of pedotransfer functions for estimating water retention characteristics of soils. *European Journal of Soil Science*. **59**: 339-347.
- Soto, B.; Arias, M.; Diaz-Fierros, F.** 2001. Desarrollo de una función de pedotransferencia para los suelos de Galicia (NW Spain). *Agrochimica*. **XLV** (5-6): 178-188.
- Štekauerová, V.; Skalová, J.; Šútor, J.** 2002. Using of pedotransfer functions for assessment of hydrolimits. *Rostlinná Výroba*. **48**: 407-412.
- Tomasella, J.; Pachepsky, Ya.; Crestana, S.; Rawls, W.J.** 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*. **67**: 1085-1092.
- Turner, N.C.; Shackel, K.A.; Le Coultre, I.F.** 2000. Leaf-cutter psychrometers. *Agronomy Journal*. **92**: 538-541.
- USDA.** 2004. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Disponible: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>. Fecha de consulta: 25/02/2004.
- Vereecken, H.** 1988. Pedotransfer functions for the generation of hydraulic properties for belgian soils. Doctoral Thesis. Katholieke Universiteit te Leuven. Faculteit de Landbouwwetenschappen. Dissertations de Agricultura.
- Vereecken, H., Diels, J.; Van Orshoven, J.; Feyen, J.; Bouma, J.** 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 1371-1378.
- Wang, F.; Fraisse, C.W.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.** 2003. Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri clypan soils. *Agricultural Systems*. **76**: 985-1005.

Wösten, J.H.M.; Finke, P.A.; Cansen, M.J.W. 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*. **66**: 227-237.

Referencias páginas web.

http://www.fceia.unr.edu.ar/labinfo/facultad/decanato/secretarias/desarr_institucional/acreditacion_carreras_ingenieria/acreditacion_archivos_pdf/a_Definicion_Beno_Sander.pdf Definición eficiencia. Fecha de consulta: 22/8/2006.

<https://www1.usc.es/persoal/ret.htm> Servicio de Xestión de Persoal. Tabla de retribución. Fecha de consulta: 25/11/2007.

IV

CONCLUSIONES GENERALES

SECCIÓN

CAPÍTULO XIII

CONCLUSIONES GENERALES

“Es el terreno de la Ciencia hablar y privilegio de la sabiduría escuchar”
Oliver Wendell Holmes (1809-1894). Médico, escritor y poeta estadounidense.

ÍNDICE

1. Conclusiones científicas	385
1.1. Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica	385
1.2. Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua	385
1.3. Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua	386
1.4. Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelo: estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” en el NO de España	387
1.5. Eficiencia en la estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” con diferentes metodologías	388
2. Conclusiones personales.....	389

El estudio pormenorizado del funcionamiento de un medidor de actividad de agua (*water activity meter*) (WAM) ha resultado definitorio para la determinación de las propiedades hídricas de la zona de estudio analizada.

Las conclusiones científicas alcanzadas a través de esta investigación se presentan, a continuación, en función de los diferentes capítulos. Al final del capítulo se incluyen brevemente conclusiones personales de la autora derivadas de la experiencia durante el estudio.

1. Conclusiones científicas.

1.1. Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica.

- ✓ La Psicrometría se presenta como medio definitorio del potencial de agua en el ámbito agrícola y forestal, en medios diversos, especialmente en plantas y en menor escala en suelos, alcanzando un gran desarrollo en el sistema suelo-planta-atmósfera. La inexistencia de un criterio definido de nomenclatura y aplicaciones dificulta su utilización.
- ✓ La técnica *isopiestic* se emplea únicamente para mediciones de potencial en material vegetal. Las técnicas psicrométrica e higrómetica presentan una aplicación más frecuente y amplia.
- ✓ El empleo de métodos de comparación estables y contrastados ofrece una referencia para la bondad de los resultados aportados por los diferentes tipos de psicrómetros. La heterogeneidad de los resultados alcanzados por comparación dificulta la elección del método más adecuado.
- ✓ El análisis de la casuística de los errores observados en la medición del potencial con psicrómetros exige un perfecto conocimiento de la técnica y aparato empleado así como la conservación de la muestra en las condiciones idóneas hasta la medición.
- ✓ Los WAMs son teóricamente versátiles en sus aplicaciones y no presentan aparentemente los problemas detectados en otros tipos de aparatos, reduciendo su precisión respecto a otros tipos de psicrómetros.

1.2. Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua.

- ✓ El WAM es un método estable para la determinación del contenido de agua a potenciales bajos, permitiendo la determinación del punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP) en la zona de estudio.

- ✓ La metodología alternativa de determinación de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC), con cuatro porcentajes de humedad y dos lecturas por porcentaje, aporta resultados fiables en su comparación con la metodología inicial, con ocho porcentajes de humedad y cuatro lecturas, duplicando el número de muestras por jornada de un operario.
- ✓ La determinación del PWP considerando diferentes sesiones de trabajo aporta resultados concluyentes relativas a la robustez del dispositivo para amortiguar las posibles variaciones en la realización de las lecturas.
- ✓ La aplicación del WAM provoca frente a la placa de presión (*pressure plate*) (PP) una reducción de tiempo invertido de la mitad, demandando durante el proceso más horas de trabajo del operario.
- ✓ El WAM provoca una infraestimación del valor del PWP respecto a la PP.

1.3. Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua.

- ✓ La identificación, análisis y control de los factores que afectan a las mediciones psicrométricas del potencial son determinantes cuando se emplea un WAM.
- ✓ Son considerados factores influyentes: el tiempo de secado-humectado, el tipo de cápsula empleada, la evaporación y absorción de agua, la condensación y el espacio de cabeza, la solución de calibración empleada, la temperatura a la que se realizan las lecturas, la humedad relativa, el potencial osmótico, el ventilador del interior del dispositivo y el tipo de dispositivo a emplear, con/sin control de temperatura.
- ✓ Se considera suficiente como tiempo de humectado de las muestras de suelo 20 horas, empleando en el proceso recipientes estancos volteándolos a la mitad de tiempo para obtener una redistribución del agua homogénea en toda la muestra.
- ✓ El tiempo de secado será de 8 horas. En caso de realización de una corrección de humedad inicial de la muestra considerada, se agiliza el proceso de lectura y esta fase es obviada.
- ✓ El empleo de cápsulas metálicas de acero inoxidable facilita el intercambio térmico y acorta el tiempo de medición en cuatro minutos por muestra.
- ✓ Las muestras cuyo contenido en agua es menor presentan mayor dependencia de factores ambientales externos.
- ✓ La humectación se realizará en las cápsulas, selladas, reduciendo al máximo el espacio de cabeza considerado.
- ✓ La solución de calibración (KCl) de 0,5 m aproxima los datos aportados por el WAM a los de la PP.

- ✓ Existe una dependencia de las determinaciones psicrométricas a diferentes niveles (lectura de potencial, WRC y PWP) de la temperatura ambiental.
- ✓ La amplitud del equilibrio dinámico debe ser lo más reducido posible, para lo cual la humedad relativa (HR) externa y la HR de la muestra deben ser semejantes en magnitud, debiendo realizar las lecturas a la temperatura más baja que se pueda disponer.
- ✓ Se puede emplear indistintamente agua desmineralizada como agua de abastecimiento para el humectado de las muestras siempre que la conductividad eléctrica tome valores que, por la propia precisión del WAM, no comprometa las determinaciones de potencial.
- ✓ El ventilador del WAM ejerce sobre las muestras un efecto de evaporación por lo que su tiempo de exposición deberá ser el menor posible.
- ✓ Existen variaciones entre las determinaciones psicrométricas realizadas con los WAM con y sin control de temperatura. Las determinaciones realizadas con el WAM sin control de temperatura son comparables con el método de referencia (la PP), las realizadas con control de la temperatura, no.
- ✓ El control y/o mantenimiento del conjunto de factores estudiados en esta investigación, dentro de un margen mínimo de variación, permite la proposición de una metodología de medición rápida y concisa; encaminada a la consecución de mediciones confiables.
- ✓ Se cuestiona el funcionamiento de este tipo de dispositivos en condiciones no controladas, derivadas de un uso en campo.

1.4. Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelos: estimación de “*hydrolimits*” en el NO de España.

- ✓ El empleo de modelos de carácter genérico, propuestos tanto a nivel internacional como a nivel nacional, aunque aportan rápidamente estimaciones del PWP, no permiten obtener una estimación de la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) ni de la AWC.
- ✓ Dentro de los modelos internacionales se consideran los más indicados el modelo “*Mayr-Jarvis*”, en caso de aplicarse a datos medidos directamente a partir del psicrómetro, y el modelo de “*EPIC*”, en el caso de provenir estos de la PP.
- ✓ Dentro de los modelos nacionales, con el modelo de Soto *et al.* (2001), la fiabilidad de las estimaciones se asemeja bastante a la obtenida por los autores, siendo un modelo muy simplificado en el que la estimación del PWP se realiza a partir de una única propiedad y por tanto deberá tomarse con precaución.

- ✓ La modelización de los “*hydrolimits*” en la zona de Terra Chá es viable a través del uso de funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs) generadas a partir de las características y propiedades específicas que presenta la zona.
- ✓ Es totalmente indicada y absolutamente necesaria la proposición y empleo de modelos de carácter local, diseñados específicamente para la zona de estudio como se propone en esta investigación.
- ✓ Se cuestiona la conveniencia del empleo del modelo genérico internacional propuesto por Campbell para el ajuste de las WRCs empleadas inicialmente en la obtención del PWP en el caso del WAM, debido a la presencia de modelos internacionales que presentan mejores ajustes en las estimaciones realizadas, indicando la posibilidad de existencia de modelos que se adecuen mejor.
- ✓ La modelización de los “*hydrolimits*” debe ser lo más específica posible, quedando, en última instancia, a elección del usuario el empleo de una metodología u otra, dentro de las propuestas, en función de la fiabilidad demandada y las propiedades a estimar.

1.5. Eficiencia en la estimación de “*hydrolimits*” con diferentes metodologías.

- ✓ La elección de una metodología u otra para la estimación y /o determinación de los “*hydrolimits*” debe seguir un análisis multicriterio en el que se consideren características tales como la incertidumbre obtenida en las determinaciones, el esfuerzo requerido, personal necesario y coste.
- ✓ Para la obtención del PWP, el WAM es la metodología indicada en términos de esfuerzo demandado y coste del operario. Si se consideran los costes derivados de los análisis el método que se presenta como idóneo son las PTFs locales y en términos de calidad el *SOILPAR* a través del modelo de “*Mayr-Jarvis*”.
- ✓ Para la determinación de la FC, la PP se recomienda en términos de coste, esfuerzo y calidad de información.
- ✓ Para la determinación de la AWC se recomienda la metodología combinada PP-WAM, salvo en caso de considerar costes derivados de los análisis, en cuyo caso se recomienda las PTFs locales. Resultados parejos en relación a la calidad de información presenta la PP.
- ✓ Se establece el WAM como método preferente en la determinación del PWP, la PP si se determina la FC y por último muy parejos, la aplicación de la PP y la metodología WAM-PP para la determinación de la AWC.
- ✓ Existe un aumento del coste del operario al aumentar el esfuerzo invertido, al igual que en el caso del coste de los análisis y los métodos predictivos para el PWP y la totalidad de los mismos en caso de tratarse de la AWC.

- ✓ Se considera como idóneo la no globalización de un análisis en unos índices que definan y caractericen los distintos métodos, dado que en el resultado final de la relación entre los distintos factores a considerar pueden quedar ocultas determinadas características no deseadas en el método elegido y características muy reseñables en un método descartado. Estos índices se deben tomar como indicativos, en ningún caso como definitorios.

2. Conclusiones personales.

- ✓ Las determinaciones de las propiedades hídricas en la zona de estudio, si bien ha sido tratada ampliamente en esta investigación, deberá ser considerada *a posteriori* en todas sus vertientes posibles. Se observan una serie de problemas iniciales no contemplados en esta investigación en sus hipótesis de partida y que requieren de un tratamiento reestructurativo y nuevamente definitorio. La elección del modelo de ajuste de las WRCs, así como la tipología de dispositivo a emplear deberá ser tratado en detalle, dado que los resultados posteriores se verán afectados. Igualmente el método de comparación empleado, la PP, se contrastará con una tercera metodología a fin de corroborar que el tiempo empleado en la obtención del PWP a la presión considerada es el adecuado y no resulta insuficiente. Resultados de otros autores avalan la existencia de valores superiores aportados por el WAM frente a otras metodologías. El hecho de infraestimar los valores a lo largo de esta investigación, aporta una duda razonable sobre la verdadera magnitud de los factores influyentes analizados. Estos factores aportan en algunas casuísticas un efecto de sobreestimación del PWP, lo cual provoca que el efecto de infraestimación aportado por el WAM frente a la PP adquiera mayor magnitud de la observada en los resultados, quedando oculto su efecto por los factores considerados.
- ✓ La diferencia encontrada entre los resultados aportados por el WAM con control de temperatura y sin ella, considerando que de todos los factores implicados, observados y analizados durante esta investigación, solamente difiere la HR derivada de las características climatológicas de los laboratorios en donde se realizaron las mediciones de potencial, se presenta como elemento a considerar con detalle y precaución en futuros análisis y determinaciones. En función de la experiencia de la autora, dicho elemento se considera como definitorio de tal discrepancia.

V

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

SECCIÓN

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO

CAPÍTULO XIV

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

“La Ciencia es como la tierra, sólo se puede poseer un poco de ella”
Jean-Baptiste Poquelin Molière (1622-1673). Dramaturgo y actor francés.

ÍNDICE

1. Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica	399
2. Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua.....	399
3. Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua	400
4. Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelo: estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” en el NO de España	401
5. Eficiencia en la estimación de “ <i>hydrolimits</i> ” con diferentes metodologías	402

Interrelacionadas con las conclusiones expuestas en el capítulo XIII, se derivan futuras líneas de investigación con el objetivo de aportar un complemento a la investigación contenida en esta memoria. Se presentan estructuradas en función de los diferentes capítulos correspondientes a la Sección III “*Investigación y resultados*”.

1. Diseño, técnicas de medida y aplicaciones de los psicrómetros de termopar: revisión histórica.

- Realización de un glosario de la terminología existente en Psicrometría, relativa a los elementos constructivos de los psicrómetros, técnicas de medición y aplicación, estableciendo unos criterios de clasificación homogéneos claramente definatorios del aparataje empleado.
- Ampliación del campo de aplicación de los psicrómetros de termopar (*thermocouple psychrometers*) (TCPs), concretamente los medidores de actividad de agua (*water activity meters*) (WAMs), a muestras de diferente naturaleza, especialmente en material vegetal diverso.
- Establecimiento de las condiciones óptimas de manejo de los WAMs en condiciones de campo.
- Estudio comparativo de los WAMs con otros psicrómetros valorando la idoneidad de una tipología determinada en función de las diferentes casuísticas, analizando la relación rapidez/precisión.

2. Estimación del punto de marchitamiento permanente usando un medidor de actividad de agua.

- Estudio de otros modelos existentes para la definición de la curva de retención de agua (*water retention curve*) (WRC) analizando su idoneidad en la aplicación a Terra Chá.
- Determinación del modelo que mejor se ajuste a la WRC aportada por el método de comparación, la placa de presión (*pressure plate*) (PP).
- Establecer el rango de aplicación en términos de potencial para el WAM por comparación con la PP entre WRC definidas con un número representativo de puntos.
- A partir de los datos procedentes del WAM (a bajos potenciales) y la PP (restantes casuísticas) para diferentes potenciales y contenidos de agua determinar la WRC y la ecuación que la define para la zona de estudio considerada.
- Verificación de la idoneidad de la metodología alternativa propuesta en esta investigación en función de los modelos dentro de los existentes que se ajusten para

la zona de estudio y a la ecuación de la WRC determinada a partir de la información procedente del WAM y la PP.

- Análisis del tiempo demandado en función de la metodología más idónea relativa a cada modelo de ajuste de WRC.
- Verificación del correcto tiempo de equilibrado de la PP para la obtención del punto de marchitamiento permanente (*permanent wilting point*) (PWP), en comparación con otra metodología de referencia.

3. Análisis de los factores que intervienen en las determinaciones psicrométricas con un medidor de actividad de agua.

- Determinación del efecto que provoca sobre las propiedades hídricas el empleo de muestras alteradas, para cada una de las metodologías empleadas.
- Aplicación paralela de los tipos de WAM, con y sin control de temperatura, de forma que las condiciones de funcionamiento sean iguales en ambos casos, y se observen las variaciones producidas en el funcionamiento, identificándose los factores no estudiados en esta investigación que puedan ocasionar las diferencias entre los resultados aportados por ambos dispositivos. Corroboración de la verdadera influencia de la humedad relativa (HR).
- Estudio pormenorizado del proceso de calibración en ambos dispositivos estableciendo una relación entre las lecturas que aporta el aparato para distintas soluciones de calibración de potencial conocido y el valor de lectura aportado. Dicha relación permitirá corregir las lecturas realizadas, controlando todos los factores que afecten a las mismas. Este estudio se recomienda en ambos tipos de dispositivos.
- Análisis de la influencia de la temperatura en función de la tipología de muestras consideradas, empleando en el proceso un mayor número de temperaturas comprendido en un rango superior, estableciendo la ecuación que defina la variación del potencial en función de la temperatura externa y de la temperatura de lectura.
- Profundizar en el estudio de los fenómenos que acontecen en el interior del compartimento de lectura, principalmente el equilibrio dinámico que se alcanza entre la muestra y la atmósfera del interior, estableciendo la relación de variación de potencial para diferentes muestras de potencial conocido en función de la HR exterior/interior del compartimento del dispositivo. Establecimiento del momento óptimo de pesaje de la muestra húmeda, antes o después del proceso de lectura.
- Realización de mediciones aplicando la reducción del tiempo de exposición de la muestra al ventilador, mediante obtención del equilibrio dinámico sin accionamiento del dispositivo de medida y establecimiento de los tiempos óptimos a considerar.

- Análisis del orden adecuado de ejecución de las operaciones de medición y pesaje de la muestra humectada, controlando el efecto que pueda provocar el ventilador en los resultados obtenidos.
- Analizar la verdadera utilidad de la zona de equilibrado de temperatura que se encuentra en la parte superior del dispositivo y el efecto que sobre ella tiene del ventilador posterior de WAM.
- Ampliación de los estudios referentes a la reducción del espacio de cabeza, controlando la temperatura de modo que se pueda aislar este factor de la posible condensación.
- Establecimiento de un método de secado alternativo al método de secado al aire, considerando los parámetros que puedan alterar las futuras determinaciones psicrométricas: tiempo, temperatura, formación de costras superficiales, etc.

4. Análisis y comparación de diferentes metodologías relativas a las propiedades hídricas de suelos: estimación de “*hydrolimits*” en el NO de España.

- Estudio de otros modelos existentes a distintos niveles, internacionales o nacionales, validándolos para la zona de estudio. Búsqueda exhaustiva de modelos que solventen la estimación de la capacidad de campo (*field capacity*) (FC) y la reserva de agua útil (*available water content*) (AWC).
- Empleo de otro software existente para el cálculo de los “*hydrolimits*”, pormenorizando en el funcionamiento de los mismos, adecuación a la zona de estudio y relación tiempo/coste/fiabilidad de los mismos.
- Proposición de funciones de pedotransferencia (*pedotransfer functions*) (PTFs) ampliando el número de propiedades consideradas, definitorias de las muestras de suelo, a fin de sean lo más específicas y fiables posibles.
- Comprobar si la idoneidad de los modelos considerados en esta investigación se ha visto condicionada por la obtención del PWP, y por tanto la AWC, a partir del ajuste de la WRC al modelo de Campbell. Aplicación de los modelos considerados en la PTFs a diferentes modelos de ajuste de la AWC.
- Establecimiento de PTFs definitorias de la WRC completa, no solamente de los “*hydrolimits*”.
- Estudio de la idoneidad de aplicación de otras metodologías predictivas, tales como redes neuronales artificiales u otro software (Rosetta, RETC, SWRC, SWlimits...).

5. Eficiencia en la estimación de “*hydrolimits*” con diferentes metodologías.

- Realización de un análisis multicriterio considerando un mayor número de metodologías diferentes y un mayor número de criterios definatorios del método (condiciones de manejo, facilidad, dependencia del operario, requerimientos ambientales, versatilidad en aplicaciones y condiciones, capacitación previa,...).
- Búsqueda y/o proposición de nuevos índices que permitan definir la idoneidad de las metodologías al fin perseguido, la determinación de los “*hydrolimits*”.
- Análisis exhaustivo de la relación existente entre la incertidumbre asociada a las determinaciones y el coste ocasionado o el esfuerzo demandado.

VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SECCIÓN

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO

CAPÍTULO XV

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“La mayoría de las ideas fundamentales de la Ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos”
Albert Einstein (1879-1955). Físico estadounidense de origen alemán.

A continuación se incluyen las referencias bibliográficas que se han citado en los capítulos de la memoria. Para facilitar su localización en el texto, se acompañan de una clave en la que se hace referencia al capítulo (Ci) o anexo (Ai) en el que aparecen.

Abrisqueta, J.M.; Plana, V.; Franco, J.A.; Ruiz-Sánchez, M.C. 2006. Effect of tillage and water pressure head on the hydraulics properties of loamy soil surface. *Spanish Journal of Agricultural Research*. **4** (2): 180-186. (CV)

Acutis, M.; Donatelli, M. 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*. **18**: 373-377. (CVI) (CXI) (CXII)

Akmal, M.; Hirasawa, T. 2004. Growth responses of seminal roots of wheat seedling to a reduction in the water potential of vermiculite. *Plant and Soil*. **267**: 319-328. (CVIII)

Álvarez, A.; González, M. 1989. Mecanización agraria en las explotaciones de “Terra Chá”. Serie Agraria 1. Diputación Provincial de Lugo. (CII)

Álvarez, C.J.; Cancela, J.J.; Fandiño, M. 2005. Characterization of irrigation holdings in the Terra Cha region of Spain: a first step towards a water management model. *Water Resources Management*. **19** (1): 23-36. (CII) (CIX) (CXII)

Álvarez, C.J.; Cancela, J.J.; Gómez, A.; Neira, X.X. 2003. Evaluación económica de proyectos de riego en explotaciones de ciclo cerrado. Aplicación a un caso práctico: “C.R. Río Miño- Río Pequeno” (Lugo). VII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Pamplona. (CII)

Amaral da Silva, E.A.; Toorop, P.E.; van Aelst, A.C.; Hilhorst, H.W.M. 2004. Abscisic acid controls embryo growth potential and endosperm cap weakening during coffee (*Coffea arabica* cv. Rubi) seed germination. *Planta*. **220**: 251-261. (CVIII)

Anderson, C.E.; Stormont, J.C. 2003. Laboratory measurement of soil moisture at capillary potential greater than 1500 kPa. Engineering Behavior of Unsaturated soils. 82nd Annual Meeting. Washington, D.C. (CVIII)

Andraski, B.J. 1996. Properties and variability of soil and trench fill at an Arid Waste-Burial site. *Soil Science Society of America Journal*. **60**: 54-66. (CV)

Andraski, B.J.; Scanlon, B.R. 2002. Thermocouple Psychrometry. En: Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. Ed. J.H. Dane & G.C Topp. Soil Science Society of America. Madison, Wis. pp: 609-642. (CIII) (CVIII) (CX)

Apostol, K.G.; Zwiazek, J.J.; MacKinnon, M.D. 2004. Naphthenic acids affect plant water conductance but do not alter shoot Na⁺ and Cl⁻ concentrations in jack pine (*Pinus banksiana*) seedlings. *Plant and Soil*. **263**: 183-190. (CVIII)

- Artigao, A.; Guardado, R.** 1993. El agua en el suelo. En: *Agronomía del riego*. Ed. Mundi-Prensa. (CV)
- Augé, R.M.; Duan, X.; Croker, J.L.; Witte, W.T.; Green, C.D.** 1998. Foliar dehydration tolerance of twelve deciduous tree species. *Journal of Experimental Botany*. **49** (321): 753-759. (CVIII)
- Augé, R.M.; Stodola, A.J.W.; Tims, J.E.; Saxton, A.M.** 2001. Moisture retention properties of a mycorrhizal soil. *Plant and Soil*. **230**: 87-97. (CVIII)
- Aydin, M.; Yano, T.; Evrendilek, F.; Uygur, V.** 2008. Implications of climate change for evaporation from bare soils in a Mediterranean environment. *Environmental Monitoring and Assessment*. **140** (1-3): 123. (CVIII)
- Ayele, M.; Blum, A.; Nguyen, H.T.** 2001. Diversity for osmotic adjustment and root depth in TEF [*Eragrostis tef* (Zucc) Trotter]. *Euphytica*. **121**: 237-249. (CVIII)
- Babcock, K.L.; Overstreet, R.** 1955. Thermodynamics of soil moisture: a new application. *Soil Science*. **80**: 257-263. (CX)
- Babu, R.C.; Zhang, J.; Blum, A.; Ho, T.-H.D.; Wu, R.; Nguyen, H.T.** 2004. *HVA1*, a LEA gene from barley confers dehydration tolerance in transgenic rice (*Oryza sativa* L.) via cell membrane protection. *Plant Science*. **166**: 855-862. (CVIII)
- Bach, L.B.** 1992. Soil water movement in response to temperature gradients: experimental measurements and model evaluation. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 37-46. (CX)
- Barker, J.R.; McKell, C.M.** 1983. Habitat differences between Basin and Wyoming big sagebrush in contiguous populations. *Journal of Range Management*. **36** (4): 450-454. (CVIII) (CX)
- Barreto, U.F.; Rossato, G.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.** 2004. Curvas de retenção de água e condutividade hidráulica do solo em sistemas de manejo do feijoeiro. XV Reunião brasileira de manejo e conservação de solo e água. Santa Maria. 25-30 julho. (CVI)
- Barreto-Riquelme, U.F.; Santi, G.R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.** 2004. Curvas de retenção de água e condutividade hidráulica do solo em sistemas de manejo do feijoeiro. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Santa Maria. 25 a 30 julho 2004. (CVIII)
- Barrs, H.D.** 1964. Heat of respiration as a possible cause of error in the estimation by psychrometric methods of water potential in plant tissue. *Nature*. **203**: 1136-1137. (CVIII)
- Barrs, H.D.** 1965. Psychrometric measurement of leaf water potential: lack of error attributable to leaf permeability. *Science*. **149**: 63-65. (CVIII)

- Barrs, H.D.** 1968. Determination of water deficits in plant tissues. En: Water deficits and plant growth. T.T. Kozlowski, ed. Academic Press. New York. Vol. I. pp:235-368. (CVIII)
- Barrs, H.D.** 1972. Some observations on construction and design criteria of thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. Van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp:65-67. (CVIII)
- Barrs, H.D.; Kramer, P.J.** 1969. Water potential increase in sliced leaf tissue as a cause of error in vapor phase determinations of water potential. *Plant Physiology*. **44**: 959-964. (CVIII)
- Bates, T.E.** 1993. Soil handling and preparation. En: Soil sampling and methods of analysis. Ed. M.R. Carter. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. pp: 19-24. (CIV)
- Baughn, J.W.; Tanner, C.B.** 1976a. Leaf water potential: comparison of pressure chamber and *in situ* hygrometer on five herbaceous species. *Crop Science*. **16**: 181-184. (CVIII)
- Baughn, J.W.; Tanner, C.B.** 1976b. Excision effects on leaf water potential of five herbaceous species. *Crop Science*. **16**: 184-190. (CVIII)
- Baver, L.D.; Gardner, W.H.** 1972. Soil physics. Fourth Edition. John Wiley and Sons, Inc. USA. (CIII)
- Beckett, R.P.** 1996. Some aspects of the water relations of the lichen *Parmotrema tinctorum* measured using thermocouple psychrometry. *Lichenologist*. **28**: 257-266. Part 3. (CVIII)
- Bell, M.A.; van Keulen, H.** 1995. Soil pedotransfer functions for four mexican soils. *Soil Science Society of America Journal*. **59**: 865-871. (CI) (CXI)
- Bennett, J.M.; Cortes, P.M.** 1985. Errors in measuring water potentials of small samples resulting from water adsorption by thermocouple psychrometer chambers. *Plant Physiology*. **79**: 184-188. (CVIII)
- Bennett, J.M.; Cortes, P.M.; Lorens, G.F.** 1986. Comparison of water potential components measured with a thermocouple psychrometer and a pressure chamber and the effects of starch hydrolysis. *Agronomy Journal*. **78**: 239-244. (CVIII)
- Bielsa, J.; Duarte, R.** 2000. La eficiencia técnica de riego: análisis de las conexiones y la utilidad de sus diversas definiciones. *Estudios Agrosociales y Pesqueros*. **189**: 103-118. (CI)

- Bilskie, J.** 2001. Soil water status: content and potencial. Campbell Scientific, Inc. Fecha de consulta: 02/03/2004. Disponible en:
<ftp://ftp.campbellsci.com/pub/outgoing/apnotes/soilh20c.pdf>. **(CIII)**
- Bingham, G.E.; Johnson, M.N.; Lemon, E.R.** 1972. Influence of heat sink design on thermocouple psychrometer response. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 88-93. **(CVIII)**
- Black, C.A.** 1975. Relaciones suelo-planta. Tomo I. Ed. Hemisferio Sur, S.R.L. Argentina. **(CIII)**
- Black, C.A.; Evans, D.D.; White, J.L.; Ensminger, L.E.; Clark, F.E.** 1965. Methods of soil analysis-Part 1: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Monograph N°.9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. **(CV) (CIX)**
- Bonilla, C.; Cancino, J.** 2001. Estimación del contenido de humedad del suelo mediante el empleo de funciones de pedotransferencia. *Agricultura Técnica* (Chile). **61** (3): 326-338. **(CXI)**
- Bouma, J.** 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*. **9**: 177-213. **(CVI) (CXI)**
- Bower, J.P.** 1985. Some aspects of water relations on Avocado *Persea americana* (Mill.) tree and fruit physiology. Doctoral Thesis. University of Natal. Faculty of Agriculture. Pietermaritzburg. **(CVIII)**
- Box, J.E., Jr.** 1965. Measurement of water stress in cotton plant leaf disc with a thermocouple psychrometer. *Agronomy Journal*. **57**: 367-370. **(CVIII)**
- Boyer, J.S.** 1966. Isopiestic Technique: Measurements of accurate leaf water potentials. *Science*. **154**: 1459-1460. **(CVIII)**
- Boyer, J.S.** 1967. Leaf water potentials measured with a pressure chamber. *Plant Physiology*. **42**: 133-137. **(CVIII)**
- Boyer, J.S.** 1969. Measurement of the water status of plants. *Annual Review of Plant Physiology*. **20**: 351-364. **(CVIII)**
- Boyer, J.S.** 1972a. Use of isopiestic technique in thermocouple psychrometry. I. Theory. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp:51-55. **(CVIII)**
- Boyer, J.S.** 1972b. Use of isopiestic technique in thermocouple psychrometry. II. Construction. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the

- Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 98-102. (CVIII)
- Boyer, J.S.** 1972c. Use of isopiestic technique in thermocouple psychrometry. III. Application to plants. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 220-223. (CVIII)
- Boyer, J.S.** 1995. Measuring the water status of plants and soil. Academic Press. USA. (CVIII)
- Boyer, J.S.; Potter, J.R.** 1973. Chloroplast response to low leaf water potentials. *Plant Physiology*. **51**: 989-992. (CVIII)
- Brooks, R.H.; Corey, A.T.** 1964. Hydraulic properties of porous media. Vol. 3. Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins. pp. 1-27. (CIX)
- Brown, P.W.; Tanner, C.B.** 1981. Alfalfa water potential measurement: a comparison of the pressure chamber and leaf dew-point hygrometers. *Crop Science*. **21**: 240-244. (CVIII)
- Brown, R.W.** 1969. Leaf sampler for relative water content measurements: design and application. *Agronomy Journal*. **61**: 644-647. (CVIII)
- Brown, R.W.** 1970. Measurement of water potential with thermocouple psychrometers: construction and applications. USDA. Forest Service Research Paper. Department of Agriculture, Ogden, Utah. (CVIII)
- Brown, R.W.** 1972. Determination of leaf osmotic potential using thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 198-209. (CVIII)
- Brown, R.W.** 1976. New technique for measuring the water potential of detached leaf samples. *Agronomy Journal*. **68**: 432-434. (CVIII)
- Brown, R.W.; Chambers, J.C.** 1987. Measurements of *in situ* water potential with thermocouple psychrometers: a critical evaluation. En: Proc. Intl. Conf. on Measurements of Soil and Plant water status. Ed. Hanks, R.J.; Brown, R.W. Utah State Univ., Logan, U.T. Agricultural Experiment Station. pp: 125-136. (CVIII)
- Brown, R.W.; Collins, J.M.** 1980. A screen-caged thermocouple psychrometer and calibration chamber for measurements of plant and soil water potential. *Agronomy Journal*. **72**: 851-854. (CVIII)
- Brown, R.W.; Johnston, R.S.** 1976. Extended field use of screen-covered thermocouple psychrometers. *Agronomy Journal*. **68**: 995-996. (CVIII) (CX)

- Brown, R.W.; McDonough, W.T.** 1977. Thermocouple psychrometer for *in situ* leaf water potential determinations. *Plant and Soil*. **48**: 5-10. (CVIII)
- Brown, R.W.; Oosterhuis, D.M.** 1992. Review and interpretation. Measuring plant and soil water potentials with thermocouple psychrometers: Some concerns. *Agronomy Journal*. **84**: 78-86. (CVIII) (CX)
- Brown, R.W.; van Haveren, B.P.** 1972. Psychrometry in water relations research; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. (CVIII) (CIX) (CX)
- Brunini, O.; Thurtell, G.W.** 1982. An improved thermocouple hygrometer for *in-situ* measurements of soil water potential. *Soil Science Society of America Journal*. **46**: 900-904. (CVIII)
- Brye, K.R.** 2003. Long-term effects of cultivation on particle size and water-retention characteristics determined using wetting curves. *Soil Science*. **168** (7): 459-468. (CVIII) (CX)
- Bryla, D.R.; Duniway, J.M.** 1997. Effects of mycorrhizal infection on drought tolerance and recovery in safflower and wheat. *Plant and Soil*. **197**: 95-103. (CVIII)
- Caldwell, M.M.; Caldwell, M.L.** 1970. A fine wire psychrometer for measurement of humidity in the vegetation layer. *Ecology*. **51** (1): 918-920. (CVIII)
- Calissendorff, C.; Gardner, W.H.** 1972. A temperature-compensated leaf psychrometer for *in situ* measurements of water potential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 224-228. (CVIII)
- Campbell, C.S.; McInnes, K.J.** 1999. Response *in situ* leaf psychrometer to cuticle removal by abrasion. *Agronomy Journal*. **91**: 859-862. (CVIII)
- Campbell, E.C.** 1972. Vapor sink and thermal gradient effects on psychrometer calibration. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 94-97. (CVIII)
- Campbell, E.C.; Campbell, G.S.; Barlow, W.K.** 1973. A dewpoint hygrometer for water potential measurement. *Journal of Agricultural Meteorology*. **12**: 113-121. (CVIII)
- Campbell, G.S.** 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Science*. **117** (6): 311-314. (CIX)

- Campbell, G.S.** 1979. Improved thermocouple psychrometers for measurement of soil water potential in a temperature gradient. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. **12**: 739-743. (CVIII)
- Campbell, G.S.** 1985. Soil physics with basic. *Developments in Soil Science*. **14**. Elsevier. pp: 150. (CIII) (CVII) (CX) (CXI)
- Campbell, G.S.; Campbell, M.D.** 1974. Evaluation of a thermocouple hygrometer for measuring leaf water potential in situ. *Agronomy Journal*. **66**: 24-27. (CVIII)
- Campbell, G.S.; Campbell, M.D.** 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. En: *Advances in irrigation*. Daniel Hillel (Ed). New York. Academic Press. Vol I. (CI) (CIII)
- Campbell, G.S.; Gardner, W.H.** 1971. Psychrometric measurement of soil water potential: temperature and bulk density effects. *Soil Science Society of America Proceedings Journal*. **35**: 8-12. (CVIII) (CIX) (CX)
- Campbell, G.S.; Gee, G.W.** 1986. Water potential. *Miscellaneous Methods*. En: *Methods of soil analysis*. Part. I: Physical and Mineralogical Methods. Second Edition. Ed. A. Klute. (CIII)
- Campbell, G.S.; Shiozawa, S.** 1992. Prediction of hydraulic properties of soils using particle size distribution and bulk density data. En: *Proceedings of an International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California Press, Berkeley. pp 317–328. (CIX)
- Campbell, G.S.; Smith, D.M.; Teare, B.L.** 2007. Application of dew point method to obtain the soil water characteristic. En: *Experimental Unsaturated Soil Mechanic*. Vol. 112. Parte II. Springer Proceedings in Physics. (CVIII)
- Campbell, G.S.; Trull, J.W.; Gardner, W.H.** 1968. A welding technique for Peltier thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Proceedings*. **32**: 887-889. (CVIII)
- Campbell, G.S.; Wilson, A.M.** 1972. Water potential measurements of soil samples. En: *Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers*. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 142-149. (CVIII)
- Campbell, G.S.; Zollinger, W.D.; Taylor, S.A.** 1966. Sample charger for thermocouple psychrometers: construction and some applications. *Agronomy Journal*. **58**: 315-318. (CVIII)
- Cancela, J.J.** 2004. Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo. (CII) (CIII) (CIV) (CV) (CVII) (CVIII) (CIX) (CX) (CXI) (CXII)

- Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Fandiño, M.; Martínez, E.M.; Neira, X.X.** 2006b. Caracterización de las zonas regables de la provincia de Lugo. Artículo Técnico. Riegos y Drenajes XXI. Año XXII. Nº 148. Mayo / Junio. (CII)
- Cancela, J.J.; Cuesta, T.S.; Neira, X.X.; Pereira, L.S.** 2006a. Modelling for improved irrigation water management in a temperature region of Northern Spain. *Biosystems Engineering*. **91** (1): 151-163. (CII) (CIX) (CX) (CXI)
- Cancela, J.; Neira, X; Cuesta, T.; Alvarez, C.; Crecente, R.** 2004. Socio-Economic Evaluation of the Terra Cha Irrigators Community by using a Geographic Information System - Spain. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript LW 04 003. July, 2004. (CII) (CXII)
- Cardesín, J.M.** 1987. Política agraria y transformaciones en la agricultura gallega: la zona de colonización de Terra Chá (1954-1973). *Agricultura y Sociedad*. **44**: 243-280. (CII)
- Cardoso, R.; Romero, E.; Lima, A.; Ferrari, A.** 2007. A comparative study of soil suction measurement using two different high-range psychrometers. En: *Experimental Unsaturated soil Mechanics*. Vol. 112. Part. I. pp: 79-93. (CVIII) (CX)
- Carminati, A.; Kaestner, A.; Hassanein, R.; Ippisch, O.; Vontobel, P.; Flühler, H.** 2007. Infiltration through series of soil aggregates: neutron radiography and modelling. *Advances in Water Resources*. **30**: 1168-1178. (CV)
- Carrow, R.N.; Duncan, R.R.; Waltz, C.** 2004. Turfgrass irrigation Scheduling Techniques. Fecha de consulta: 09/04/2004. Disponible en: http://commodities.caes.uga.edu/turfgrass/waterconservation/PDF_Files/Article-08.pdf. (CIII)
- Cary, J.W.; Hanks, R.J.** 1972. The usefulness of water potential measurements in soil and related media. En: *Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers*. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 137-141. (CVIII)
- Casal, B.** 1982. A Terra Chá luguesa. Estudio da súa realidade agrária. Cuadernos da Área de Ciencias Agrárias. Publicacións do Seminario de Estudos Galegos. (CII)
- Casals, P.; Romanyà, J.; Cortina, J.; Bottner, P.; Coûteaux, M.-M.; Ramon, V.** 2000. CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*. **48**: 261-281. (CVIII)
- Castelao, A.M.** 1989. Aportación al estudio de la hidromorfia de los suelos de Terra Chá y su influencia en la génesis y capacidad productiva. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela. (CIX) (CXI)

- Castelao, A.M.; Díaz-Fierros, F.** 1992. Os solos da Terra Chá. Tipos, xénese e aproveitamento. Servicio de Publicacións da Deputación Provincial de Lugo. Lugo (CII) (CXII)
- Cavaliere, A.J.; Boyer, J.S.** 1982. Water potentials induced by growth in soybean hypocotyls. *Plant Physiology*. **69**: 492-496. (CVIII)
- Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Santi, G.R.; Paulleto, E.; Leitske, V.W.; Spinelli-Pinto, L.F.** 2002. Retenção de água medida pelo método de placas porosas de Richards e pelo psicrômetro de termopar. XIX RBMCSA Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Cuiabá, M.T. 21 a 26 de julho 2002. (CVIII) (CXI)
- Comstock, J.P.** 2000. Correction of thermocouple psychrometer readings for the interaction of temperature and actual water potential. *Crop Science*. **40**: 709-712. (CVIII)
- Conant, R.T.; Dalla-Betta, P.; Klopatek, C.C.; Klopatek, J.M.** 2004. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biology & Biochemistry*. **36**: 945-951. (CV)
- Conesa, V.** 1988. Riegos a presión media y alta frecuencia. Diseño, cálculo, instalación, elementos auxiliares. Prensa XXI, S.A. Barcelona. (CIII)
- Conklin, A.R.** 2001. New in measuring soil water. *Soil Sediment & Water. The Magazine of Environmental Assessment & Remediation*. December 2001. (CIV)
- Cornelis, W.M.; Ronsyn, J.; van Meirvenne, M.; Hartmann, R.** 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal*. **65**: 638-648. (CXI)
- Costa, A.; Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J.; Mafra, A.L.; Bayer, C.; Passos, J.F.M.; Fontoura, S.M.V.; Camilo, K.C.** 2003. Variação temporal da humidade e água disponível em um Latossolo Bruno sob cinco sistemas de manejo. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Ribeirão Preto. S.P. 13 a 18 julho 2003. (CVIII) (CXI)
- Cousin, I.; Nicoullaud, B.; Coutadeur, C.** 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*. **53** (2): 97-114. (CI) (CIX)
- Crépin, J.; Johnson, R.L.** 1993. Soil sampling for environmental assessment. En: Soil sampling and methods of analysis. Ed. M.R. Carter. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. pp: 5-18. (CIV)
- Cresswell, H. P.; Coquet, Y.; Bruand, A.; McKenzie, N.J.** 2006. The transferability of Australian pedotransfer functions for predicting water retention characteristics of French soils. *Soil Use and Management*. **22**: 62-70. (CXII)

- Cruz, C.O.** 2008. Distribución de las reservas de carbono orgánico en los suelos de México. Publicación *on line* del Instituto de Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Mexico. Fecha de consulta: 23/03/2008. Disponible en: http://mapserver.inegi.gob.mx/geografía/espanol/eventos/cng2007/resumen/SitioNew/dctos/rescruzetchevers_carbonoorganico.pdf (CIII)
- Chahal, R.S.; Yong, R.N.** 1965. Validity of the soil water characteristic determined with the pressurized apparatus. *Soil Science*. **99** (2): 98-103. (CV)
- Chow, T.L.; de Vries, J.** 1973. Dynamic measurement of soil and leaf water potencial with a double loop Peltier type thermocouple psychrometer. *Soil Science Society of America Proceedings*. **37**: 181-188. (CVIII)
- Christensen, N.B.** 2005. Irrigation management using soil moisture monitors. *Western Nutrient Management Conference*. **6**: 46-53. (CI)
- Christiaens, K.; Reyens, J.** 2001. Analysis of uncertainties associated with different methods to determine soil hydraulic properties and their propagation in the distributed hydrological MIKE SHE model. *Journal of Hydrology*. **246**: 63-81. (CXI) (CXII)
- Dahiya, R.; Ingwersen, J.; Streck, T.** 2007. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: experimental findings and modelling. *Soil & Tillage Research*. **96**: 52-63. (CV)
- Dalton, F.N.; Rawlins, S.L.** 1968. Desing criteria for Peltier-effect thermocouple psychrometers. *Soil Science*. **105** (1): 12-17. (CVIII)
- Danalatos, N.G.; Kosmas, C.S.; Driessen, P.M.; Yassoglou, N.** 1994. Estimation of draining soil moisture characteristic from standard data as recorder in routine soil surveys. *Geoderma*. **64**: 155-165. (CVI)
- Daniel, D.E.** 1982. Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Journal*. **46**: 1125-1129. (CVIII) (CX)
- Daws, M.I.; Lydall, E.; Chmielorz, P.; Leprince, O.; Matthews, S.; Thanos, C.A.; Pritchard, H.W.** 2004. Developmental heat sum influences recalcitrant seed traits in *Aesculus hippocastanum* across Europe. *New Phytologist*. **162**: 157-166. (CVIII)
- Decagon Devices.** 2002. Generating a soil moisture characteristic using the WP4. Application note. Fecha de consulta: 27/06/2002. Disponible en: <http://www.decagon.com/appnotes/SoilCurve.pdf> (CIX)
- Decagon Devices.** 2003a. Measurement of leaf water potencial using the WP4. Application note. Fecha de consulta: 30/12/2003. Disponible en: <http://www.decagon.com/wp4> (CVIII)

- Decagon Devices.** 2003b. Seed longevity in storage is enhanced by controlling water activity. Application note. Fecha de consulta: 30/12/2003. Disponible en: <http://www.decagon.com/wp4> (CVIII)
- Decagon Devices.** 2003c. Dewpoint PotentiaMeter Operator's Manual Version 2.2. (CV) (AIV)
- Decagon Devices.** 2006a. Determining the -15 bar (permanent wilt) water content of soils with the WP4. Application note. Fecha de consulta: 11/10/2007. Disponible en: <http://www.decagon.com/environmental/wp4> (CIX)
- Decagon Devices.** 2006b. Generating a soil moisture characteristic using WP4. Application note. Fecha de consulta : 11/10/2007. Disponible en: <http://www.decagon.com/environmental/wp4> (CX)
- Del Campo, A.** 2003. ¿Tiene futuro el regadío español?. Retos para el siglo XXI. Fecha de consulta: 02/06/2003. Disponible en: <http://www.agroinformacion.com/leer-articulo.aspx?not=161> (CI)
- De Medeiros-Silveira, F.; Santi, G.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Calessio, R.; Gubiani, P.I.; Collares, G.L.** 2004. Estimativa da retenção de água através de pedofunções para alguns solos brasileiros. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água. Santa María. 25 a 30 julho 2004. (CVI) (CVIII)
- Deuchars, S.A.; Townend, J.; Aitkenhead, M.J.; FitzPatrick, E.A.** 1999. Changes in soil structure and hydraulic properties in regenerating rain forest. *Soil Use and Management*. **15**: 183-187. (CI)
- Díaz-Zorita, M.; Grove, J.H.; Murdock, L.; Herbeck, J.; Perfect, E.** 2004. Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no-till production system. *Agronomy Journal*. **96**: 1651-1659. (CVIII) (CIX) (CX)
- Dik, A.J.; Elad, Y.** 1999. Comparison of antagonist of *Botrytis cinerea* in greenhouse-grown cucumber and tomato under different climatic conditions. *European Journal of Plant Pathology*. **105**: 123-137. (CVIII)
- Dixon, M.; Grace, J.** 1982. Water uptake by some chamber materials. *Plant, Cell and Environment*. **5**: 323-327. (CVIII)
- Dixon, M.A.; Grace, J.; Tyree, M.T.** 1984. Concurrent measurements of stem density, leaf and stem water potential, stomatal conductance and cavitation on a sapling of *Thuja occidentalis* L. *Plant, Cell and Environment*. **7**: 615-618. (CVIII)
- Dixon, M.A.; Tyree, M.T.** 1984. A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb. *Plant, Cell and Environment*. **7**: 693-697. (CVIII)

- Doering, E.J.** 1965. Soil-water diffusivity by the one-step method. *Soil Science*. **99** (5): 322-326. (CV)
- Domec, J.C.; Warren, J.M.; Meinzer, F.C.; Broks, J.R.; Coulombe, R.** 2004. Native root xylem embolism stomatal closure in stands of douglas-fir and ponderosa pine: mitigation by hydraulic redistribution. *Oecologia*. **141**: 7-16. (CVIII)
- Donatelli, M.; Acutis, M.** 1996. Evaluation of methods to estimate soil water content at field capacity and wilting point. 4th ESA Congress. The Netherlands. (CXI) (CXII)
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O.** 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. pp:179. (CVIII)
- Duniway, J.M.** 1971. Comparison of pressure chamber and thermocouple psychrometer determinations of leaf water status in tomato. *Plant Physiology*. **48**: 106-107. (CVIII)
- Durner, W.; Or, D.** 2005. Soil water potential measurement. En: Encyclopedia of Hydrological Sciences. Ed. M.G. Anderson. John Wiley & Sons, Ltd. pp: 1089-1102. (CI) (CVIII)
- Earl, R.; Taylor, J.C.; Wood, G.A.; Bradley, I.; James, I.T.; Waive, T.; Wels, J.P.; Godwin, R.J.; Knight, S.M.** 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability-Part. I: field observation of soil variation. *Biosystems Engineering*. **84** (4): 425-440. (CIX)
- Easter, S.J.; Sosebee, R.E.** 1974. Use of thermocouple psychrometry in field studies of soil-plant-water relationships. *Plant and Soil*. **40**: 707-712. (CVIII)
- Easter, S.J.; Sosebee, R.E.** 1975. Influence of soil-water potential on the water relationships of Honey Mesquite. *Journal of Range Management*. **28** (3): 230-232. (CVIII)
- Eddleman, L.E.; Nimlos, T.J.** 1972. Growth rates of native grasses and soil water potential as measured with thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 231-236. (CVIII)
- Ehlig, C.F.** 1962. Measurement of energy status of water in plants with a thermocouple psychrometer. *Plant Physiology*. **37**: 288-290. (CVIII)
- Ehret, D.L.; Lau, A.; Bittman, S.; Lin, W.; Shelford, T.** 2001. Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie*. **21**: 403-414. (CVIII)
- Elías, F.; Castellví, F.** 1996. Agrometeorología. MAPA. Mundi-Prensa. Madrid. (CII)

- Enfield, C.G.; Hsieh, J.J.C.; Warric, A.W.** 1973. Evaluation of water flux above a deep water table using thermocouple psychrometers. *Soil Science Society of America Proceedings*. **37**: 968-970. (CVIII)
- Enns, L.C.; Canny, M.J.; McCully, M.E.** 2000. An investigation of the role of solutes in the xylem sap and in the xylem parenchyma as the source of root pressure. *Protoplasma*. **211**: 183-197. (CVIII)
- Erzin, Y.; Erol, O.** 2007. Swell pressure prediction by suction methods. *Engineering Geology*. **92**: 133-145. (CVIII)
- Espeleta, J.F.; West, J.B.; Donovan, L.A.** 2004. Species-specific patterns on hydraulic lift in co-occurring adult trees and grasses in a sandhill community. *Oecologia*. **138**: 341-349. (CVIII)
- Fandiño, M.; Cancela, J.J.; Álvarez, C.J.** 2003. Aspectos sociales de las explotaciones de regadío en la provincia de Lugo-Galicia (España). V Coloquio Hispano-Portugués de Estudios Rurais. ESAB-Escola Superior de Bragança. (CII)
- FAO.** 2003. Handling and preservation of fruits and vegetables by combined methods for rural areas. Technical manual. Agricultural Services. Bulletin 149. (CVIII)
- Fatima, S.; Farooqi, A.H.A.; Sharma, S.** 2002. Physiological and metabolic responses of different genotypes of *Cymbopogon martinii* and *C. winterianus* to water stress. *Plant Growth Regulation*. **37**: 143-149. (CVIII)
- Fernández, J.** 2003. Dinámica del agua en suelos con gravas. Tesis Doctoral. Estación Experimental del Zaidín. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Universidad de Granada. (CIII)
- Fernández-Gálvez, J.; Barahona, E.** 2005. Changes in soil water retention due to soil kneading. *Agricultural Water Management*. **76**: 53-61. (CV)
- Fernández-Lavandera, O.; Pizarro, A.** 1980. El suelo, el desagüe, el riego y la economía. II. Terra Chá. IRYDA. Ministerio de Agricultura. (CII)
- Ficus, E.L.** 1972. In situ measurement of root-water potential. *Plant Physiology*. **50**: 191-193. (CVIII) (CX)
- Finney, D.J.** 1948. Random and systematic sampling in timber surveys. *Forestry*. **22**: 64-99. (CIV)
- Flint, A.L.; Campbell, G.S.; Ellet, K.M.; Calissendorff, C.** 2002. Calibration and temperature correction of heat dissipation matric potential sensors. *Soil Science Society of America Journal*. **66**: 1439-1445. (CIII) (CVIII)
- Foth, H.D.** 1986. Fundamentos de la ciencia del suelo. Compañía Editorial Continental, S.A. de CV. México. (CIII)

- Frank, A.B.; Power, J.F.; Willis, W.O.** 1973. Effect of temperature and plant water stress on photosynthesis, diffusion resistance, and leaf water potential in spring wheat. *Agronomy Journal*. **65**: 777-780. (CVIII)
- Franzmeier, D.P.** 1991. Estimation of hydraulic conductivity from effective porosity data for some Indiana soils. *Soil Science Society of America Journal*. **55**: 1801-1803. (CVI)
- Fredlund, D.G.** 1992. Background, theory, and research related to the use of thermal conductivity sensors for matrix suction measurements. En: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Soil Science Society of America. Especial publication. **30**: 249-261. (CIII)
- Fredlund, D.G.; Xing, A.** 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. **31**: 521-532. (CI)
- Fredlund, M.D.; Fredlund, D.G.; Wilson, G.W.** 2007. Estimation of Unsaturated Soil Properties Using a Knowledge-Based System. Conference Proceeding Paper. Computing in Civil Engineering (Proceedings of the Fourth Congress held in conjunction with A/E/C Systems '97. Philadelphia). (CI)
- Fuentes, J.L.** 1998. Técnicas de riego. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. (CIII)
- Fujimaki, H.; Inoue, M.** 2003. A transient evaporation method for determining soil hydraulic properties at low pressure. *Vadose Zone Journal*. **2**: 400-408. (CVIII)
- Gardner, R.** 1955. Relation of temperature to moisture tension of soil. *Soil Science*. **79**: 257-265. (CX)
- Gardner, W.H.** 1986. Water content. En: Methods of soil analysis. Part. I: Physical and Mineralogical Methods. Second Edition. Ed. A. Klute. pp: 496-544. (CIII)
- Gardner, W.R.; Dalton, F.N.; Harris, R.F.** 1972. Thermocouple psychrometer for the study of water relations of soil microorganisms. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 150-153. (CVIII)
- Gee, G.W.; Campbell, M.D.; Campbell, G.S.; Campbell, J.H.** 1992. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 1068-1070. (CVIII) (CIX) (CX) (CXII)
- Gee, G.W.; Ward, A.L.; Zhang, Z.F.; Campbell, G.S.; Mathison, J.** 2002. The influence of hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. *Vadose Zone Journal*. **1**: 172-178. (CV) (CIX)

- Gelb, G.H.; Marcus, B.D.; Dropkin, D.** 1964. Manufacture of fine wire thermocouple probes. *The Review of Scientific Instruments*. **35**: 80-81. (CVIII)
- Gerakis, A.; Zalidis, G.** 1998. Estimating field-measured, plant extractable water from soil properties: beyond statistical models. *Irrigation and Drainage Systems*. **12**: 311-322. (CIII) (CV)
- Gibbons, J.M.; Newbery, D.M.** 2002. Drought avoidance and the effect of local topography on trees in the understory of Bornean lowland rain forest. *Plant Ecology*. **164**: 1-18. (CVIII)
- Gollan, T.; Turner, N.C.; Schulze, E.-D.** 1985. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. III. In the Sclerophyllous woody species *Nerium oleander*. *Oecologia*. **65**: 356-362. (CVIII)
- Gómez, A.** 2002. Mejora de las infraestructuras de la red de riego de la comunidad de regantes río Miño-Pequeno de 670 ha en Cospeito (Lugo). Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Santiago de Compostela. EPS. Lugo. (CII)
- Gómez, A.; Cancela, J.J.; Neira, X.X.; Cuesta, T.S.** 2003. Desarrollo rural en torno al regadío en la comarca de Terra Chá. V Coloquio Hispano-Portugués de Estudios Rurais. ESAB-Escola Superior de Bragança. (CII)
- Gopal, J.; Iwama, K.** 2007. In vitro screening of potato against water-stress mediates through sorbitol and polyethylene glycol. *Plant Cell Reports*. **26**: 693-700. (CVIII)
- Gordon, D.R.; Rice, K.J.** 2000. Competitive suppression of *Quercus douglasii* (Fagaceae) seedling emergence and growth. *American Journal of Botany*. **87** (7): 986-994. (CVIII)
- Gounot, M.; Monteny, B.** 1967. Mise au point d'une méthode thermoélectrique (Effet Peltier) pour déterminer le potentiel hydrique d'un tissu végétal ou d'un sol. Documents Techniques N°31. Institut National de la Reserche Agronomique de Tunisie.. I.N.R.A.T. ARIANA (Tunisie). (CVIII)
- Gran Enciclopedia Gallega.** 1974. Terra Chá. Ed. Silverio Cañada. pp: 78-79. (CII)
- Guichard, S.; Gary, C.; Leonardi, Ch; Bertin, N.** 2005. Analysis of growth and water relations of tomato fruits in relation to air vapor pressure deficit and plant fruit load. *Journal of Plant Growth Regulation*. **24**: 201-213. (CVIII)
- Guitián, F.; Carballás, T.** 1976. Técnicas de análisis de suelos. Pico Sacro. Santiago de Compostela, España. (CIV) (CXI) (CXII)
- Hanson, B.R.; May, D.M.** 2006. Crop evaporation of processing tomato in the San Joaquin Valley of California, USA. *Irrigation Science*. **24**: 211-221. (CVIII)

- Hardegree, S.P.** 1989. Xylem water holding capacity as a source of error in water potential estimates made with the pressure chamber and thermocouple psychrometer. *American Journal of Botany*. **76** (3): 356-360. (CVIII)
- Haverkamp, R.; Parlange, Y.J.** 1986. Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*. **142** (6): 325-339. (CVI)
- Hillel, D.** 1998. Environmental soil physics. Academic Press. USA. (CIII) (CVIII)
- Hoffman, G.J.; Herkelrath, W.N.; Austin, R.S.** 1969. Simultaneous cycling of Peltier thermocouple psychrometers for rapid water potential measurements. *Agronomy Journal*. **61**: 597-601. (CVIII)
- Hoffman, G.J.; Oster, J.D.; Merrill, S.D.** 1972. Automated measurement of water potential and its components using thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 123-130. (CVIII)
- Hoffman, G.J.; Rawlins, S.L.** 1972. Silver-foil psychrometer for measuring leaf water potential in situ. *Science*. **177**: 802-804. (CVIII)
- Hoffman, G.J.; Splinter, W.E.** 1968. Water potential measurements of an intact plant-soil system. *Agronomy Journal*. **60**: 408-413. (CVIII)
- Holmes, T.H.; Rice, K.J.** 1996. Patterns of growth and soil-water utilization in some exotic annuals and native perennial bunchgrasses of California. *Annals of Botany*. **78**: 233-243. (CVIII)
- Hopmans, J.W.; Dane, J.H.** 1986a. Temperature dependence of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 4-9. (CX)
- Hopmans, J.W.; Dane, J.H.** 1986b. Temperature dependence of soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 562-567. (CX)
- Hsieh, J.J.C.; Enfield, C.G.; Hungate, F.P.** 1972. Application of temperature-compensated psychrometers to the measurement of water potential gradients. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 154-158. (CVIII) (CX)
- Hsieh, J.J.C.; Hungate, F.P.** 1970. Temperature compensated Peltier psychrometer for measuring plant and soil water potentials. *Soil Science*. **110** (4): 253-257. (CVIII)
- Huang, B.** 1999. Water relations and root activities of *Buchloe dactyloides* and *Zoysia japonica* in response to localized soil drying. *Plant and Soil*. **208**: 179-186. (CVIII)

- Huang, B.; Fu, J.** 2000. Photosynthesis, respiration, and carbon allocation of two cool-season perennial grasses in response to surface soil drying. *Plant and Soil*. **227**: 17-26. (CVIII)
- Hunt, A.G.; Skinner, T.E.** 2005. Hydraulic conductivity limited equilibration: effect on water retention characteristics. *Vadose Zone Journal*. **4**: 145-150. (CIII)
- Hura, T.; Hura, K.; Grzesiak, M.; Rzepka, A.** 2007. Effect of long-term drought stress on leaf gas exchange and fluorescence parameters in C₃ and C₄ plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. **29**: 103-113. (CVIII)
- I.G.E.** 2006. Principales datos de Galicia, información comarcal y municipal. Instituto Gallego de Estadística. Fecha consulta: 04/04/08. Disponible en: <http://www.ige.eu/web/index.jsp?paxina=001&idioma=gl> (CII)
- I.G.E.** 2007. Principales datos de Galicia, información comarcal y municipal. Instituto Gallego de Estadística. Fecha consulta: 04/04/08. Disponible en: <http://www.ige.eu/web/index.jsp?paxina=001&idioma=gl>. (CII)
- Ingvalson, R.D.; Oster, J.D.; Rawlins, S.L.; Hoffman, G.J.** 1970. Measurement of water potential and osmotic potential in soil with combined thermocouple psychrometer and salinity sensor. *Soil Science Society of America Proceedings*. **34**: 570-574. (CVIII)
- Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R.** 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science*. **23**: 93-102. (CIX)
- Ishikawa, C.M.; Bledsoe, C.S.** 2000. Seasonal and diurnal patterns of soil water potential in the rhizosphere of blue oaks: evidence for hydraulic lift. *Oecologia*. **125** (4): 459-465. (CVIII)
- Izbicki, J.A.; Radyk, J.; Michel, R.L.** 2002. Movement of water through the thick unsaturated zone underlying Oro Grande and Sheep Creek Washes in the western Mojave Desert, USA. *Hydrogeology Journal*. **10**: 409-427. (CVIII)
- Jaynes, D.B.; Tyler, J.** 1984. Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. *Soil Science*. **138** (4): 298-305. (CVI)
- Jobling, J.J.; Patterson, B.D.; Moradi, S.; Joyce, D.** 1997. A non-destructive method for measuring the water potential of fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*. **10** (1): 1-8. (CVIII)
- Johnson, R.W.; Dixon, M.A.; Lee, D.R.** 1992. Water relations of the tomato during fruit-growth. *Plant Cell and Environment*. **15** (8): 947-953. (CVIII)
- Joly, R. J.** 1985. Techniques for determining seedling water status and their effectiveness in assessing stress. En: Proceedings: Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major test. Ed. Duryea, M.L. Workshop held

- October 16-18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. pp: 17-28. (CVIII)
- Jones, T.L.; Gee, G.W.; Heller, P.R.** 1990. Psychrometric measurement of soil water potential: stability of calibration and test of pressure-plate samples. *Soil Science*. **150**: 535-541. (CVIII)
- Joslin, J.D.; Wolfe, M.H.; Hanson, P.J.** 2001. Factors controlling the timing of root elongation intensity in a mature upland oak stand. *Plant and Soil*. **228**: 201-212. (CVIII)
- Karyudi; Fletcher, R.J.** 2002. Osmoregulative capacity in birdseed millet under conditions of water stress. I. Variation in *Setaria italica* and *Panicum miliaceum*. *Euphytica*. **125**: 337-348. (CVIII)
- Karyudi; Fletcher, R.J.** 2003. Osmoregulation in birdseed millet under conditions of water stress. II. Variation in F3 of *Setaria italica* and its relationship to plant morphology and yield. *Euphytica*. **132**: 191-197. (CVIII)
- Kijne, J.W.; Taylor, S.A.** 1963. A constant temperature bath controlled with a precision of 0,001° centigrade. *Soil Science*. **27**: 110. (CVIII)
- Kirkham, M.B.** 2004. Measurement of water potential with thermocouple psychrometers. En: Plant-water relationships. Elsevier. pp: 241-262. (CI)
- Kitchen, J.H.; Thames, J.L.** 1972. Pulsed thermistor psychrometer for measuring vapor pressure differential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 113-119. (CVIII)
- Klute, A.** 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute, A. (ed). Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Monograph Number 9 (Second Edition). (Klute, A. ed.). ASA, Madison, WI. pp: 635-686. (CIII) (CV) (CIX) (CX)
- Klute, A.; Richards, L.A.** 1962. Effect of temperature on relative vapor pressure of water in soil: apparatus and preliminary measurements. *Soil Science*. **93**: 391-396. (CVIII)
- Knipling, E.B.; Kramer, P.J.** 1967. Comparison of the Dye method with the thermocouple psychrometer for measuring leaf water potentials. *Plant Physiology*. **42**: 1315-1320. (CVIII)
- Kobayashi, Y.; Tanaka, T.** 2001. Water low and hydraulic characteristics of Japanese red pine and oak trees. *Hydrological Processes*. **15**: 1731-1750. (CVIII)
- Koorevaar, P.; Janse, A.R.P.** 1972. Some design criteria of thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on

Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 74-83. (CVIII)

Kościelniak, J.; Filek, W.; Biesaga-Kościelniak, J. 2006. The effect of drought stress on chlorophyll fluorescence in *Lolium-Festuca* hybrids. *Acta Physiologiae Plantarum*. **28** (2): 149-158. (CVIII)

Kramer, P.J. 1972. Contributions of thermocouple psychrometers to plant science. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 187-193. (CVIII)

Kunz, M.; Da Silva, V.R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Kaiser, D.R.; Pellegrini, A. 2003. Determinação da capacidade de campo em diferentes níveis de compactação em um Latossolo Argiloso. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Ribeirão Preto, S.P. 13 a 18 julho 2003. (CVIII) (CXI)

Lal, R. 1979. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma*. **21**: 209-223. (CV)

Lambert, J.R.; van Schilfgaarde, J. 1965. A method of determining the water potential of intact plants. *Soil Science*. **100**: 1-9. (CVIII)

Lang, A.R.G. 1968. Psychrometric measurement of soil water potential *in situ* under cotton plants. *Soil Science*. **106** (6): 460-464. (CVIII)

Lang, A.R.G.; Trickett, E.S. 1965. Automatic scanning of Spanner and droplet psychrometers having outputs up to 30 μ V. *Journal Scientific Instruments*. **42**: 777-782. (CVIII)

Leong, E.-C.; Tripathy, S.; Rahardjo, H. 2003. Total suction measurement of unsaturated soils with device using the chilled-mirror dewpoint technique. *Géotechnique*. **53** (2): 173-182. (CVIII) (CX)

Ley, T.W.; Stevens, R.G.; Topielec, R.R.; Neibling, W.H. 2004. Soil water monitoring & measurement. *A Pacific Northwest Publication*. Washington State University. Fecha de consulta: 26/02/2004. Disponible en:
<http://cru.cahe.wsu.edu/CEPublications/pnw0475/pnw0475.html> (CIII)

Liu, H.H.; Dane, J.H. 1993. Reconciliation between measured and theoretical temperature effects on soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal*. **57**: 1202-1207. (CX)

Liu, M.Z.; Jiang, G.M.; Niu, S.L.; Li, Y.G.; Gao, L.M.; Ding, L.; Peng, Y. 2003. Photosynthetic response to soil water contents of an annual pioneer C4 grass (*Agriophyllum squarrosum*) in Hunshandak Sandland, China. *Photosynthetica*. **41** (2): 293-296. (CVIII)

- Livingston, N.J.** 1993. Soil water potential. En: Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Carter, M.R. Lewis Publishers. pp: 559-567. **(CIII) (CVIII) (CX)**
- Loik, M.E.** 2007. Sensitivity of water relations and photosynthesis to summer precipitation pulses for *Artemisia tridentata* and *Purshia tridentata*. *Journal of Plant Ecology Advance Access*. **191**: 95-108. **(CVIII)**
- López, F.** 2001. Cambio climático y desertificación, amenazas para la sostenibilidad de las tierras del Arco Mediterráneo: situación y perspectiva. *Revista Valenciana d'Estudis Autonòmics*. **36**: 93-116. **(CI)**
- López, J.; López, J.** 1985. El diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de campo y laboratorio. 4ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. **(CIII)**
- López, J.M.** 1980. Estructura y morfología agraria en la Terra Chá. Monografías de la Universidad de Santiago de Compostela. Nº 55. Departamento de Geografía. Universidad de Santiago de Compostela. **(CII)**
- López, R.** 1997. Estudio socioeconómico da Terra Chá. Diputación Provincial de Lugo. **(CII)**
- Lopushinsky, W.** 1972. A microwelder for the construction of thermocouple junctions of Peltier effect thermocouple psychrometers. En: Psychrometry in water relations research; Proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 84-87. **(CVIII)**
- Lopushinsky, W.** 1990. Seeling Moisture Status. En: Proceedings, Western Forest Nursery Association. Ed. Rose, R.; Campbell, S.J.; Landis, T. D. General Technical Report RM-200. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. pp: 123-138. **(CVIII)**
- Ludwig, F.; Dawson, T.E.; Kroon, H.; Berendse, F.; Prins, H.H.T.** 2003. Hydraulic lift in *Acacia tortilis* trees on an East African Savanna. *Oecologia*. **134**: 293-300. **(CVIII)**
- Llorente, P.** 2003. La importancia de los regadíos en el desarrollo rural. Jornada Autonómica de Castilla y León. Valladolid. **(CI)**
- Macías, F.; Calvo, R.** 2001. Los suelos. En: Atlas de Galicia I. Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal de Galicia. Consellería de Presidencia. Xunta de Galicia. pp:174-217. **(CII)**
- Machado, S.; Paulsen, G.M.** 2001. Combined effects of drought and high temperature on water relations of wheat and sorghum. *Plant and Soil*. **233**: 179-187. **(CVIII)**

- MacLean, H.A.; Yager, T.U.** 1972. Available water capacities of Zambian soils in relation to pressure plate measurements and particle size analysis. *Soil Science*. **113** (1): 23-29. (CV)
- Madsen, H.B.; Jensen, C.R.; Boysen, T.** 1986. A comparison of the thermocouple psychrometer and the pressure plate methods for determination of soil water characteristic curves. *Journal of Soil Science*. **37**: 357-362. (CVIII)
- Majerus, M.E.** 1975. Response of root and shoot growth of three grass species to decreases in soil water potential. *Journal of Range Management*. **28** (6): 473-476. (CVIII)
- Mannocchi, F., Mecarelli, P.** 1993. A soil-water-crop model for a large scale. Session III: Soil water flow and crop production under irrigation and drainage. En: 15th Congress on irrigation and drainage. The Hague. The Netherlands. (CIX)
- MAPA.** 1986. Métodos oficiales de análisis de suelos, aguas y plantas. Tomo III. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Servicio de Publicaciones. Madrid. (CIX)
- MAPA.** 1995. Métodos oficiales de análisis de suelos y agua de riego. MAPA. Madrid, España. (CIV) (CXI) (CXII)
- MAPA.** 2002. Plan Nacional de Regadíos. Horizonte 2008. (RD 329/2002, de 5 de abril, por le que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos. BOE nº 101, del 27 de abril de 2002). (CI)
- Mariani, L.; Jimenez, J.J.; Asakawa, N.; Thomas, R.J.; Decaëns, T.** 2007. What happens to eartworm cast in the soil?. A field study of carbon and nitrogen dynamics in Neotropical savannahs. *Soil Biology & Biochemistry*. **39**: 757-767. (CV)
- Marín, A.** 2003. Propuesta de indicadores ambientales de evaluación para el agua en la comarca de Terra Chá (Lugo). Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Santiago de Compostela. EPS. Lugo. (CII)
- Marin, F.R.; Angelocci, L.R.; Coelho Filho, M.A.; Villa Nova, N.A.** 2001. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agricola*. **58** (4): 839-844. (CVIII)
- Marion, J.M.; Or, D.; Rolston, D.E.; Kavvas, M.L.; Biggar, J.W.** 1994. Evaluation of methods for determining soil-water retentivity and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science*. **158** (1): 1-13. (CXI) (CXII)
- Martin, D.; Kincaid, D.; Lyle, W.** 2007. Design and operation of sprinkler systems. En: Design and operation of farm irrigation systems. Ed. Glenn J. Hoffman, Robert G. Evans, Marvin E. Jensen, Derrel L. Martin and Ronald L. Elliot. 2nd edition. ASABE, St. Joseph, MI, USA. pp: 557-631. (CIII)

- Martín de Santa Olalla , F.** 2001. Agricultura y desertificación. Mundi-Prensa. Madrid. (CI)
- Martín de Santa Olalla, F.** 2005. El uso del agua en el regadío: la gestión de los recursos hídricos. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. pp: 353-376. (CI)
- Martínez, J.; Ceballos, A.** 2001. Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafotransferencia. En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. pp: 45-50. (CVI) (CXI)
- Martínez, J.; Ceballos, A.; Casado, S.; Moran, C.** 2004. Estimación de propiedades hidrológicas de suelos y formaciones superficiales de dehesa mediante funciones de edafotransferencia. Benito, G.; Díez Herrero, A. (eds.) Contribuciones recientes sobre Geomorfología. Actas de la VII Reunión Nacional de Geomorfología. SEG y CSIC, Toledo, España. (CVI) (CXI)
- Martre, P.** 1999. Architecture hydraulique d'une tallede Féstouque Élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.). Implications pour les relations entre la transpiration et l'expansion foliaire. Thèse doctorale. Universite de Poitiers. Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées. (CVIII)
- Martre, P.; North, G.B.; Bobich, E.G.; Nobel, P.S.** 2002. Root deployment and shoot growth for two desert species in response to soil rockiness. *American Journal of Botany*. **89**: 1933-1939. (CVIII)
- Mattsson, A.** 1996. Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forest*. **13**: 223-248. (CVIII)
- McAneney, K.J.; Tanner, C.B.; Gardner, W.R.** 1979. An *in-situ* dewpoint hygrometer for soil water potential measurement. *Soil Science Society of America Journal*. **43**: 641-645. (CVIII)
- McBurney, T.; Costigan, P.A.** 1984. Rapid oscillations in plant water potential measured with a stem psychrometer. *Annals of Botany*. **54**: 851-853. (CVIII)
- McBurney, T.; Costigan, P.A.** 1987. Plant water potential measured continuously in the field. *Plant and Soil*. **97**: 145-149. (CVIII)
- McBurney, T.; Costigan, P.A.** 1988. Continuous measurement of plant water stress. IV International Symposium on Water Supply and Irrigation in the Open and under Protected Cultivation. ISHS Acta Horticulturae 228. (CVIII)
- McBratney, A.B; Minasny, B.; Cattle, S.R.; Vervoort, R.W.** 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. **109**: 41-73 (CXII)
- McDonough, W.T.** 1972. Grass seedling emergence as influenced by soil water potential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on

- Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 229-230. (CVIII)
- McKeague, J.A.** 1987. Estimating air porosity and available water capacity from soil morphology. *Soil Science Society of America Journal*. **51**: 148-152. (CVI)
- Meeuwig, R.O.** 1972. A low-cost thermocouple psychrometer recording system. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 131-135. (CVIII)
- Mehuys, G.R.; Stolzy, L.H.; Letey, J.; Weeks, L.V.** 1975. Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. **39**: 37-42. (CVIII)
- Melkonian, J.; Yu, L.-X.; Setter, T.L.** 2004. Chilling responses of maize (*Zea mays* L.) seedlings: root hydraulic conductance, abscisic acid, and stomatal conductance. *Journal of Experimental Botany*. **55** (403): 1751-1760. (CVIII)
- Mendonça, E.S.; Stott, D.E.** 2003. Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil. *Agroforestry Systems*. **57**: 117-125. (CVIII)
- Merva, G.E.; Kilic, N.** 1972. A multichannel facility for studying water potential distributions in the root zone under simulated field conditions. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp:159-164. (CVIII)
- Merrill, S.D.; Rawlins, S.L.** 1972. Field measurement of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Science*. **113**: 102-109. (CVIII) (CIX)
- Meyn, R.L.; White, R.S.** 1972. Calibration of thermocouple psychrometers: a suggested procedure for development of a reliable predictive model. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 56-64. (CVIII)
- Micucci, F.G.; Taboada, M.A.; Gil, R.** 2003. El agua en la producción de cultivos extensivos: El suelo como un gran reservorio eficiente. Fecha de consulta: 28/10/2003. Disponible en:
<http://www.elsitioagricola.com/articulos/micucci/ElAguaEnLaProduccionDeCultivosExtensivos-I.pdf>. (CIII)
- Michel, B.E.** 1977. A miniature stem thermocouple hygrometer. *Plant Physiology*. **60**: 645-647. (CVIII)

- Michel, B.E.** 1979. Correction of thermal gradient errors in stem thermocouple hygrometers. *Plant Physiology*. **63**: 221-224. (CVIII)
- Millar, A.A.; Lang, A.R.G.; Gardner, W.R.** 1970. Four-terminal Peltier type thermocouple psychrometer for measuring water potential in nonisothermal systems. *Agronomy Journal*. **62**: 705-708. (CVIII)
- Miller, C.J.; Yesiller, N.; Yaldo, K.; Merayyan, S.** 2003. Closure to “impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. **129** (12): 1169-1170. (CVIII)
- Miller, M.E.; Belnap, J.; Beatty, S.W.; Reynolds, R.L.** 2006. Performance of *Bromus tectorum* L. in relation to soil properties, water additions, and chemical amendments in calcareous soils of southeastern Utah, USA. *Plant and Soil*. **288**: 1-18. (CVIII)
- Minasny, B.** 2000. Efficient methods for predicting soil hydraulic properties. Doctoral Thesis. Department of Agricultural Chemistry and Soil Science, The University of Sydney, New South Wales, Australia. (CXI) (CXII)
- Minasny, B.; McBratney, A.B.** 2002. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. *Geoderma*. **107**: 55-70. (CXI) (CXII)
- Minasny, B.; McBratney, A. B.; Bristol, K. L.** 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*. **93**: 225-253. (CVI) (CXI) (CXII)
- Minasny, B.; McBratney, A.B.; Mendonça-Santos, M. de L.; Gonçalves dos Santos, H.** 2003. Revisão sobre funções de pedotransfêrencia (FPTs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos – CNPS, Rio de Janeiro, Brasil. (CVI) (CXI) (CXII)
- Mingo, D.M.; Theobald, J.C.; Bacon, M.A.; Davies, W.J.; Dodd, I.C.** 2004. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: enhancement of root growth. *Functional Plant Biology*. **31**: 971-978. (CVIII)
- Mittal, G.S.; Zhang, J.** 2003. Artificial neural network-based psychrometric predictor. *Biosystems Engineering*. **85** (3): 283-289. (CI)
- Mohamed, A.-MO.; Yong, R.N.; Cheung, S.C.H.** 1992. Temperature dependence of soil water potential. *ASTM Geotechnical Testing Journal*. **15** (4): 330-339. (CX)
- Mohsin, M.A., Ghildyal, B.P.** 1972. Design criteria of thermocouple psychrometers for water potential measurements in plants. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed.

- R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 68-73. (CVIII)
- Monteith, J.L.** 1954. Error and accuracy in thermocouple psychrometry. *Proceedings of the Physical Society*. **67**: 217-226. (CVIII)
- Moore, R.T.; Caldwell, M.M.** 1972. The field use of thermocouple psychrometers in desert soils. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 165-169. (CVIII) (CX)
- Moya, J.A.** 1986. Riego localizado a goteo y a pie. Ed. J.A. Moya Talens. Benissa. (CIII)
- Mullins, C.E.** 2001. Matric potential. En: Soil and Environmental Analysis: Physical Methods (2nd Edn). (Smith, K.A.; Mullins, C., eds). Marcel Dekker, New York, USA. pp: 65-93. (CIII) (CVIII) (CIX) (CX) (CXII)
- Mugabe, F.T.** 2004. Pedotransfer functions for predicting three points on the moisture characteristic curve of a Zimbabwean soil. *Asian Journal of Plants Sciences*. **3** (6): 679-682. (CXI)
- Mungur, R.; Wood, A.J.; Lightfoot, D.A.** 2006. Water potential is maintained during water deficit in *Nicotiana tabacum* expressing the *Escherichia coli* glutamate dehydrogenase gene. *Plant Growth Regulation*. **50**: 231-238. (CVIII)
- Nagy, V.; Štekauerová, V.; Nemenyi, M.** 2005. Securing water for agriculturally cultivated fields and forest ecosystems. Innovation and utility in the visegrad fours. En: Research and development from idea to product. Nyíregyháza, Hungary. (CXI)
- Narro, E.** 1994. Física de suelos. Con enfoque agrícola. Ed. Trillas. España. pp: 195. (CIII)
- Neira, X.; Cuesta, T.; Cancela, J.** 2004. Evolución de las grandes superficies regables. *Boletín informativo Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Galicia*. **6**: 2-4. (CII)
- Neira, X., Cuesta, T.; Cancela, J.; Dafonte, J.; Paz, A.** 2002. Indicadores ambientales y rehabilitación del regadío en Terra Chá. III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas. Sevilla. (CII)
- Neira, X.X.** 1994. Desenrolo de técnicas de manexo de auga axeitadas a un uso racional de regadíos. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo. (CII)
- Nelsen, C.E.; Safir, G.R.; Hanson, A.D.** 1978. Water potential in excised leaf tissue. Comparison of a commercial dew point hygrometer and a thermocouple

- psychrometer on soybean, wheat, and barley. *Plant Physiology*. **61**: 131-133. (CVIII)
- Nemes, A.** 2003. Multi-scale pedotransfer functions for Hungarian soils. Doctoral Thesis. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. (CVI) (CXI)
- Neumann, H.H.; Thurtell, G.W.** 1972. A Peltier cooled thermocouple dewpoint hygrometer for in situ measurement of water potentials. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 103-112. (CVIII)
- Nimmo, J.R.; Millar, E.E.** 1986. The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristic of soils. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 1105-1113. (CX)
- Niu, S.L.; Li, L.H.; Jiang, G.M.; Gao, L.M. ; Li, Y.G.; Peng, Y.; Liu, M.Z.** 2004. Gas exchange and chlorophyll fluorescence response to simulated rainfall in *Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*. *Photosynthetica*. **42** (1): 1-6. (CVIII)
- Nonami, H.; Boyer, J.S.** 1993. Direct demonstration of a growth-induced water potential gradient. *Plant Physiology*. **102** (1): 13-19. (CVIII)
- Oosterhuis, D.M.** 1987. A technique to measure the components of root water potential using screen-caged thermocouple psychrometers. *Plant and Soil*. **103**: 285-288. (CVIII)
- Oosterhuis, D.M.; Savage, M.J.; Walter, S.** 1983. Field use of *in situ* leaf psychrometers for monitoring water potential of a soybean crop. *Field Crops Research*. **7**: 237-248. (CVIII)
- Orfánus, T.** 2005. Regional processing of soil drought indicators: conditional hydrolimits and water storage capacity. En: INYS Workshop on Hydrology, Smolenice. (CI) (CIII) (CX) (CXI)
- Orfanus, T.; Mikulec, V.** 2005. Regionalization of potential water storage capacity of agricultural landscape-a quantification of soil accumulation function. *Geophysical Research Abstracts*. **7**. (CIII) (CX) (CXI) (CXII)
- Ortega, J.F.; de Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M.; López, E.** 2004. MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrigation Science*. **23**: 61-75. (CIX)
- Oster, J.D.; Rawlins, S.L.; Ingvalson, R.D.** 1969. Independent measurement of matric and osmotic potential of soil water. *Soil Science Society of America Proceedings*. **33**: 188-192. (CVIII)

- Otto, S.R.L.; Alcaide, M.** 2001. Utilização do método TDR-tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. **5** (2): 265-269. (CV)
- Ozier-Lafontaine, H.; Lafolie, F.; Bruckler, L.; Tournebize, R.; Mollier, A.** 1998. Modelling competition for water in intercrops: theory and comparison with field experiments. *Plant and Soil*. **204**: 183-201. (CI)
- Pachepsky, Ya.; Rawls, W.J.** 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. *Developments in Soil Science*. **30**. Elsevier. (CVI)
- Packer, P.E.** 1972. Use of thermocouple psychrometers in forestry. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 41-42. (CVIII)
- Papendick, R.I.; Cochran, V.L.; Woody, W.M.** 1971. Soil water potential and water content profiles with wheat under low spring and summer rainfall. *Agronomy Journal*. **63**: 731-734. (CVIII)
- Passioura, J.B.** 2001. Plant-water relations. *Encyclopedia of Life Sciences (on line)*. pp: 1-7. (CVIII) (CX)
- Patrick, P.K.; Olsen, H.W.; Higgins, J.D.** 2007. Comparison of chilled-mirror measurements and filter paper estimates of total soil suction. *Geotechnical Testing Journal*. **30** (5): 360-367. (CVIII) (CX)
- Paz, A.; Neira, X.X.; Castelao, A.** 1996. Soil water regime under pasture in the humid zone of Spain: Validation of an empirical model and prediction of irrigation requirements. *Agricultural Water Management*. **29** (2): 147-161. (CIX)
- Peck, A.J.** 1960. Change of moisture tension with temperature and air pressure: theoretical. *Soil Science*. **6**: 303-310. (CX)
- Peck, A.J.** 1968. Theory of the Spanner psychrometer, 1. The thermocouple. *Journal of Agricultural Meteorology*. **5**: 433-447. (CVIII)
- Peck, A.J.** 1969. Theory of the Spanner psychrometer, 2. Sample effects and equilibration. *Journal of Agricultural Meteorology*. **6**: 111-124. (CVIII)
- Peláez, D.V.; Bóo, R.M.** 1987. Plant water potential for shrubs in Argentina. *Journal of Range Management*. **40** (1): 6-9. (CVIII)
- Pereira, L.S.; Teodoro, P.R.; Rodrigues, P.N.; Teixeira, J.L.** 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. En: Rossi, G.; Cancelliere, A.; Pereira, L.S.; Oweis, T.; Shatanawi, M.; Zairi, A. (eds). Tools for drought mitigation in Mediterranean regions. Kluwer, Dordrecht. The Netherlands. (CIX)

- Perfect, E.; Sukop, M.C.; Haszler, G.R.** 2002. Prediction of dispersivity for undisturbed soil columns from water retention parameters. *Soil Science Society of America Journal*. **66**: 696–701. **(CIX)**
- Perfect, E.; Kenst, A.B.; Diaz-Zorita, M.; Grove, J.H.** 2004. Fractal analysis of soil water desorption data collected on disturbed samples with water activity meters. *Soil Science Society of America Journal*. **68**: 1177-1184. **(CVIII) (CIX) (CX)**
- Peters, D.B.** 1965. Water availability. En: *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical properties. Including statistic of measurement and sampling.* Agronomy n° 9. Part. I. American Society of Agronomy. Ed. Black, C.A.; Evans, D.D.; White, J.L.; Ensminger, L.E. Clark, F.E. pp: 279-285. **(CIII)**
- Petersen, R.G.; Calvin, L.D.** 1986. Sampling. En: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Monograph Number 9 (Second Edition).* (Klute, A. ed.). ASA, Madison, WI. pp: 33-51. **(CIV)**
- Petry, T.M.; Jiang, C.P.** 2003. Evaluation and Utilization of the WP4 Dewpoint PotentiaMeter Phase I & II. Center for Infrastructure Engineering Studies. University Transportation Center Program at The University of Missouri-Rolla. **(CVIII) (CX)**
- Phene, C.J.; Clark, D.A.; Cardon, G.E.; Mead, R.M.** 1992. Soil matric potential sensor research an applications. En: *Advances in measurement of soil physical properties: bringin theory into practice.* Soil Science Society of America. Special publication. **30**: 263-280. **(CIII)**
- Pineda, C.; Viloría, J.** 1992. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la Cuenca del Lago de Valencia. *Revista Venesuelos*. **1-2**: 39-44. **(CIII) (CVI)**
- Pizarro, F.** 1987. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, microaspersión, exudación. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España. **(CIII)**
- Plá, I.** 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Alcance*. Revista de la Facultad de Agronomía. UCV Maracay-Venezuela. **32**: 66-73. **(CV)**
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C.** 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España. **(CIII) (CV) (CX)**
- Powell, R.W.** 1936. The use of thermocouples for psychrometric purposes. *Proceedings of the Physical Society*. **48**: 406-414. **(CVIII)**
- Puckett, W.; Dane, J.H.; Hajek, B.F.** 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. **49**: 831-836. **(CV)**

- Quemada, M; Cabrera, M.L.** 1997. Temperature and moisture effects on C and N mineralization from surface applied clover residue. *Plant and Soil*. **189**: 127-137. (CVIII)
- Quemada, M; Cabrera, M.L.** 2002. Characteristic moisture curves and maximum water content of two crop residues. *Plant and Soil*. **238**: 295-299. (CVIII)
- Rajkai, K.; Kabos, S.; van Genuchten, M.T.** 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil & Tillage Research*. **79**: 145-152. (CXI) (CXII)
- Ramil, P.; Vazquez, L.; Gómez-Orellana, L.; Rodríguez, M.A.; Rubinos, M.; Cillero, C.** 2005. LIC Parga-Ladra-Támoga. Terras de pedra e auga. INLUDES-Deputación Provincial de Lugo. (CII)
- Rawlins, S.L.** 1964. Systematic error in leaf water potential measurements with a thermocouple psychrometer. *Science*. **146**: 644-646. (CVIII)
- Rawlins, S.L.** 1966. Theory for thermocouple psychrometers used to measure water potential in soil and plants samples. *Journal of Agricultural Meteorology*. **3**: 293-310. (CVIII)
- Rawlins, S.L.** 1972. Theory of thermocouple psychrometers for measuring plant and soil water potential. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 43-50. (CVIII)
- Rawlins, S.L.; Campbell, G.S.** 1986. Water potential: Thermocouple Psychrometry. En: Klute, A. (ed). Methods of soil analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Monograph Number 9 (Second Edition). ASA, Madison, WI. pp: 597-618. (CVIII) (CIX)
- Rawlins, S.L.; Dalton, F.N.** 1967. Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control. *Soil Science Society of America Proceedings*. **31**: 297-301. (CVIII)
- Rawlins, S.L.; Gardner, W.R.; Dalton, F.N.** 1968. In situ measurement of soil and plant leaf water potential. *Soil Science Society of America Proceedings*. **32**: 468-470. (CVIII)
- Rawls, W.J.** 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science*. **135** (2): 123-125. (CVI)
- Rawls, W.J.; Gish, T.J.; Brakensiek, D.L.** 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Advances Soil Science*. **16**: 213-234. (CVI) (CXI)

- Reynolds, J.F.; Kemp, P.R.; Tenhunen, J.D.** 2000. Effects of long-term rainfall variability on evaporation and soil water distribution in the Chihuahuan Desert: a modelling analysis. *Plant Ecology*. **150**: 145-159. (CVIII)
- Richards, B.G.** 1965. Thermistor hygrometer for determining the free energy of moisture in unsaturated soils. *Nature*. **208**: 608-609. (CVIII)
- Richards, L.A.** 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*. **66**: 105-110. (CV)
- Richards, L.A.** 1949a. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*. **68**: 95-112. (CIII)
- Richards, L.A.** 1949b. Methods of mounting porous plates used in soil moisture measurements. *Agronomy Journal*. **41**: 489-490. (CV)
- Richards, L.A.** 1965. Metallic conduction for cooling a thermocouple psychrometer bath. *Soil Science*. **100** (1): 20-24. (CVIII)
- Richards, L.A.; Decker, D.L.** 1963. Difficulties with electrolytic-resistance hygrometers at high humidity. *Soil Science Society of America Proceedings*. **27**: 481. (CVIII)
- Richards, L.A., Fireman, M.** 1943. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science*. **56**: 395-404. (CV) (CXII)
- Richards, L.A.; Ogata, G.** 1958. Thermocouple for vapour pressure measurement in biological and soil systems at high humidity. *Science*. **128**: 1089-1090. (CVIII)
- Richards, L.A.; Ogata, G.** 1961. Psychrometric measurements of soil samples equilibrated on pressure membranes. *Soil Science Society of America Proceedings*. **25**: 456-459. (CVIII)
- Richards, L.A.; Weaver, L.R.** 1943. Fifteen atmosphere percentages as related to the permanent wilting percentage. *Soil Science*. **56**: 331-339. (CIX)
- Río, F.J.** 1962. Notas para el estudio de la economía ganadera de la Terra Chá. Revista de economía de Galicia. Ed. Galaxia. (CII)
- Río, F.J.** 2000. Galicia, esa desconocida. Hércules de Ediciones, S.A. (CII)
- Rodrigues, O.; Didonet, A.D.; Roman, E.S.** 2003. Avaliação do potencial hídrico foliar em plantas de trigo. *Embrapa Trigo. Circular Técnica Online*. Ministerio da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **15**. Disponible en: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ci/p_ci15.htm (CVIII) (CXII)
- Rodríguez, A.** 2004. Comparación del psicrómetro con la placa de presión como métodos de análisis de retención de agua útil en distintos tipos de suelo. TIT. Departamento

de Ingeniería Agroforestal (EPS). Universidad de Santiago de Compostela. Lugo. (CII) (CV) (CVII) (CVIII) (CX) (CXI) (CXII)

Romero, E.; Gens, A.; Lloret, A. 2001. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay. *Geotechnical and Geological Engineering*. **19** (3-4): 311-332. (CX)

Romero, E.E. 1999. Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated boom clay: an experimental study. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports. Barcelona. (CVIII)

Romero, M.I.; Ramil, P.; Amigo, J.; Rodriguez, M.A.; Rubinos, M. 2004. Notas sobre la flora de humedales del noroeste ibérico. *Botanica Complutensis*. **28**: 61-66. (CII)

Rossato, G.; Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Paulette, E.A.; Spinelli, L.F. 2002. Estimativa de retenção e água a partir de atributos do solo. En: IV Reunião Sul brasileira de Ciencia do solo. Porto Alegre, Brasil. (CVI) (CXI)

Rowell, D.L. 1994. Soil Science. Methods and applications. Longman, Scientific and technical. England. (CIII)

Rubio, C. 2005. Hidrodinámica de los suelos de un área de montaña media mediterránea sometida a cambios de uso y cubierta. Tesis Doctoral. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera". Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España. (CXI) (CXII)

Rubio, C.; Llorens, P. 2003. Evaluación del uso de funciones de edafotransferencia para la determinación de propiedades hidrodinámicas en suelos franco-limosos (Cuencas experimentales de Vallcebre, Alt Llobregat). En: J.J. López, M. Quemada (Eds.) Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. pp: 137-142. (CVI) (CXI)

Rubio, C.M.; Llorens, P.; Gallart, F. 2008. Uncertainty and efficiency of pedotransfer functions for estimating water retention characteristics of soils. *European Journal of Soil Science*. **59**: 339-347. (CXII)

Ruiz, D.; Darmody, R. 2004. Illinois river dredged sediment and biosolids used as greenhouse soil mixtures. Project Report. Natural Resources and Environmental Sciences University of Illinois Urbana-Champaign. (CVIII)

Ruiz, M.E.; Utset, A.; Medina, H.; Fleitas, E. 2002. Algunos aspectos sobre la curva de tensión de humedad. Monografía Ciencias Básicas. Universidad Agraria de la Habana. Cuba. (CIII)

Ryel, R.J.; Caldwell, M.M.; Yoder, C.K.; Or, D. 2002. Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia Tridentata*: evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model. *Oecologia*. **130**: 173-184. (CVIII)

- Ryel, R.J.; Leffler, A.J.; Peek, M.S.; Ivans, C.Y.; Cladwell, M.M.** 2004. Water conservation in *Artemisia tridentata* through redistribution of precipitation. *Oecologia*. **141**: 335-345. (CVIII)
- Salchow, E.; Lala, R.; Fausey, N.R.; Ward, A.** 1996. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. *Geoderma*. **73**: 165-181. (CVI)
- Salgado, E.** 2001. Curso: Relación suelo, agua, planta. Ed. Universitarias de Valparaíso. Universidad Católica de Valparaíso. Chile. (CIII)
- Samingan, S.; Schanz, T.** 2005. Comparison of four methods for measuring total suction. *Vadose Zone Journal*. **4**: 1087-1095. (CVIII)
- Santé, I.** 2005. Diseño de una metodología y de un sistema de ayuda a la decisión espacial para la planificación de los recursos del suelo rural. Aplicación a la Comarca de Terra Chá. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (EPS). Lugo. (CII)
- Santi, G.R.; Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Pauletto, E.A.; Spinelli-Pinto, L.F.** 2002. Estimativa da retenção de água a partir de atributos do solo. IV Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo. Porto Alegre, R.S. 14 a 16 outubro 2002. (CVIII)
- Savage, M.J.; Cass, A.** 1984a. Measurement errors in field calibration of *in situ* leaf psychrometers. *Crop Science*. **24**: 371-372. (CVIII)
- Savage, M.J.; Cass, A.** 1984b. Measurement of water potential using *in situ* thermocouple hygrometers. *Advances in Agronomy*. **37**: 73-126. (CVIII)
- Savage, M.J.; Cass, A.; de Jager, J.M.** 1983a. Statistical assessment of some errors in thermocouple hygrometric water potential measurement. *Journal of Agricultural Meteorology*. **30**: 83-97. (CVIII)
- Savage, M.J.; Ritchie, J.T.; William, L.B.; William, A.D.** 1996. Lower limit of soil water availability. *Agronomy Journal*. **88**: 644-651. (CIX)
- Savage, M.J.; Wiebe, H.H.** 1987. Voltage endpoint determination for thermocouple psychrometers and the effect of cooling time. *Agricultural and Forest Meteorology*. **39**: 309-317. (CVIII)
- Savage, M.J.; Wiebe, H.H.; Cass, A.** 1983b. *In situ* field measurement of leaf water potential using thermocouple psychrometers. *Plant Physiology*. **73**: 609-613. (CVIII)
- Saxton, K.E.; Rawls, W.J.; Romberger, J.S.; Papendick, R.I.** 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*. **50**: 1031-1036. (CVI)

- Scanlon, B.R.; Andraski, B.J.; Bilskie, J.** 2002. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. En: Dane, J.H.; Topp, G.C. (eds.). *Methods of soil analysis, part 4, physical methods*. SSSA, Madison, WI. pp: 643-670. (CIII) (CVIII) (CIX) (CX)
- Scanlon, B.R.; Goldsmith, R.S.** 1997. Field study of spatial variability in unsaturated flow beneath and adjacent to playas. *Water Resources Research*. **33** (10): 2239–2252. (CVIII)
- Scanlon, B.R.; Tyler, S.W.; Wierenga, P.J.** 1997. Hydrologic issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport. *Reviews of Geophysics*. **35** (4): 461-490. (CVIII) (CIX) (CX)
- Schaap, M.G.; Leij, F.J.; van Genuchten, M.T.** 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. **251**: 163-176. (CVI)
- Schaefer, N.L.; Trickett, E.S.; Ceresa, A.; Barrs, H.D.** 1986. Continuous monitoring of plant water potential. *Plant Physiology*. **81**: 45-49. (CVIII)
- Schimmelpfennig, H.** 1972. Semi-automatic thermocouple psychrometer readout. En: *Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers*. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 120-122. (CVIII)
- Scholz, F.; Bucci, S.J.; Goldstein, G.; Meinzer, F.C.; Franco, A.C.; Miralles-Wilhelm, F.** 2007. Biophysical properties and functional significance of stem water storage tissues in Neotropical savanna trees. *Plant, Cell and Environment*. **30**: 236-248. (CVIII)
- Schoonmaker, A.L.; Teste, F.P.; Simard, S.W.; Guy, R.D.** 2007. Tree proximity, soil pathways and common mycorrhizal networks: their influence on the utilization of redistributed water by understory seedlings. *Oecologia*. **154** (3): 455-466. (CVIII)
- Scotter, D.R.** 1972. The theoretical and experimental behaviour of a Spanner psychrometer. *Journal of Agricultural Meteorology*. **10**: 125-136. (CVIII)
- Serpe, M.D.; Orm, J.M.; Barkes, T.; Rosentreter, R.** 2006. Germination and seed water status of four grasses on moss-dominated biological soil crusts from arid lands. *Plant Ecology*. **185**: 163-178. (CVIII)
- Servicio de Conservación de Suelos.** 1976. Relación entre suelo-planta-agua. Departamento de Agricultura de USA. (CIII)
- Shackel, K.A.** 1984. The theoretical and experimental error for *in situ* measurements of plant water potential. *Plant Physiology*. **75**: 766-772. (CVIII)

- Shackel, K.A.** 1987. Direct measurement of turgor and osmotic potential in individual epidermal cells. Independent confirmation of leaf water potential as determined by in situ psychrometry. *Plant Physiology*. **83**: 719-722. (CVIII)
- Shah, N.H.; Paulsen, G.M.** 2003. Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. *Plant and Soil*. **257**: 219-226. (CVIII)
- Shepherd, W.** 1973. Moisture absorption by some instrument materials. *The Review of Scientific Instruments*. **44** (2): 234. (CVIII)
- Shock, C.C.** 2003. Soil water potential measurement by granular sensors. En: Encyclopedia of Water Science. pp: 899-903. (CIII)
- Shock, C.C.** 2004. Instrumentation for soil moisture determination. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en:
<http://www.cropinfo.net/AnnualReports/1997/instrumentation.wq.html> (CIII)
- Siddique, M.R.B.; Hamid, A.; Islam, M.S.** 2000. Drought stress effects on water relations of wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*. **41**: 35-39. (CVIII)
- Sinowski, W.; Scheinost, A.C.; Auerswald, K.** 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function. *Geoderma*. **78**: 145-159. (CVI)
- Skalová, J.; Štekauerová, V.; Šútor, J.** 2000. Využitie pedotransferných funkcií na určenie hydrolimitov (Estimation of the hydrolimits using pedotransfer functions). Bioklimatológia a životné prostredie. In XIII. Bioklimatologická konferencia SBkS a ČBkS. Košice, Eslovaquia. (CIII) (CX) (CXI)
- Skierucha, W.** 2005. Design and performance of psychrometric soil water potential meter. *Sensor and Actuators A*. **118**: 86-91. (CVIII)
- Smith, D.M.; Jarvis, P.G.; Odongo, J.C.W.** 1998. Management of windbreaks in the Sahel: the strategic implications of tree water use. *Agroforestry Systems*. **40**: 83-96. (CVIII)
- Smith, R.E.** 1993. Simulation of crop water balance with Opus. Session III: Soil water flow and crop production under irrigation and drainage. En: 15th Congress on irrigation and drainage, The Hague, The Netherlands. (CIX)
- Soil and Plant analysis Council, Inc.** 2000. Soil analysis. Handbook of reference methods. CRC. Press, USA. (CIV)
- Solano, J.E.; Reichert, J.M.; Reinert, D.V.; Satin, G.; Sequinatto, L.** 2002. Equações de pedotransferência para estimativa do ponto de murcha permanente (PMP) em solos do Rio Grande do Sul. XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Cuiabá, M.T. 21 a 26 julho 2002. (CVI) (CVIII) (CXI)

- Soto, B.; Arias, M.; Diaz-Fierros, F.** 2001. Desarrollo de una función de pedotransferencia para los suelos de Galicia (NW Spain). *Agrochimica*. **XLV** (5-6): 178-188. **(CI) (CVI) (CXI) (CXII)**
- Spanner, D.C.** 1951. The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *Journal of Experimental Botany*. **11**: 145-168. **(CVIII) (CX)**
- Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006a. Methodology for determination of osmotic suction of soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. **24**: 1469-1479. **(CVIII) (CX)**
- Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006b. Nonlinear curve-fitting procedures for developing soil-water characteristic curves. *Geotechnical Testing Journal*. **29** (5): 409-418. **(CVIII) (CX)**
- Štekauerová, V.; Skalová, J.; Šútor, J.** 2002. Using of pedotransfer functions for assessment of hydrolimits. *Rostlinná Výroba*. **48**: 407-412. **(CIII) (CX) (CXI) (CXII)**
- Stevens, A.F.; Acock, B.** 1976. A thermocouple psychrometer with a rapid automatic scanning and digital printout of 100 channels. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. **9**: 1058-1062. **(CVIII)**
- Stričević, R.; Čaki, E.** 1997. Relationships between available soil water and indicators of plant water status of sweet sorghum to be applied in irrigation scheduling. *Irrigation Science*. **18**: 17-21. **(CIX)**
- Sun, J.; Edwards, G.E.; Okita, T.W.** 1999. Feedback inhibition of photosynthesis in rice measured by O₂ dependent transients. *Photosynthesis Research*. **59**: 187-200. **(CVIII)**
- Tan, K.H.** 1996. Soil sampling, preparation and analysis. Marcel Dekker, Inc, USA. pp: 56- 72. **(CV)**
- Tarjuelo, J.M.** 1995. El riego por aspersión y su tecnología. Ed. Mundi-Prensa. España. **(CIII)**
- Taylor, S.A.** 1958. The activity of water in soils. *Soil Science*. **86**: 83-90. **(CX)**
- Thakur, V.K.S.; Sreedeeep, S.; Singh, D.N.** 2006. Laboratory investigations on extremely high suction measurements for fine-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. **24**: 565-578. **(CVIII) (CX)**
- Thompson, L.M.; Troeh, F.R.** 1988. Los suelos y su fertilidad. Ed. Reverté, S.A. Barcelona. **(CIII)**
- Tietje, O.; Tapkenhinrichs, M.** 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Science Society of America Journal*. **57**: 1088-1095. **(CVI) (CXI)**

- Tokunaga, T.K.; Olson, K.R.; Wan, J.** 2003. Moisture characteristics of Hanford gravels: Bulk, grain-surface, and intragranular components. *Vadose Zone Journal*. **2**: 322-329. (CIX)
- Tomasella, J.; Hodnet, M.G.** 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*. **163** (3): 190-202. (CVI)
- Tomasella, J.; Pachepsky, Ya.; Crestana, S.; Rawls, W.J.** 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*. **67**: 1085-1092. (CXII)
- Topp, G.C.; Galvanov, Y.T.; Ball, B.C.; Carter, M.R.** 1993. Soil water desorption curves. En: *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Carter, M.R. Lewis Publishers. (CIII) (CV)
- Topp, G.C.; Reynolds, W.D.; Cook, F.J.; Kirby, J.M.; Carter, M.R.** 1997. Physical attributes of soil quality. En: *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Developments in Soil Science. **25**. Elsevier. (CIII)
- Tournebize, J.; Kao, C.; Nikolic, N.; Zimmer, D.** 2004. Adaptation of the STICS model to surface drained soils. *Agronomie*. **24**: 305-313. (CI)
- Townend, J.; Reeve, M.J.; Carter, A.** 2001. Water release characteristic. En: Smith, K.A.; Mullins, C. (eds). *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (Second Edition). Marcel Dekker, New York, NY. pp: 95-140. (CIII) (CIX)
- Trautmann, N.M.; Potter, K.S.** 1998. Water and the soil. Natural Resources Cornell Cooperative Extension. Cornell University. (CIII)
- Trouche, G.; Morlon, P.** 1999. Comparaison de diferentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (RU) dans le périmètre de l'OGAF. Environnement de la zone de Migennes (Yonne). *Étude et Gestion des Sols*. **6** (1): 41-54. (CVI)
- Turner, N.C.** 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil*. **58**: 339-366. (CVIII)
- Turner, N.C.; Schulze, E.-D.; Gollan, T.** 1984a. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. I. Species comparisons at high soil water contents. *Oecologia*. **63**: 338-342. (CVIII)
- Turner, N.C.; Schulze, E.-D.; Gollan, T.** 1985. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous species *Helianthus annuus*. *Oecologia*. **65**: 348-355. (CVIII)
- Turner, N.C.; Shackel, K.A.; Le Coultre, I.F.** 2000. Leaf-cutter psychrometers. *Agronomy Journal*. **92**: 538-541. (CVIII) (CXII)

- Turner, N.C.; Spurway, R.A.; Schulze, E.D.** 1984b. Comparison of water potentials measured by *in situ* psychrometry and pressure chamber in morphologically different species. *Plant Physiology*. **74**: 316-319. (CVIII)
- Tyree, M.T.; Vargas, G.; Engelbrecht, B.M.J.; Kursar, T.A.** 2002. Drought until death do us part: a case study of the desiccation-tolerance of a tropical moist forest seedling-tree, *Licania platypus* (Hemsl.) Fritsch. *Journal of Experimental Botany*. **53** (378): 2239-2247. (CVIII)
- USDA.** 2004. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>. (CIV) (CIX) (CXI) (CXII) (AIII)
- van den Berg, M.; Klamt, E.; van Reeuwijk, L.P.; Sombroek, W.G.** 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics for Ferrasols and related soils. *Geoderma*. **78**: 161-180. (CI)
- Vanderlinden, K.; Giradles, J.V.; van Meirvenne, M.** 2003. Evaluación de la capacidad de retención de agua de los suelos de Andalucía mediante el análisis del balance medio anual del agua. En: J.J. López, M. Quemada (Eds.). Zona no saturada. Investigaciones. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, España. pp: 131-136. (CVI) (CXI)
- Vander Willigen, C.; Pammenter, N.W.; Mundree, S.; Farrant, J.** 2001. Some physiological comparisons between the resurrection grass, *Eragrostis nindensis*, and the related desiccation-sensitive species, *E. curvula*. *Plant Growth Regulation*. **35**: 121-129. (CVIII)
- van Genuchten, M.T.** 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. **44** (5): 892-898. (CIX)
- van Haveren, B.P.; Brown, R.W.** 1972. The properties and behaviour of water in the soil-plant-atmosphere continuum. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 1-27. (CVIII)
- Vereecken, H.** 1988. Pedotransfer functions for the generation of hydraulic properties for belgian soils. Doctoral Thesis. Katholieke Universiteit te Leuven. Faculteit de Landbouwwetenschappen. Dissertaciones de Agricultura. (CXII)
- Vereecken, H.** 1995. Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties. *Geoderma*. **65**: 81-92. (CI)
- Vereecken, H., Diels, J.; Van Orshoven, J.; Feyen, J.; Bouma, J.** 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. **56**: 1371-1378. (CXII)

- Villar, J.M.; Ferrer, F.** 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. En: Agua y agronomía. Ed. Mundi-Prensa. pp: 23-86. (CI) (CIII) (CVI) (CVIII) (CX)
- Vogt, U.K.** 2001. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. and *Sambucus nigra* L. *Journal of Experimental Botany*. **52** (360): 1527-1536. (CVIII)
- Waister, P.D.** 1965. Precision of thermocouple psychrometers for measuring leaf water potential. *Nature*. **205**: 922-923. (CVIII)
- Walczack, R.T.; Moreno, F.; Stawiński, C.; Fernández, E.; Arue, J.L.** 2006. Modelling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology*. **329**: 527-533. (CI) (CIII)
- Walker, S; Oosterhuis, D.M.; Savage, M.J.** 1983. Field use of screen-caged thermocouple psychrometers in sample chambers. *Crop Science*. **23**: 627-632. (CVIII)
- Walker, S.; Oosterhuis, D.M.; Wiebe, H.H.** 1984. Ratio of cut surface area to leaf sample volume for water potential measurements by thermocouple psychrometers. *Plant Physiology*. **75**: 228-230. (CVIII)
- Wang, F.; Fraisse, C.W.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.** 2003. Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri clypan soils. *Agricultural Systems*. **76**: 985-1005. (CVI) (CXI) (CXII)
- Warkentin, B.P.** 1991. Protección de la calidad del agua subterránea a través de un riego eficiente. Ceremonia Inaugural Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua. Fecha de consulta: 23/03/2008. Disponible en: www.unesco.org/uy/phi/libros/uso_eficiente/indice.html (CIII)
- Wecksler, O.S.** 1963. Electric butt-welding of platinum wires. *Journal of Scientific Instruments*. **40**: 543. (CVIII)
- Wheeler, M.L.; Qashu, H.K.; Evans, D.D.** 1972. Psychrometric measurements of water potential under desert conditions. En: Psychrometry in water relations research; proceedings of the Symposium on Thermocouple Psychrometers. Ed. R.W. Brown and B. P. van Haveren. Utah Agric. Exp. Stn. Utah State Univ. Logan. pp: 171-174. (CVIII)
- Wiebe, H.H.** 1981. Measuring water potential (activity) from free water to oven dryness. *Plant Physiology*. **68**: 1218-1221. (CVIII)
- Wiebe, H.H.** 1984. Water condensation on Peltier-cooled thermocouple psychrometers: a photographic study. *Agronomy Journal*. **76**: 166-168. (CVIII)

- Wiebe, H.H.; Brown, R.W.** 1979. Temperature gradient effects on *in situ* hygrometer measurements of soil water potential. II. Water movement. *Agronomy Journal*. **71**: 397-401. (CVIII)
- Wiebe, H.H.; Brown, R.W.; Barker, J.** 1977. Temperature gradient effects on *in situ* hygrometer measurements of water potential. *Agronomy Journal*. **69**: 933-939. (CVIII) (CX)
- Wiebe, H.H.; Brown, R.W.; Daniel, T.W.; Campbell, E.** 1970. Water potential measurements in trees. *Bioscience*. **20**: 225-226. (CVIII)
- Wikberg, J.; Ögren, E.** 2004. Interrelationships between water use and growth traits in biomass-producing willows. *Trees*. **18**: 70-76. (CVIII)
- Wild, A.** 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. (CIII)
- Williams, R.D.; Ahuja, L.R.; Naney, J.W.** 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density, and limited data. *Soil Science*. **153** (3): 172-184. (CXI)
- Wösten, J.H.M.** 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. En: E.G. Gregorich, M.R. Carter (Eds). Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science. **25**. Elsevier. (CVI) (CXI)
- Wösten, J.H.M.; Finke, P.A.; Cansen, M.J.W.** 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*. **66**: 227-237. (CXII)
- Wraith, J.M.; Or, D.** 2001. Soil water characteristic determination from concurrent water content measurements in reference porous media. *Soil Science Society of America Journal*. **65**: 1659-1666. (CV)
- Wu, Y.; Jeong, B.-R.; Fry, S.C.; Boyer, J.S.** 2005. Change in XET activities, cell wall extensibility and hypocotyl elongation of soybean seedlings at low water potential. *Planta*. **220**: 593-601. (CVIII)
- Wullschleger, S.D.; Dixon, M.A.; Oosterhuis, D.M.** 1988. Field measurement of leaf water potential with a temperature-corrected *in situ* thermocouple psychrometer. *Plant, Cell and Environment*. **11**: 199-203. (CVIII) (CX)
- Xanthopoulos, G.** 2002. Sap Pressure (Plant Water Potential) Measurement: Method. EUFIRELAB: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a “wall-less” Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region. pp: 21. (CVIII)
- Xunta de Galicia.** 1993. Plan de Desenvolvemento Comarcal. Terra Chá. Gabinete de Planificación e Desenvolvemento Territorial. Presidencia. Xunta de Galicia. (CII)

- Xunta de Galicia.** 2004. Anuario de estadística agrária. Consellería de Medio Rural. **(CII)**
- Yamada, H.; Takechi, K.; Hoshi, A.; Amano, S.** 2004. Comparison of water relations in watercored and non-watercored apples induced by fruit temperature treatment. *Scientia Horticulturae*. **99**: 309-318. **(CVIII)**
- Yoder, C.K.; Nowak, R.S.** 1999. Hydraulic lift among native species in the Mojave Desert. *Plant and Soil*. **215**: 93-102. **(CVIII)**
- Zairi, A.; El Amani, H.; Slatni, A.; Derouiche, A.; Pereira, L.S.; Rodrigues, P.; Teixeira, J.L.** 2000. Irrigation scheduling strategies for horticultural field crops under limited water availability. En: Ferreira, M.I.; Jones, H.G. (eds). Proceedings of the Third International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (Estoril, Jun-Jul 1999), Acta Horticulturae n° 537, ISHS, Leuven. pp: 503-510. **(CIX)**
- Zanstra, P.E.; Hagenzieker, F.** 1977. Comments of the psychrometric determination of leaf water potentials *in situ*. *Plant and Soil*. **48**: 347-367. **(CVIII)**
- Zazueta, F.S.; Xin, J.** 1994. Soil moisture sensors. Florida Cooperative Extension Service. Bulletin 292. April 1994. University of Florida. **(CIII) (CX)**
- Zhang, S.; Lövdahl, L.; Grip, H.; Tong, Y.** 2007. Soil hydraulic properties of two loess soils in China measured by various field-scale and laboratory methods. *Catena*. **69**: 264-273. **(CV)**
- Zollinger, W.D.; Campbell, G.S.; Taylor, S.A.** 1966. A comparison of water-potential measurements made using two types of thermocouple psychrometer. *Soil Science*. **102** (4): 231-239. **(CVIII)**
- Zou, C.B.; Barnes, P.W.; Archer, S.; McMurtry, C.R.** 2005. Soil moisture redistribution as a mechanism of facilitation in Savanna tree-shrub clusters. *Oecologia*. **145**: 32-40. **(CVIII)**
- Zou, C.; Penfold, C.; Sands, R.; Misra, R.K.; Hudson, I.** 2001. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. *Plant and Soil*. **236**: 105-115. **(CVIII)**
- Zou, C.; Sands, R.; Sun, O.** 2000. Physiological responses of radiata pine roots to soil strength and soil water deficit. *Tree Physiology*. **20**: 1205-1207. **(CVIII)**
- Zúñiga, F.B.; Palacio, A.G.** 2005. Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán. Instituto Nacional de Ecología. México. **(CIII)**

❖ **Comunicaciones personales.**

- Petry, T.** Evaluation and utilization of the WP4. petry@umr.edu. Fecha de consulta: 25/02/2005. **(CX)**

❖ **Referencias páginas web.**

<http://www.gva.es/cidaj/cas/c-normas/constitucion.pdf> Constitución Española. Fecha de consulta: 10/03/2008. **(CI)**

<http://www.terrachanaturalmente.com/principal.htm> Portal informativo de la Comarca de Terra Chá. Fecha de consulta: 03/02/08. **(CII)**

<http://www.geoscopio.com/escaparate/portada.cgi?idempresa=26510> Comunidad de regantes Río Miño-Pequeño-Terra Chá. Fecha de consulta: 03/02/08. **(CII)**

http://www.concienciarural.com.ar/Articulos/Suelos/La_Estructura_del_Suelo/Art13.aspx La estructura del suelo. Revista Conciencia Rural. Fecha de consulta: 01/12/2007. **(CIII)**

<http://www.eda.etsia.upm.es/climatologia/aguasuelo/CRAD.htm> Capacidad de retención de agua disponible. Fecha de consulta: 11/11/2003. **(CIII)**

<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/ES/GF0095ES.HTM> Humedad disponible del suelo. Fecha de consulta: 11/11/2003. **(CIII)**

<http://www.decagon.com/wp4/> Application notes. Decagon Device, Inc. Fecha de consulta: 04/02/2004-12/04/2008. **(CIII)**

<http://www.garmin.com> eTrex Personal Navigator. Owner's Manual. Garmin Corporation. 2000. **(CIV)**

<http://edafologia.ugr.es/carto/tema02/amplia1.htm> Grupos principales de suelos. Clave FAO y características distintivas. Fecha de consulta: 05/01/2008. **(CIV)**

<http://www.unex.es/edafo/FAO/> Index of edafo FAO. Fecha de consulta: 05/01/2008. **(CIV)**

www.soilmoisture.com Soilmoisture Equipment Corp. Fecha de consulta: 30/12/2003. **(CV)**

<http://www.britannica.com/eb/topic-591691/thermopile> Encyclopedia Britannica *online*. Fecha de consulta: 15/10/2007. **(CV) (AIV)**

www.lab-ferrer.com Lab-Ferrer. Fecha de consulta: 05/05/2007. **(CV)**

http://www.fceia.unr.edu.ar/labinfo/facultad/decanato/secretarias/desarr_institucional/acreditacion_carreras_ingenieria/acreditacion_archivos_pdf/a_Definicion_Beno_Sander.pdf Definición eficiencia. Fecha de consulta: 22/28/2006. **(CXII)**

<https://www1.usc.es/persoal/ret.htm> Servicio de Xestión de Persoal. Tabla de retribución. Fecha de consulta: 25/11/2007. **(CXII)**

ANEXOS

SECCIÓN

I

CARTOGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

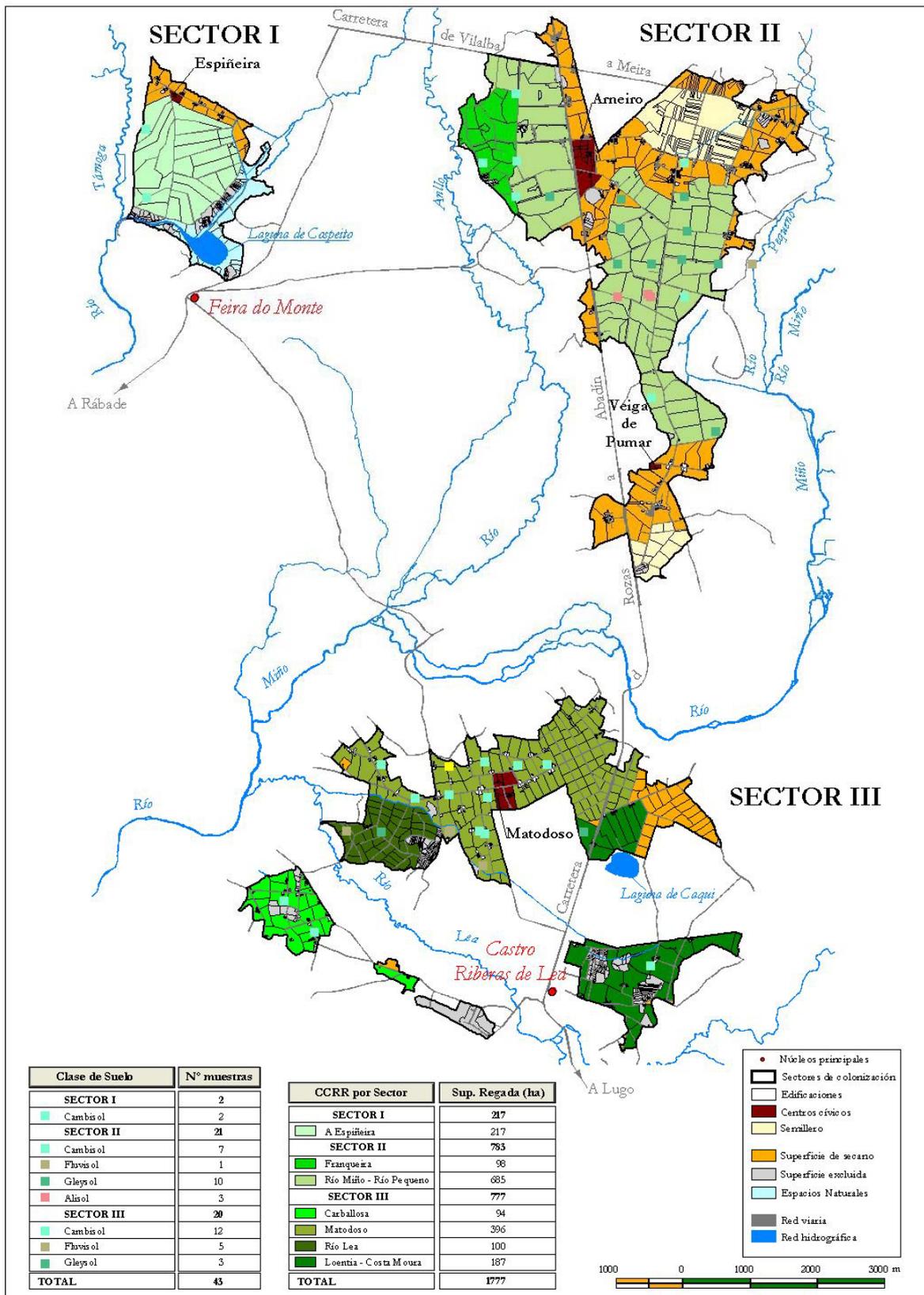
ANEXO

ANEXO I

CARTOGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

“Si quieres aprender sobre la Naturaleza, apreciar la Naturaleza, es necesario aprender el lenguaje en el que habla”

Richard P. Feynman (1918-1988). Físico estadounidense y Premio Nobel de Física (1965).



FICHAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

ANEXO

ANEXO II

FICHAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

*“El derecho a buscar la verdad implica un deber: uno no debe ocultar nada de lo que ha
reconocido como verdad”*

Albert Einstein (1879-1955). Físico estadounidense de origen alemán.

ÍNDICE

1. Ficha WAM: Metodología convencional	465
2. Ficha WAM: Metodología alternativa.....	467
3. Ficha WAM: Análisis factores condensación- evaporación-espacio de cabeza-temperatura	468
4. Ficha WAM: Análisis factores tiempos de humectado y secado, material de la cápsula a emplear y tiempos de lecturas	469

1. Ficha WAM: Metodología convencional.

<i>SECADO</i>	<i>TAMIZADO</i>	<i>HUMECTAR</i>	<i>LEER</i>	<i>HORNO</i>	<i>PESAR</i>

A SECADO

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

Muestras a Secar:

--	--	--

Observaciones:

B TAMIZADO

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

COD	Peso antes de Tamizar	Fracción Gruesa > 2 mm	Fracción Fina < 2mm	Tara

Observaciones:

C HUMECTAR

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

Observaciones:

(Cubrir actividad D por detrás)

E HORNO

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

Observaciones:

F PESAR

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

Observaciones:

D LEER

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

COD	Nº	%	Lectura Psicrómetro (MPa)				Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)
	1	5						
	2	10						
	3	15						
	4	20						
	5	25						
	6	30						
	7	35						
	8	40						
<hr/>								
	9	5						
	10	10						
	11	15						
	12	20						
	13	25						
	14	30						
	15	35						
	16	40						
<hr/>								
	17	5						
	18	10						
	19	15						
	20	20						
	21	25						
	22	30						
	23	35						
	24	40						

Observaciones:

0				8				16				24			

CALIBRACIÓN

2. Ficha WAM: Metodología alternativa.

D LEER

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

Código	Nº	%	Lectura Psicrómetro (MPa)	Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)
	1	5			
	2	10			
	3	15			
	4	20			
	5	5			
	6	10			
	7	15			
	8	20			
	9	5			
	10	10			
	11	15			
	12	20			
	13	5			
	14	10			
	15	15			
	16	20			
	17	5			
	18	10			
	19	15			
	20	20			
	21	5			
	22	10			
	23	15			
	24	20			

Observaciones:

0	4	8	12	16	20	24

CALIBRACIÓN

3. Ficha WAM: Análisis factores condensación- evaporación- espacio de cabeza- temperatura.

D LEER

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

Código	Orden de lectura	%	Lectura Psicrómetro (MPa)		Calibración		Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)
Vaso (4)	1	5						
	5	10						
	9	15						
	13	20						
Sin sellar (1)	2	5						
	6	10						
	10	15						
	14	20						
Sellada a T^a amb (2)	3	5						
	7	10						
	11	15						
	15	20						
Sellada a T^a controlada (3)	4	5						
	8	10						
	12	15						
	16	20						
Leída toda seguida (2')⁸¹	17	5						
	18	10						
	19	15						
	20	20						

Observaciones: Realizar calibración antes de cada cápsula, para minimizar el efecto del calibrado.

⁸¹ *Espacio de cabeza: comparación de (4) y (2), evaporación: comparación de (2) y (1), condensación: comparación de (2) y (3), temperatura: comparación de (2) y (2').*

4. Ficha WAM: Análisis factores tiempos de humectado y secado, material de la cápsula a emplear y tiempos de lecturas.

D LEER

Fecha: ___ / ___ / ___ Operario/s: _____ Inicio: _____ Fin: _____

T ^a amb	Material cápsula	Tiempo humectación	%	Lectura Psicrómetro (MPa)			Tiempo Lectura		Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)					
				MPa	pF	T ^a	T ^a	T ^a +L		2h	4h	6h	8h	12h	24h
	M	0	5												
	P	0	5												
	M	0	10												
	P	0	10												
	M	0	15												
	P	0	15												
	M	0	20												
	P	0	20												
	M	12	5												
	P	12	5												
	M	12	10												
	P	12	10												
	M	12	15												
	P	12	15												
	M	12	20												
	P	12	20												
	M	14	5												
	P	14	5												
	M	14	10												
	P	14	10												
	M	14	15												
	P	14	15												
	M	14	20												
	P	14	20												

T ^a amb	Material cápsula	Tiempo humectación	%	Lectura Psicrómetro (MPa)			Tiempo Lectura		Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)					
				MPa	pF	T ^a	T ^a	T ^a +L		2h	4h	6h	8h	12h	24h
	M	16	5												
	P	16	5												
	M	16	10												
	P	16	10												
	M	16	15												
	P	16	15												
	M	16	20												
	P	16	20												
	M	18	5												
	P	18	5												
	M	18	10												
	P	18	10												
	M	18	15												
	P	18	15												
	M	18	20												
	P	18	20												
	M	20	5												
	P	20	5												
	M	20	10												
	P	20	10												
	M	20	15												
	P	20	15												
	M	20	20												
	P	20	20												
	M	22	5												
	P	22	5												
	M	22	10												
	P	22	10												
	M	22	15												
	P	22	15												

T ^a amb	Material cápsula	Tiempo humectación	%	Lectura Psicrómetro (MPa)			Tiempo Lectura		Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)					
				MPa	pF	T ^a	T ^a	T ^a +L		2h	4h	6h	8h	12h	24h
	M	22	20												
	P	22	20												
	M	24	5												
	P	24	5												
	M	24	10												
	P	24	10												
	M	24	15												
	P	24	15												
	M	24	20												
	P	24	20												

Observaciones: Realizar calibración antes de cada cápsula, para minimizar el efecto del calibrado.
M: Cápsulas metálicas, P: Cápsulas plásticas.

ANEXO III

PROCOLOS DE DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES

“Si no conozco una cosa, la investigaré”
Louis Pasteur (1822-1895). Químico francés.

ÍNDICE

1. Protocolo para la determinación de la densidad aparente.....	479
1.1. Material requerido	479
1.2. Procedimiento.....	479
2. Protocolo para el análisis textural.....	479
2.1. Material requerido	480
2.2. Procedimiento.....	480
3. Referencias bibliográficas	481

1. Protocolo para la determinación de la densidad aparente.

Se utiliza el método propuesto por “United States Department of Agriculture” (USDA, 2004).

1.1. Material requerido.

El material necesario para la realización es:

- Lámina de plástico transparente de aproximadamente 1 m².
- Probeta de plástico de 1 litro de capacidad.
- Paleta de albañil.
- Bolsa de plástico con “autocierre”.
- Recipiente con agua.

1.2. Procedimiento.

Inicialmente se toma la muestra en el punto, en una zona en que no exista pendiente, de modo que el agua con la que posteriormente se llenará el hoyo quede repartida de forma uniforme, para lo cual previamente se ha retirado la cubierta vegetal. A continuación se realiza un hoyo de 15 cm de profundidad y en el que las paredes han de ser uniformes. La tierra que ha sido retirada durante la realización del hoyo deberá ser guardada, para lo cual se introduce en una bolsa con “autocierre” con el código del punto para su posterior identificación en el laboratorio.

El hoyo se cubre con el plástico amoldándolo a las superficies, de modo que no se formen bolsas de aire entre las paredes del hoyo y el plástico. A continuación se llena el hoyo con agua, midiendo la cantidad requerida de la misma durante el proceso.

Posteriormente, en el laboratorio, se pone a secar la tierra extraída del hoyo en un horno a 105° C, durante 24 horas, y a continuación se pesa.

La densidad aparente (DAP) se calcula mediante la ecuación A.III.1:

$$DAP = \frac{\text{Peso seco} - \text{Tara}}{\text{Volumen}} \quad (\text{A.III.1})$$

2. Protocolo para el análisis textural.

Se utiliza el “método de la pipeta” para realizar el análisis granulométrico. Se trata de una técnica que implica la disociación completa de la muestra hasta el estado de partículas elementales, de forma que se destruyen totalmente los agregados y se suprime la acción de los cementos.

Una vez disociada la muestra, se determina la distribución estadística de las partículas en cada una de las clases de tamaño.

2.1. Material requerido.

El material necesario para la realización es:

- Probetas de 1 litro.
- Vasos de 600 ml.
- Cápsulas o vasos de 50 ml.
- Embudos.
- Filtros.
- Soporte.
- Tamiz de 50 y 200 μ m.
- Botellas de boca ancha.
- Agitador de botellas.
- Estufa.
- Pipeta Robinson.
- Solución N de HCl.
- Agente dispersante (Calgón), constituido por 35,7 g de hexametáfosfato sódico y 7,97 g de carbonato sódico en 1 litro de agua.
- NO₃Ag.

2.2. Procedimiento.

Se pesan 20 gramos de suelo seco (previamente tamizado a 2 mm) y se le añade agua oxigenada al 6% para eliminar la materia orgánica (MO).

Una vez destruida la MO, se añaden 50 ml de HCl 1N para disolver los compuestos de hierro y aluminio que contribuyen a la agregación. Tras esperar 20 minutos, durante los cuales se agita de vez en cuando, se filtra y se lava con agua destilada hasta que el filtrado no da cloruros (test de cloruros positivo con AgNO₃).

A continuación se transfiere el contenido de los filtros a las botellas de plástico de 1 litro, procurando no sobrepasar ½ l de agua durante todo el proceso y se añaden 20 ml de agente Calgón, para posteriormente agitar durante 2 horas.

Tras la dispersión, se tamizan las muestras en húmedo (50 μ m) para separar la arena del resto de las fracciones, procurando gastar menos de 1 litro de agua.

Las arenas se secan en cápsulas para su posterior separación en arena gruesa (AG) y arena fina (AF) por medio de un tamiz de 200 μ m. El resto del material es llevado a las probetas de plástico de 1 litro, se homogeniza y se toman alícuotas de 20 ml con la pipeta Robinson a tres tiempos:

- T=0 (LG+LF+ARC)
- T= 4 min y 48 seg (LF+ARC)
- T=8 h (ARC)

Estas alícuotas se recogen en crisoles y se secan en estufa a 110° C hasta peso constante y se pesa cada crisol. Los pesos obtenidos en los crisoles han de referirse al volumen total, por lo que deben de multiplicarse por 50.

La suma de todas las fracciones (AG+AF+LG+LF+ARC) representa el total de las partículas minerales del suelo y debe estar próxima a la cantidad de suelo inicial. Los resultados se expresan en porcentaje en peso seco.

3. Referencias bibliográficas.

USDA. 2004. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. Fecha de consulta: 25/02/2004. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/files/kitspanish.pdf>.

IV

ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL WAM

ANEXO

ANEXO IV

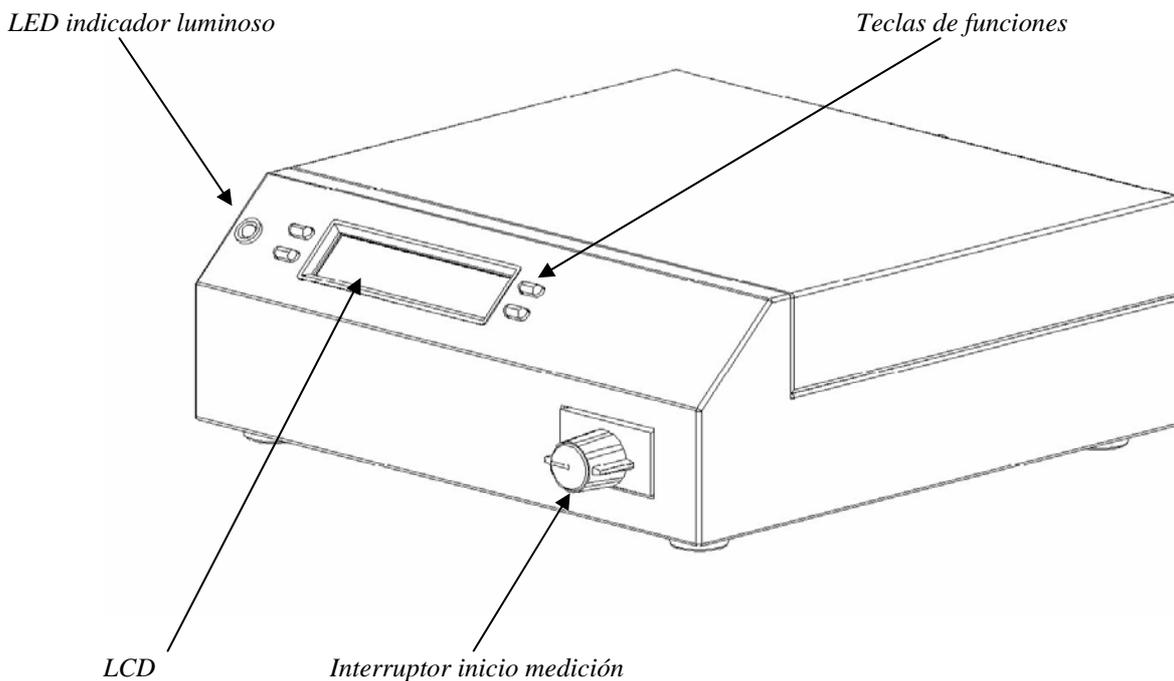
ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL WAM

“Siempre que enseñes, enseña a la vez a dudar de lo que enseñas”
José Ortega y Gasset (1883-1955). Filósofo español.

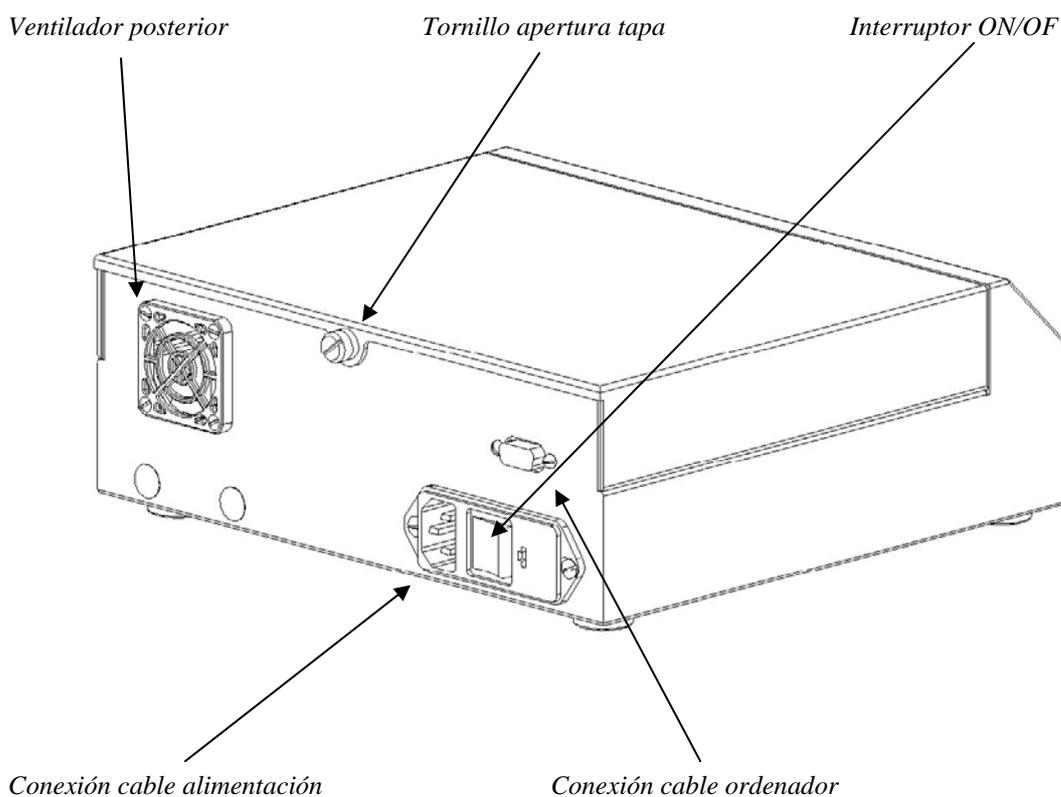
ÍNDICE

1. Vista frontal del WP4	489
2. Vista posterior del WP4.....	489
3. Vista inferior del bloque que se dispone como cierre del compartimento de lectura..	490
4. Referencias bibliográficas	490

1. Vista frontal del WP4⁸².

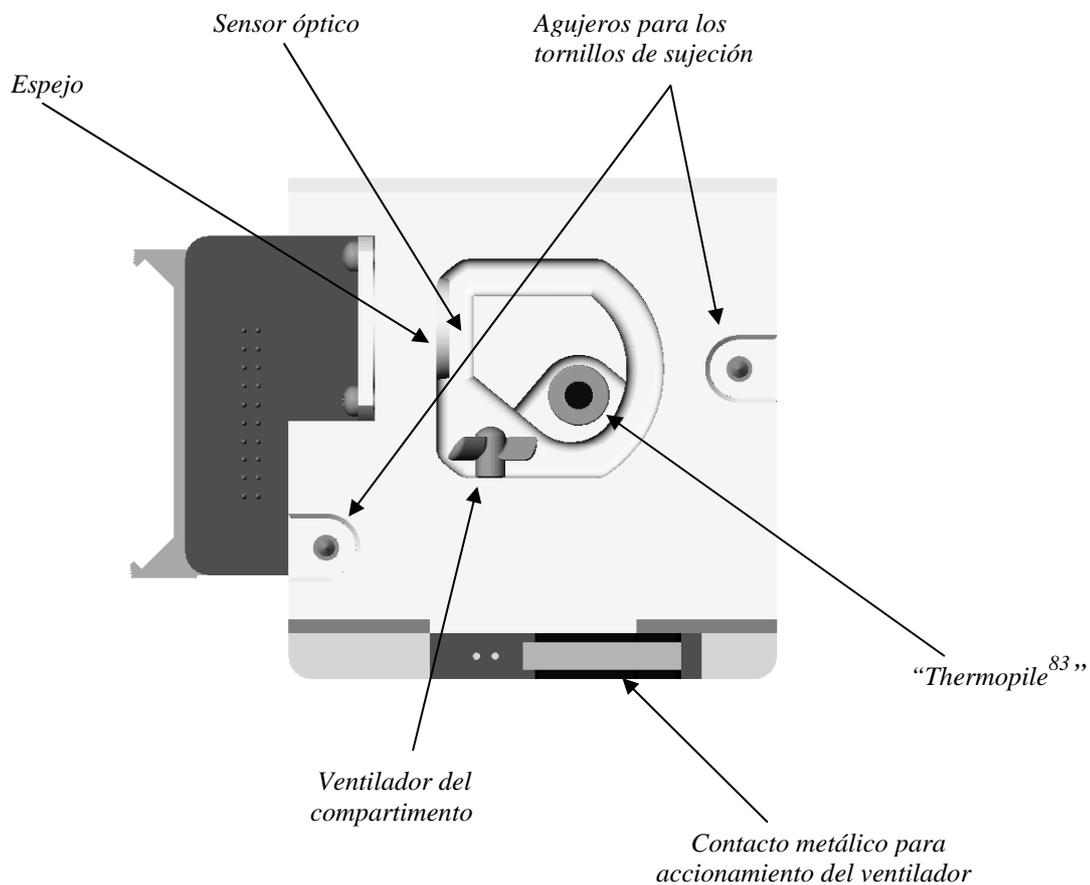


2. Vista posterior del WP4.



⁸² Imágenes tomadas de “Dewpoint PotentiaMeter Operator’s Manual Version 2.2” (Decagon Device, 2003c). Los esquemas son comunes al modelo WP4 con control de temperatura, como sin ella.

3. Vista inferior del bloque que se dispone como cierre del compartimento de lectura.



4. Referencias bibliográficas.

Decagon Devices. 2003c. Dewpoint PotentiaMeter Operator's Manual Version 2.2.

Referencias páginas web.

<http://www.britannica.com/eb/topic-591691/thermopile> Encyclopedia Britannica online.
Fecha de consulta: 15/10/2007.

⁸³ "Thermopile" es un conjunto de termopares unido en serie, aportando el promedio de las lecturas de temperatura registradas. (<http://www.britannica.com/eb/topic-591691/thermopile>)

V

ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

ANEXO

ANEXO V

ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

“Debe ser simple para ser cierto. Si no es simple, probablemente no podremos descifrarlo”
Albert Einstein (1879-1955). Físico estadounidense de origen alemán.

