

Bernardo Pascual España

**RIEGOS DE GRAVEDAD  
Y A PRESIÓN**

**EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Segunda edición 2007 ▪ Reimpresión, 2015

© Bernardo Pascual España

© 2007 de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València

*Distribución:* Telf. 963 877 012 / [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref. 0252\_03\_02\_02

Imprime: Byprint Percom, sl.

Depósito Legal: V-1065-2007

ISBN: 978-84-8363-083-9

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impreso en España

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DEL RIEGO</b> .....	9
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>1.1. ANTIGÜEDAD DEL REGADÍO</b> .....	11
<b>1.2. DEFINICIÓN DE RIEGO</b> .....	11
<b>1.3. EXTENSIÓN DEL REGADÍO</b> .....	12
<b>1.4. INFORMACIÓN BÁSICA NECESARIA PARA PROYECTAR         UNA PUESTA EN RIEGO</b> .....	12
<b>1.4.1. Mapas</b> .....	12
<b>1.4.2. Recursos de agua de la explotación</b> .....	13
<b>2. EL SUELO COMO DEPÓSITO DE AGUA</b> .....	15
<b>2.1. DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO</b> .....	15
<b>2.2. POTENCIAL HÍDRICO DEL SUELO</b> .....	19
<b>2.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA RETENCIÓN DE AGUA</b> .....	23
<b>2.4. HISTÉRESIS</b> .....	25
<b>2.5. MEDICIÓN DEL POTENCIAL HIDRÍCO Y DEL CONTENIDO         DE AGUA DEL SUELO</b> .....	26
<b>3. PROFUNDIDAD DE ENRAIZAMIENTO</b> .....	26
<b>4. UMBRAL ÓPTIMO DE RIEGO</b> .....	32
<b>5. INFILTRACIÓN</b> .....	36
<b>6. NECESIDADES DE RIEGO. CAUDAL FICTICIO CONTI- NUO Y CAUDAL CARACTERÍSTICO</b> .....	42
<b>6.1. NECESIDAD DE RIEGO</b> .....	42
<b>6.2. CAUDAL FICTICIO CONTINUO Y CAUDAL CARACTERÍSTICO</b> .....	42
<b>7. EFICIENCIA DE RIEGO</b> .....	43
<b>7.1. EFICIENCIA GLOBAL DE RIEGO</b> .....	44
<b>7.2. COMPONENTES DE LA EFICIENCIA GLOBAL</b> .....	44
<b>7.3. EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO</b> .....	50
<b>8. SALINIDAD, REQUERIMIENTO DE LIXIVIACIÓN</b> .....	53
<b>9. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE RIEGO</b> .....	58
<b>10. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	61

<b>CAPÍTULO II. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LOS REGADÍOS.....</b>	<b>65</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>67</b>
<b>2. CAUDAL DE DERIVACIÓN.....</b>	<b>67</b>
<b>3. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA.....</b>	<b>70</b>
<b>3.1. DISTRIBUCIÓN CONTINUA .....</b>	<b>71</b>
<b>3.2. DISTRIBUCIÓN POR ROTACIÓN O TURNO .....</b>	<b>72</b>
<b>3.3. DISTRIBUCIÓN A LA DEMANDA .....</b>	<b>73</b>
<b>4. CAUDAL DE LAS CONDUCCIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>4.1. DISTRIBUCIÓN POR ROTACIÓN .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2. DISTRIBUCIÓN A LA DEMANDA.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.1. Valores normales de los parámetros.....</b>	<b>78</b>
<b>4.2.1.1. Rendimiento de empleo .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2.1.2. Calidad de funcionamiento .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2.2. Aumento relativo de caudal.....</b>	<b>79</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO III. RIEGOS DE GRAVEDAD O SUPERFICIE .....</b>	<b>81</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>83</b>
<b>2. HIDRÁULICA DEL RIEGO POR SUPERFICIE .....</b>	<b>88</b>
<b>2.1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>88</b>
<b>2.2. FASES DE UN RIEGO TÍPICO POR SUPERFICIE .....</b>	<b>88</b>
<b>3. RIEGO A MANTA.....</b>	<b>95</b>
<b>3.1. RIEGO POR TABLARES.....</b>	<b>96</b>
<b>3.1.1. Condiciones que favorecen la instalación del riego                     por tablares .....</b>	<b>96</b>
<b>3.1.1.1. Cultivos .....</b>	<b>96</b>
<b>3.1.1.2. Suelos .....</b>	<b>96</b>
<b>3.1.1.3. Pendientes .....</b>	<b>97</b>
<b>3.1.1.4. Ventajas .....</b>	<b>98</b>
<b>3.1.1.5. Inconvenientes .....</b>	<b>98</b>
<b>3.1.2. Diseño de tablares con salida del agua al pie.....</b>	<b>98</b>
<b>3.1.2.1. Caudal unitario.....</b>	<b>99</b>
<b>3.1.2.2. Tiempo de aplicación (Ta) .....</b>	<b>100</b>
<b>3.1.2.3. Longitud del tablar .....</b>	<b>100</b>
<b>3.1.2.4. Limitaciones en el diseño.....</b>	<b>100</b>
<b>3.1.3. Diseño de tablares con retención de agua al pie .....</b>	<b>109</b>
<b>3.1.3.1. Aumento de la longitud .....</b>	<b>110</b>

3.1.3.2. Bloqueo de la salida y reducción del caudal .....	111
3.1.3.3. Ejemplo de cálculo. Diseño de tablares .....	112
<b>3.2. RIEGO POR SUMERSIÓN</b> .....	114
<b>3.2.1. Condiciones que favorecen la instalación del riego por sumersión</b> .....	115
3.2.1.1. Cultivos .....	115
3.2.1.2. Suelos .....	115
3.2.1.3. Ventajas .....	115
3.2.1.4. Inconvenientes .....	116
<b>3.2.2. Diseño</b> .....	116
3.2.2.1. Limitaciones del diseño .....	116
3.2.2.2. Método del Servicio de Conservación de Suelos (USDA, 1974) .....	118
3.2.2.2.1. Compartimentos regulares .....	118
3.2.2.2.2. Ejemplo de cálculo. Diseño de compartimentos regulares .....	121
3.2.2.2.3. Compartimentos en contorno .....	123
3.2.2.2.4. Ejemplo de cálculo. Diseño de compartimentos en contorno .....	125
3.2.2.3. Método empírico de Booher .....	127
3.2.2.4. Riego continuo o permanente .....	129
3.2.2.4.1. Compartimentos regulares .....	131
3.2.2.4.2. Ejemplo de cálculo. Diseño de compartimentos regulares .....	134
3.2.2.4.3. Compartimentos en contorno .....	136
3.2.2.4.4. Ejemplo de cálculo. Diseño de compartimentos en contorno .....	138
<b>3.3. RIEGO POR DESBORDAMIENTO NATURAL</b> .....	140
<b>4. RIEGO POR SURCOS</b> .....	141
<b>4.1. CONDICIONES QUE FAVORECEN LA INSTALACIÓN DEL RIEGO POR SURCOS</b> .....	142
4.1.1. Cultivos .....	142
4.1.2. Suelos .....	142
4.1.3. Pendientes .....	142
4.1.4. Ventajas .....	143
4.1.5. Inconvenientes .....	143
<b>4.2. DISEÑO</b> .....	144
4.2.1. Surcos en pendiente y con salida de agua al pie .....	149
4.2.2. Ejemplo de cálculo. Diseño de surcos en pendiente y con salida de agua al pie .....	152

4.2.3. Surcos en pendiente con reducción de caudal.....	155
4.2.4. Ejemplo de cálculo. Diseño de surcos en pendiente con reducción de caudal.....	158
4.2.5. Surcos nivelados y con retención del agua al pie.....	160
4.2.6. Ejemplo de cálculo. Diseño de surcos nivelados y con retención del agua al pie.....	163
4.3. CASOS ESPECIALES.....	164
4.3.1. Riego por surcos protegidos por una lámina plástica.....	164
4.3.2. Riego por surcos a impulsos.....	165
4.3.3. Surcos en contorno.....	166
4.3.4. Surcos en zigzag.....	167
4.3.5. Corrugaciones.....	168
4.3.6. Riego por alcorques.....	168
5. BIBLIOGRAFÍA.....	170
<b>CAPÍTULO IV. RIEGO POR ASPERSIÓN.....</b>	<b>173</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	175
2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL RIEGO POR ASPERSIÓN.....	175
2.1. VENTAJAS.....	175
2.2. INCONVENIENTES.....	176
3. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE ASPERSIÓN.....	176
3.1. GRUPO DE BOMBEO.....	177
3.2. CONDUCCIONES.....	178
3.2.1. Conducciones móviles.....	179
3.2.2. Conducciones fijas.....	180
3.2.2.1. Materiales plásticos.....	180
3.2.2.2. Fibrocemento.....	181
3.2.2.3. Hormigón armado y pretensado.....	181
3.2.2.4. Acero y fundición.....	181
3.3. ASPERSORES.....	182
3.3.1. Aspersores rotativos.....	182
3.3.1.1. Introducción.....	182
3.3.1.2. Clasificaciones de los aspersores rotativos.....	186
3.3.1.3. Distribución del agua y tamaño de las gotas.....	190
3.3.1.4. Pérdidas por evaporación.....	194
3.3.1.5. Efecto del viento en la distribución del agua.....	197
3.3.1.6. Pluviometría.....	200

3.3.1.7. <i>Coeficiente de uniformidad de distribución</i> .....	205
<b>3.3.2. Torniquetes hidráulicos</b> .....	210
<b>3.3.3. Aspersores de boquilla fija</b> .....	211
<b>3.3.4. Tuberías perforadas</b> .....	211
<b>4. TIPOS DE SISTEMAS DE ASPERSIÓN</b> .....	213
<b>4.1. SISTEMAS CONVENCIONALES</b> .....	213
<b>4.1.1. Disposición de los aspersores</b> .....	215
<b>4.1.2. Tipos de sistemas convencionales</b> .....	217
4.1.2.1. <i>Sistemas móviles</i> .....	217
4.1.2.2. <i>Sistemas fijos</i> .....	219
4.1.2.3. <i>Sistemas semifijos</i> .....	220
<b>4.2. SISTEMAS MECANIZADOS</b> .....	224
<b>4.2.1. Torniquetes hidráulicos</b> .....	224
<b>4.2.2. Enrolladores</b> .....	227
<b>4.2.3. Alas de riego con desplazamiento</b> .....	231
4.2.3.1. <i>Ala de riego sobre ruedas</i> .....	233
4.2.3.2. <i>Sistemas de pivote central (Pivotes)</i> .....	235
4.2.3.3. <i>Sistemas de avance frontal ("Laterales")</i> .....	244
<b>4.2.4. Nuevas tendencias</b> .....	247
<b>5. ELECCIÓN DEL SISTEMA DE ASPERSIÓN</b> .....	247
<b>5.1. TOPOGRAFÍA</b> .....	248
<b>5.2. TIPOS DE SUELOS</b> .....	248
<b>5.3. CULTIVOS</b> .....	248
<b>5.4. MANO DE OBRA</b> .....	248
<b>5.5. FORMA DE LA PARCELA</b> .....	249
<b>5.6. TENDENCIAS</b> .....	249
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	250
<b>CAPÍTULO V. RIEGO LOCALIZADO</b> .....	253
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	255
<b>2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA</b> .....	255
<b>3. VENTAJAS E INCONVENIENTES</b> .....	257
3.1. <i>VENTAJAS</i> .....	257
3.2. <i>INCONVENIENTES</i> .....	258
<b>4. SISTEMAS DE RIEGO LOCALIZADO</b> .....	259
<b>5. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN DE RIEGO LOCALIZADO</b> ..	260
<b>5.1. EL CABEZAL O CENTRO DE CONTROL</b> .....	262
<b>5.1.1. Unidad de bombeo</b> .....	262

<b>5.1.2. Equipo de filtrado</b> .....	262
5.1.2.1. Prefiltros .....	265
5.1.2.2. Filtros .....	266
<b>5.1.3. Equipo de fertilización</b> .....	279
5.1.3.1. Tanques de fertilización .....	280
5.1.3.2. Inyector Venturi .....	281
5.1.3.3. Inyectores dosificadores .....	283
5.1.3.4. Elección de los diferentes equipos de fertilización .....	285
<b>5.1.4. Depósitos de abono</b> .....	285
<b>5.1.5. Control de presiones y caudales</b> .....	286
<b>5.1.6. Automatización</b> .....	286
<b>5.2. RED DE TUBERÍAS</b> .....	293
<b>5.2.1. Tuberías de PVC</b> .....	294
<b>5.2.2. Tuberías de polietileno</b> .....	295
<b>5.3. ELEMENTOS DISTRIBUIDORES</b> .....	296
<b>5.3.1. Definiciones</b> .....	296
<b>5.3.2. Requerimientos básicos</b> .....	299
5.3.2.1. Ecuación característica del emisor .....	299
5.3.2.2. Sensibilidad a las variaciones de temperatura .....	303
5.3.2.3. Coeficiente de variación de fabricación .....	304
5.3.2.4. Sensibilidad a las obturaciones .....	307
5.3.2.5. Pérdida de carga en la conexión .....	308
<b>5.3.3. Clasificación de los elementos distribuidores</b> .....	310
5.3.3.1. Emisores .....	310
5.3.3.1.1. Clasificación según su construcción .....	310
5.3.3.1.2. Clasificación según su hidráulica .....	310
5.3.3.1.3. Clasificación según el coeficiente de variación de fabricación .....	316
5.3.3.1.4. Identificación y datos a facilitar por el fabricante .....	316
5.3.3.2. Difusores .....	317
5.3.3.3. Tuberías - emisoras .....	323
<b>6. DISEÑO AGRONÓMICO</b> .....	327
<b>6.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	327
<b>6.2. RESPUESTA DE LOS CULTIVOS A LOS RIEGOS LOCALIZADOS</b> .....	328
<b>6.3. NECESIDADES DE AGUA</b> .....	328
<b>6.3.1. Necesidades netas</b> .....	334
<b>6.3.2. Necesidades totales</b> .....	335
6.3.2.1. Pérdidas por percolación .....	336



6.3.2.2. <i>Requerimiento de lixiviación</i> .....	337
6.3.2.3. <i>Coeficiente de uniformidad</i> .....	337
6.3.2.3.1. Coeficiente de uniformidad obtenido de la evaluación de instalaciones ya instaladas .....	339
6.3.2.3.2. Coeficiente de uniformidad de diseño .....	340
<b>6.4. VOLUMEN DE SUELO MOJADO</b> .....	343
<b>6.4.1. El bulbo húmedo</b> .....	345
<b>6.4.2. Área mojada por un emisor</b> .....	349
<b>6.5. NÚMERO DE EMISORES POR PLANTA</b> .....	352
<b>6.6. DISPOSICIÓN DE LOS LATERALES DE RIEGO Y DE LOS EMISORES</b> ..	354
<b>7. RIEGO A PULSOS</b> .....	357
<b>8. OBTURACIONES</b> .....	358
<b>8.1. OBTURACIONES FÍSICAS</b> .....	359
<b>8.2. OBTURACIONES QUÍMICAS</b> .....	361
<b>8.2.1. Carbonato cálcico</b> .....	362
8.2.1.1. <i>Tratamiento preventivo</i> .....	362
8.2.1.2. <i>Tratamiento de limpieza</i> .....	365
<b>8.2.2. Precipitados de hierro y manganeso</b> .....	366
8.2.2.1. <i>Tratamiento preventivo</i> .....	367
8.2.2.2. <i>Tratamiento de limpieza</i> .....	367
<b>8.3. OBTURACIONES BIOLÓGICAS</b> .....	367
<b>8.3.1. Tratamiento preventivo</b> .....	368
<b>8.3.2. Tratamiento de limpieza</b> .....	369
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	370



# CAPÍTULO I

*FUNDAMENTOS DEL RIEGO*

---



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTIGÜEDAD DEL REGADÍO

La utilización del regadío es antiquísima. El regadío permitió a diversas civilizaciones establecerse permanentemente en zonas áridas y semiáridas (JENSEN, 1980). A lo largo de la historia las civilizaciones han estado influenciadas por la evolución de la agricultura de regadío, que proporcionaba las bases agrarias de la sociedad y la seguridad de su pueblo. Cuando las relaciones suelo-planta-agua han sido ignoradas, la productividad de la agricultura de regadío ha disminuido drásticamente.

Así, la antigua civilización de Mesopotamia floreció en el Valle Tigris-Eufrates hace 6.000 años (KANG, 1972) y decayó cuando el suelo se convirtió en salino debido a una mala utilización del riego y a una falta de drenaje. De hecho, la fertilidad de estos suelos no se ha recuperado todavía (WALKER y SKOGERBOE, 1987). El nivel de población existente en aquellas zonas y aquellos momentos, demuestran que los rendimientos obtenidos en el cultivo de cebada superaban de dos a cuatro veces los obtenidos en la actualidad en aquella zona (KOVDA et al., 1973; WALKER y SKOGERBOE, 1987).

ISRAELSEN y HANSEN (1979) presentan un interesante estudio sobre la antigüedad de los regadíos, del que destacamos: las citas que se hacen del riego en el Código de Hammurabi (2.000 a.d.C.) y en el libro segundo de los Reyes (versículos 16 y 17 del capítulo tercero); la existencia en Egipto de la presa más antigua del mundo, construida hace 5.000 años; la existencia en Egipto, en funcionamiento todavía, de canales construidos bajo el mandato de una reina Asiria 2.000 a.d.C.; la presa de Tu-Kiang (también en funcionamiento) en China construida en tiempos de la dinastía Chin (2.000 a.d.C.).

Existe bibliografía que permite una mayor profundización en la historia del regadío (ZUANG, 1972; FUKUDA, 1976; ICID, 1977; YOUSRY, 1978, etc.). Como anécdota se presenta la cita del Génesis (2:10): “De Edén salía un río que regaba el jardín; y desde allí se dividía y se formaban de él cuatro brazos”.

### 1.2. DEFINICIÓN DE RIEGO

Los objetivos principales del riego son suministrar la humedad necesaria para el crecimiento y desarrollo de las plantas (que incluye el transporte de nutrientes), y diluir (y en su caso lixiviar) las sales existentes en el suelo. Además el riego produce unos efectos beneficiosos como es el crear un ambiente favorable para el crecimiento de las plantas (al hacer bajar las temperaturas de suelo y ambiente en verano, e impedir (o al menos retrasar) la bajada de las mismas hasta niveles críticos para las plantas en invierno, cuando existen problemas de heladas).

Mediante el riego intentamos suplir el déficit de humedad existente en muchas regiones a causa del desequilibrio entre la evapotranspiración de los cultivos y la precipitación atmosférica.

Puede concluirse pues, que el riego es el aporte artificial de agua al suelo, con el objetivo de suministrar la humedad necesaria para el desarrollo y el crecimiento de las plantas. Expresado de otra manera “el riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer en éste el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos”.

### ***1.3. EXTENSIÓN DEL REGADÍO***

Según la FAO (Anuario FAO de producción, 2.003) en 2002 se regaron a nivel mundial 276.719.000 ha, de las cuales 12.879.000 correspondieron a África, 31.408.000 ha a Norte y Centro América, 10.499.000 a Sudamérica, 193.869.000 a Asia, 25220 a Europa y 2.545.000 a Oceanía.

El país europeo que riega una mayor extensión es Rusia (4.600.000 ha) seguido por España (3.780.000 ha), Rumanía (3.077.000 ha) e Italia (2.750 ha).

Según datos del Ministerio de Agricultura (Anuario de Estadística Agraria, 2005) en 2004 se regaron en España 3.300.000 ha, que supuso el 18.6% respecto a la superficie agrícola total estatal.

La superficie regada está aumentando constantemente; en el período 1950-1980 el incremento fue superior al 3% anual, mientras que a partir de esta fecha el incremento se ha reducido a un nivel inferior al 1% (la población mundial está creciendo a un ritmo del 1,8%) (STEWART y NIELSEN, 1990).

### ***1.4. INFORMACIÓN BÁSICA NECESARIA PARA PROYECTAR UNA PUESTA EN RIEGO***

Para proyectar correctamente el riego de una explotación es conveniente disponer de una cierta información básica:

#### **1.4.1. Mapas**

Tanto para seleccionar el (los) método(s) de riego a utilizar como para subdividir la explotación en secciones, así como para proyectar las redes de riego y drenaje, es imprescindible la información suministrada por los mapas topográficos. En general parecen aconsejables planos a una escala 1:2.000 ó 1:2.500 con curvas de nivel distanciadas entre 0,2 y 1 m. según sea la pendiente del terreno.

También es imprescindible conocer la distribución espacial de las características del suelo, lo cual se encuentra en los mapas de clasificación en series y tipos de suelos. La serie de suelo se determina en base al perfil y la secuencia de los horizontes que lo componen, con sus características morfológicas y de comportamiento en cuanto a textura, profundidad, drenaje y contenido de fragmentos gruesos. El tipo de suelo se refiere a la textura del horizonte superficial, que es el que se "trabaja" en el laboreo (GRASSI, 1987).

#### **1.4.2. Recursos de agua de la explotación**

Es evidente que para proyectar el riego de una explotación es necesario conocer el recurso de agua con que se cuenta, tanto en cantidad como en calidad. La cantidad de agua disponible por unidad de tiempo, es decir el caudal, puede delimitar la superficie a regar, y en algunos casos obliga a la elección de un método determinado (por ejemplo, riego localizado de alta frecuencia). En cuanto a la calidad del agua de riego existe abundante bibliografía con diversas clasificaciones. La calidad del agua es un factor muy importante a considerar; así por ejemplo en caso de utilizar aguas salinas, para evitar la acumulación de sales, se requiere un lavado y por tanto un mayor consumo de agua.

Existen numerosas clasificaciones sobre la calidad del agua de riego, la cual puede ser evaluada según criterios de salinidad, sodicidad y de toxicidad. Sin entrar en más detalles (por salirse de la finalidad de esta obra) a continuación se presentan las directrices de la FAO (AYERS y WESTCOT, 1987) para interpretar la calidad del agua para riego (cuadro 1.1).

**Cuadro 1.1. Directrices para interpretar la calidad del agua para el riego (AYERS y WESTCOT 1987)**

PROBLEMA POTENCIAL		UNIDADES	GRADO DE RESTRICCIÓN DE USO			
			NINGUNA	LIGERA A MODERADA	SEVERA	
<u>SALINIDAD</u> (afecta disponibilidad de agua para el cultivo) <sup>2</sup>	ECa	dS/m	<0,7	0,7-3,0	>3,0	
	TSS	mg/l	<450	450-2000	>2000	
<u>INFILTRACIÓN</u> (reduce infiltración; evaluar usando a la vez la ECa y el RAS) <sup>3</sup>	RAS = 0 - 3 y ECa =		>0,7	0,7-0,2	<0,2	
	= 3 - 6 =		>1,2	1,2-0,3	<0,3	
	= 6 - 12 =		>1,9	1,9-0,5	<0,5	
	= 12 - 20 =		>2,9	2,9-1,3	<1,3	
	= 20 - 40 =		>5,0	5,0-2,9	<2,9	
<u>TOXICIDAD DE IONES ESPECÍFICOS</u> (afecta cultivos sensibles)	Sodio (Na) <sup>4</sup>	Riego por superficie	RAS	<3	3-9	>9
		Riego por aspersión	meq/l	<3	>3	
	Cloro (Cl) <sup>4</sup>	Riego por superficie	meq/l	<4	4-10	>10
		Riego por aspersión	meq/l	<3	>3	
<u>VARIOS</u> (afecta cultivos sensibles)	Boro (B)		mg/l	<0,7	0,7-3,0	>3,0
	Nitrógeno (NO <sub>3</sub> -N) <sup>5</sup>		mg/l	<5	5-30	>30
	Bicarbonato (CO <sub>3</sub> H) (aspersión foliar únicamente)		mg/l	<1,5	1,5-8,5	>8,5
	pH		Amplitud normal: 6,5-8,4			

<sup>1</sup> Fuente University of California Committee of Consultants 1974.

<sup>2</sup> ECa es la conductividad eléctrica del agua; expresada en decisiemenes por metro a 25°C (mmhos/cm). TSS, es el total de sólidos en solución, expresado en miligramos por litro (mg/l).

<sup>3</sup> RAS es la relación de adsorción de sodio. Para un valor determinado del RAS, la velocidad de infiltración aumenta a medida que aumenta la salinidad. El problema potencial de infiltración debe evaluarse utilizando el RAS y la ECa. Fuente: RHOADES, 1977 y OSTER y SCHROER, 1979.

<sup>4</sup> La mayoría de los cultivos arbóreos y plantas leñosas son sensibles al sodio y al cloro; en el caso de riego por superficie debe usarse los valores indicados. La mayor parte de los cultivos anuales no son sensibles; debiendo utilizarse otras tolerancias de salinidad. En el caso de riego por aspersión sobre el follaje, y humedad relativa por debajo del 30%, el sodio y el cloro pueden ser absorbidos por las hojas de cultivos sensibles, por lo que deben utilizarse otras tablas de interpretación.

<sup>5</sup> NO<sub>3</sub>-N es el nitrógeno en forma de nitrato, expresado en términos de nitrógeno elemental (en el caso de aguas residuales incluir el NH<sub>4</sub>-N y el N-orgánico).



## **2. EL SUELO COMO DEPÓSITO DE AGUA**

### **2.1. DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO**

De la simple observación de las condiciones naturales, se desprende el papel del suelo como regulador de la humedad. En efecto, mientras las plantas consumen agua de una manera continua, las lluvias no caen sino de una manera intermitente.

Si a pesar de esta aportación irregular de agua, las plantas pueden alimentarse de manera regular y proseguir sin interrupción su crecimiento normal se lo deben al suelo. El suelo representa el papel de un depósito donde las plantas toman lo que necesitan.

Para conocer la capacidad de este depósito, así como el intervalo entre riegos, se necesita conocer previamente la disposición de los horizontes en el perfil, el espesor y la textura y estructura de los mismos, junto con la velocidad de agotamiento y en su caso la salinidad del suelo y/o del agua de riego.

Como máximo las plantas disponen en el suelo de la humedad comprendida entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento (PM), denominada agua útil.

La capacidad de campo es el máximo contenido de agua que puede retener un suelo en condiciones de libre drenaje, y se alcanza entre 24 y 72 horas después de haberse concluido el riego, según el tipo de suelo.

El punto de marchitamiento es el contenido de agua en el cual las plantas se marchitan de forma irreversible, es decir, que no se recuperan después de haber sido sometidas durante la noche a condiciones de un ambiente saturado de humedad.

Si bien la capacidad de campo y el punto de marchitamiento además de depender de la textura dependen de la estructura y de otros factores, con vistas a una simplificación práctica se han relacionado con la textura. En los cuadros 1.2 y 1.3 se presentan los valores medios de diversas propiedades físicas de los suelos, que deben ser utilizados con carácter orientativo, pues en la práctica los valores de las mediciones realizadas pueden diferir de los aquí propuestos, no obstante son aplicables en la mayoría de los suelos (ISRAELSEN, 1979; KELLER y BLIESNER, 1990).

**Cuadro 1.2. Resumen de las propiedades físicas del suelo (De ISRAELSEN y HANSEN, 1979)**

Textura del suelo	Total espacio poroso (%) W	Densidad $\rho_a$	Capacidad de campo (%) Acc	Marchitez permanente (%) Apm	Humedad total utilizable <sup>1</sup>		
					Peso seco (%) Acc - Apm	Volumen (%) (Acc - Apm) $\rho_a$	Au cm/m
Arenoso	38	1,65	9	4	5	8	8
	(32-42)	(1,55-1,80)	(6-12)	(2-6)	(4-6)	(6-10)	(7-10)
Franco-arenoso	43	1,50	14	6	8	12	12
	(40-47)	(1,40-1,60)	(10-18)	(4-8)	(6-10)	(9-15)	(9-15)
Franco	47	1,40	22	10	12	17	17
	(43-49)	(1,35-1,50)	(18-26)	(8-12)	(10-14)	(14-20)	(14-19)
Franco-arcilloso	49	1,33	27	18	14	19	19
	(47-51)	(1,30-1,40)	(23-31)	(11-15)	(12-16)	(16-22)	(17-22)
Arcilloso-arenoso	51	1,30	31	15	16	21	23
	(49-53)	(1,25-1,35)	(27-35)	(13-17)	(14-18)	(18-23)	(18-23)
Arcilloso	53	1,25	36	17	18	23	23
	(51-55)	(1,20-1,30)	(31-39)	(15-19)	(16-20)	(20-25)	(20-25)

**Nota:** Los intervalos normales son consignados entre paréntesis.

<sup>1</sup> La humedad fácilmente utilizable representa un 75% de la totalmente utilizable.

**Cuadro 1.3. Valores extremos y promedio de la humedad total utilizable en suelos de diferentes texturas (adaptado por KELLER y BLIESNER (1990) de Soil Conservation Service's (SCS) National Engineering Handbook)**

Textura del suelo	Clases texturales	Humedad total utilizable mm/m	
		Valores extremos	Valor medio
Muy gruesa	Arenas muy gruesas	33 - 62	42
Gruesa	Arenosa y arenosa franca	62 - 104	83
Moderadamente gruesa	Franco arenosa	104 - 145	125
Media	Franca y franco limosa	125 - 192	167
Moderadamente fina	Franco arcillosa, franco arcillo limosa y franco arcillo arenosa	145 - 208	183
Fina	Arcillo arenosa, arcillo limosa y arcillosa	133 - 208	192
Turbas y estiércoles		167 - 250	208

En la figura 1.1. se presentan los valores de la capacidad de campo, el punto de marchitamiento y el agua útil, relacionados con diferentes texturas de suelo.

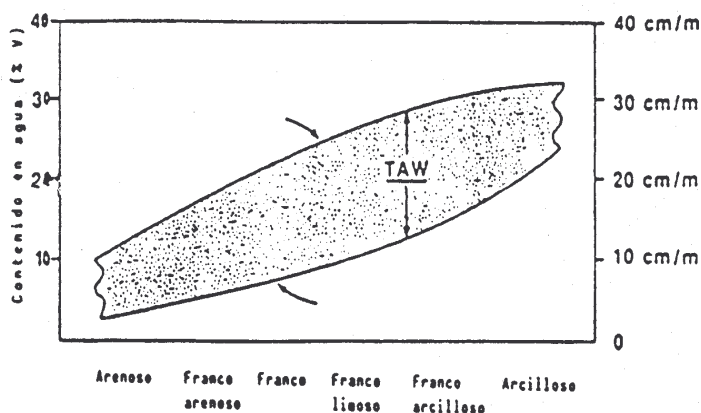


Figura 1.1. Valores representativos de agua útil para diferentes tipos de suelos.  
(Fuente: Walker y Skogerboe, 1987)

La capacidad de campo es un concepto definido de una forma imprecisa, pues el momento en que el suelo inicialmente saturado deja de perder agua por gravedad no está perfectamente determinado, ya que al principio el drenaje es muy rápido, pero con el paso del tiempo se vuelve muy lento. El potencial mátrico (que se estudia más adelante) correspondiente a la capacidad de campo oscila entre 1/10 y 1/3 de atmósfera.

El punto de marchitamiento también está definido de una forma imprecisa, pues la marchitez además de depender del contenido de humedad del suelo, depende de la evapotranspiración exigida a las plantas por las condiciones meteorológicas, de la salinidad del suelo, de la potencia del sistema radical, etc. No obstante la experiencia demuestra que su valor medio corresponde a 15 atm, pudiendo oscilar entre 10 y 20 atm. Lo cierto es que estas modificaciones tan grandes de potencial mátrico tienen poca importancia, pues corresponden a modificaciones muy pequeñas del contenido de agua.

En la figura 1.2. se presenta la distribución volumétrica de las tres fases del suelo: sólida, líquida y gaseosa.

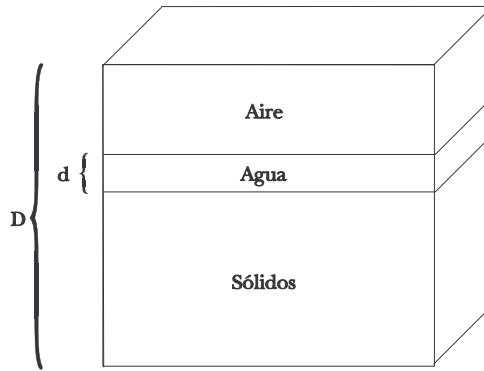


Figura 1.2. Esquema simplificado de una unidad de volumen del suelo

El contenido en agua expresado como porcentaje en volumen es:

$$A = \frac{d}{D} 100 \quad (1.1)$$

Por tanto el agua útil (humedad comprendida entre la CC y el PM) en un volumen de suelo  $D$ , se obtiene al despejar de la fórmula (1.1):

$$dt = \frac{Acc - Apm}{100} D \quad (1.2)$$

donde  $Acc$  es el contenido en agua a la capacidad de campo (% volumen) y  $Apm$  el contenido en agua al punto de marchitamiento (% volumen).

Si el suelo está formado por varios horizontes distintos, cada uno de volumen  $D_n$ , el agua útil se calcula de forma separada para cada horizonte, sumándose posteriormente los correspondientes a cada horizonte.

$$dt = \sum \left( \frac{Acc_n - Apm_n}{100} D_n \right) \quad (1.3)$$

El contenido en agua puede expresarse como porcentaje en peso, para lo cual basta multiplicar el numerador y denominador de (1.1) por sus respectivas densidades, es decir:

$$A' = \frac{d * 100}{D * \rho_a} \quad (1.4)$$

siendo  $\rho_a$  la densidad aparente del suelo ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ), puesto que la densidad del agua es  $1 \text{ gr}/\text{cm}^3$ . En este caso la expresión (1.2) y (1.3) quedarían respectivamente:

$$dt = \frac{A'cc - A'pm}{100} D * \rho_a \quad (1.5)$$

$$dt = \sum \left( \frac{A'cc - A'pm}{100} D_n * \rho_a \right) \quad (1.6)$$

donde  $A'cc$  ( $A'pm$ ) es el contenido en agua en la capacidad de campo (punto de marchitamiento) expresado como porcentaje en peso.

Si los datos del agua útil se disponen en unidades de altura de agua/altura de suelo (1.2) y (1.3) se convierten en (1.2') y (1.3'), siendo  $D$  y  $D_n$  los valores de las profundidades del suelo y de cada uno de los horizontes respectivamente.

$$dt = Au * D \quad (1.2')$$

$$dt = \sum ( Au_n * D_n ) \quad (1.3')$$

## 2.2. POTENCIAL HÍDRICO DEL SUELO

En cuanto a la extracción del agua del suelo por parte de las plantas, es más interesante conocer la energía con que el agua es retenida, que el propio contenido de humedad, pues de nada sirve que un suelo contenga una gran cantidad de agua si las raíces de las plantas no son capaces de extraerla.

El agua del suelo está sometida a la acción de una serie de factores que tienden a retenerla o a expulsarla. El potencial hídrico del suelo (o potencial del agua del suelo) puede considerarse como la cantidad de trabajo que es necesario aplicar para transportar reversible e isotérmicamente la unidad de masa de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto de suelo considerado. Puede medirse en términos de trabajo dividido por masa (en cuyo caso se denomina potencial específico y se suele medir en julio/kg o ergio/g), en términos de trabajo dividido por volumen (potencial de presión, expresado en bar o atmósfera;  $1 \text{ bar} = 0.987 \text{ atm}$ ), o dividido por peso (potencial de peso, expresado en unidades de longitud;  $1 \text{ bar} = 10,20 \text{ m}$  de columna de agua).

El potencial hídrico del suelo ( $\psi$ ) tiene 4 componentes:

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_g + \psi_p \quad (1.7)$$

donde: El potencial mátrico ( $\psi_m$ ) está generado por los mecanismos de retención de agua por el suelo (adhesión y cohesión); dado que la presión que origina se opone a la expulsión del agua del suelo, toma siempre un valor negativo, de forma que cuanto más seco está un suelo, menor (mayor en valor absoluto) es el potencial mátrico. Ahora bien, para evitar el signo negativo en algunas ocasiones, en lugar del potencial mátrico se habla de la tensión o succión mátrica, que es igual pero con signo positivo. Como se ha visto anteriormente, el potencial puede medirse como unidad de longitud (altura en cm. de columna de agua), pero como su valor puede alcanzar valores absolutos muy elevados SCHOFIELD definió en 1935 la escala "  $pF$  ", que es el logaritmo en base decimal de la tensión del agua del suelo.

$$pF = \log(-\psi_m) \quad (1.8)$$

Ambos términos (tensión y  $pF$ ) están casi en desuso.

Para un mismo contenido de humedad, los distintos tipos de suelos retienen el agua con distinta energía, por tanto la relación humedad-potencial mátrico varía para cada tipo de suelo. Las curvas de retención de humedad (curvas que expresan la relación humedad-potencial mátrico) varían para cada tipo de suelo, como puede observarse en la figura 1.3. En abcisas se representa la fracción extraída del agua útil (en tanto por uno) al aplicar la succión ( $-\psi_m$ ) indicada en ordenadas. Se observa que las distintas curvas coinciden tanto para los valores de 0,1 atm. (CC) como de 15 atm. (PM).

Los tramos de las curvas próximos a la horizontalidad se producen cuando a pequeñas diferencias de succión hídrica ( $-\psi_m$ ) corresponden grandes diferencias de humedad, lo cual quiere decir que en esos tramos hay muchos poros del mismo tamaño. En cambio los tramos más verticales indican la existencia de pocos poros del mismo tamaño en los tramos correspondientes. Las inclinaciones próximas a 45° denotan la existencia de una distribución uniforme de los poros.

$\psi_o$  es el potencial osmótico. Como el agua del suelo es una solución salina puede dar lugar al fenómeno de ósmosis. Cuando dos soluciones de distinta concentración están separadas por una membrana semipermeable, se produce un movimiento del agua desde la solución más diluida hacia la más concentrada. Este movimiento de agua está originada por la presión osmótica, que equivale en magnitud al potencial osmótico.

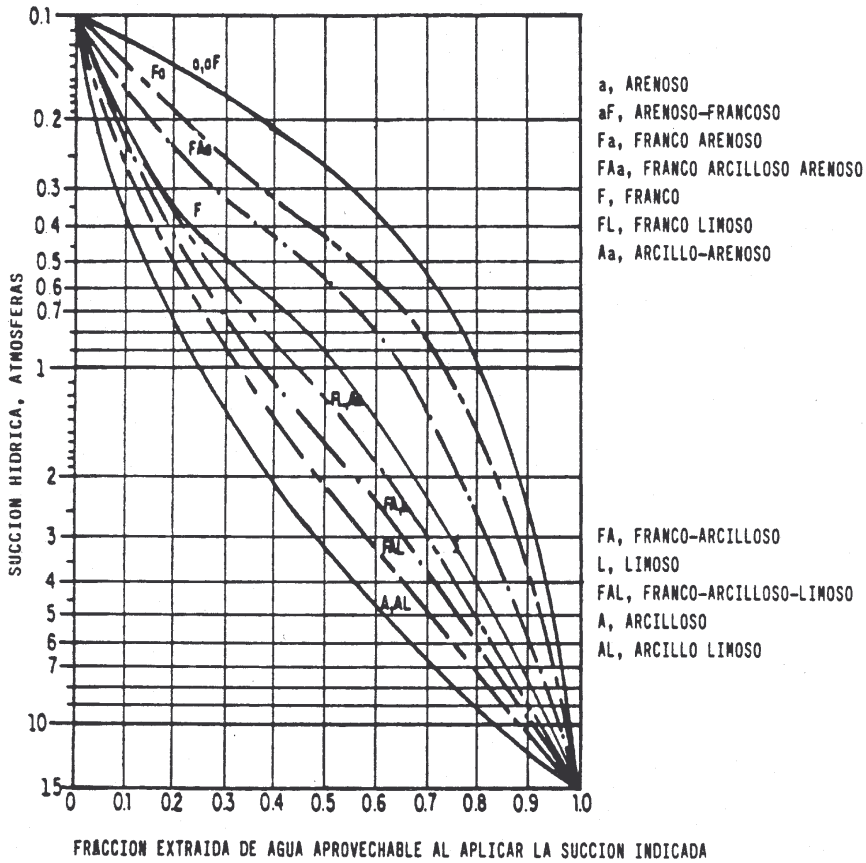


Figura 1.3. Relación entre la fracción de agua útil aprovechable y la succión aplicada al suelo, en función de la textura. (Fuente: GRASSI, 1987)

El potencial osmótico es directamente proporcional al número de moléculas de soluto:

$$\psi_o = -MRT \tag{1.9}$$

donde:

$\psi_o$  se expresa en atmósferas.

$M$  es la molalidad (nº de moles de soluto en 1.000 g de disolvente).

$R$  es la constante universal de los gases (0,0820 l atm/g mol).

$T$  es la temperatura absoluta.

En la práctica el potencial osmótico puede determinarse en función de la presión de vapor o del descenso del punto de congelación del extracto de saturación (RAVINA, 1982), pero debido a la existencia de una estrecha relación entre la conductividad eléctrica y el potencial osmótico del extracto de saturación, es muy cómodo utilizar la relación obtenida empíricamente por Richards:

$$\psi_{oe} = -0,36 C E e \quad (1.10)$$

donde:

$\psi_o$  es el potencial osmótico del extracto de saturación, expresado en atmósferas.

$C E e$  es la conductividad eléctrica del extracto de saturación en dS/m (mmhos/cm).

La presión osmótica de la solución del suelo se obtiene a partir de la presión osmótica del extracto de saturación, por medio de una simple corrección proporcional, la cual viene dada por:

$$\psi_o = \frac{P_s}{\theta} \psi_{oe} \quad (1.11)$$

donde:

$\psi_o$  es el potencial osmótico de la solución del suelo.

$P_s$  es el porcentaje de saturación (%).

$\theta$  es la humedad (%) en las condiciones consideradas.

El potencial gravitacional ( $\psi_g$ ) es la energía debida a la altura geométrica del punto considerado respecto al plano de referencia.

El potencial de presión ( $\psi_p$ ) únicamente se presenta en los suelos saturados, y es el potencial correspondiente a la presión ejercida por el agua (que satura el suelo).

En suelos saturados  $\psi_p$  tiene un valor determinado, mientras  $\psi_m = 0$ , en cambio en los suelos no saturados  $\psi_p = 0$  y  $\psi_m$  tiene un valor no nulo.



### 2.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA RETENCIÓN DE AGUA

\* **La textura** del suelo tiene un gran efecto sobre la capacidad de retención del agua por parte del suelo, dado que el agua es retenida en forma de película sobre la superficie de las partículas y en los pequeños poros existentes entre ellas. Por ello, los suelos con textura fina (arcillosa) que tienen un gran número de partículas con una gran superficie total, y que tienen un elevado volumen de pequeños poros distribuidos entre sus partículas, presentan una elevada retención de agua, mucho mayor que la correspondiente a la de los suelos con textura gruesa (arenosos). KRAMER (1974), citando a DAY et al., señala que la superficie disponible para fijar el agua pasa de menos de 1.000 cm<sup>2</sup>/g en arenas gruesas a más de 1.000.000 cm<sup>2</sup>/g en las arcillas.

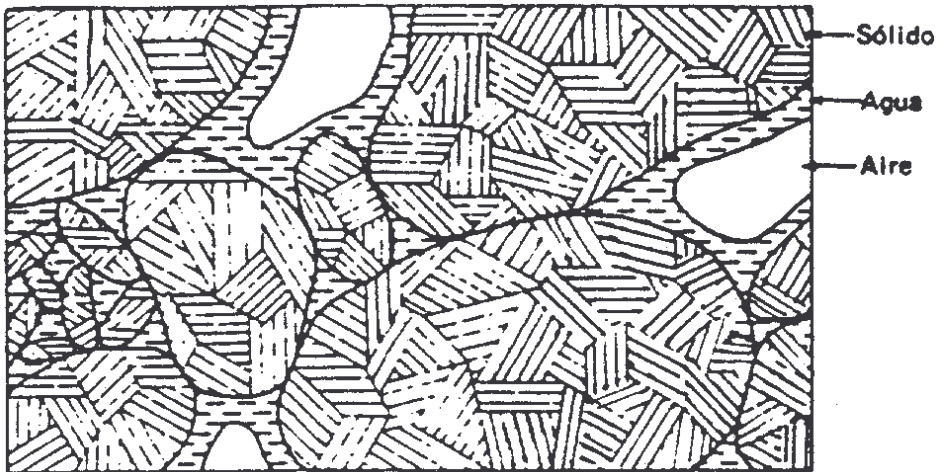


Figura 1.4. El agua del suelo almacenada en partículas alrededor de las partículas y llenando los poros pequeños de un suelo a capacidad de campo. (De THOMPSON y TROEH, 1980)

Además, las micelas de arcilla tienen carga negativa, causada principalmente por la sustitución de iones de aluminio y silicio por otros cationes de menor valencia dentro de la red cristalina, con lo cual estas cargas negativas se unen al polo positivo de las moléculas de agua, estableciendo un puente de hidrógeno.

\* **El tipo de arcilla** también influye en la retención de agua, tanto de un modo directo como de un modo indirecto. El efecto directo se debe a la capacidad de expansión y absorción interna de agua que presentan las diferentes arcillas; el indirecto es debido a la influencia de las diversas arcillas en la estructura del suelo (PASCUAL y NOGUERA, 1987).

- \* **La materia orgánica** también ejerce efectos de modo directo e indirecto. El directo porque es capaz de retener un peso de agua superior al suyo propio, mientras que el efecto indirecto se debe a su influencia sobre la estructura (PASCUAL y NOGUERA, 1987).
- \* **La estructura** tiene una gran importancia en la retención de agua, de forma que los suelos que presentan una buena estructura contienen un gran volumen de poros de todos los tamaños, tanto macroporos (que retienen mucho aire y poca agua y por tanto favorecen una buena aireación) como microporos (que retienen agua) presentando una elevada capacidad de retención de agua y una aireación adecuada. Así pues, los factores floculantes de los coloides del suelo, como son un elevado contenido de materia orgánica, una proporción elevada de calcio en el complejo arcillo-húmico, un suelo salino etc., proporcionan estabilidad a la estructura, redundando en una mayor retención de agua. En contra, los factores dispersantes, como por ejemplo una proporción elevada de sodio en el complejo arcillo-húmico, tienden a reducir la estabilidad estructural y por tanto a disminuir la retención de agua.

En la figura 1.5 se presenta la relación humedad-potencial mátrico en un suelo con agregados y en un suelo compacto.

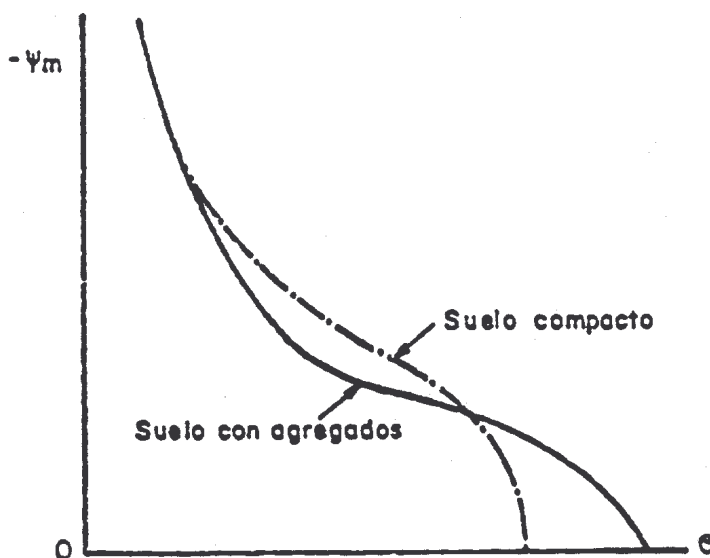


Figura 1.5. Relación humedad-potencial mátrico en un suelo con agregados y un suelo compacto

La importancia relativa de la textura y de la estructura varía con el potencial mátrico (es decir con la humedad del suelo). Cuando el potencial mátrico se aproxima a cero (proximidad a la saturación) el efecto de la estructura domina sobre el de la textura y por tanto la humedad correspondiente debe medirse a partir de muestras inalteradas, mientras que para valores elevados (en valor absoluto) del potencial mátrico, la humedad puede medirse en muestras alteradas.

#### 2.4. HISTÉRESIS

La relación entre el potencial mátrico y el contenido en agua del suelo no es única. Los poros del suelo son variables en forma y tamaño, conectándose unos con otros de diferentes maneras. Los poros grandes están aislados unos de otros por poros más pequeños, de manera que son los pequeños los primeros en llenarse cuando el suelo se está humedeciendo; pero estos poros al desecarse el suelo, no se vacían necesariamente en el orden inverso al que se llenan cuando el suelo se está humedeciendo; de hecho para un mismo valor de potencial mátrico la humedad del suelo es mayor durante la desecación (desorción) que durante el humedecimiento (sorción). Este fenómeno se denomina histéresis y se representa en la figura 1.6. Si la relación suelo-agua se estudia para conocer el comportamiento del conjunto suelo-agua frente al sistema radical, debería considerarse el  $\psi_m$  correspondiente al desecado. Excelentes discusiones sobre histéresis pueden encontrarse en BAVER et al., (1972), HILLEL (1971) y NIELSEN et al., (1972).

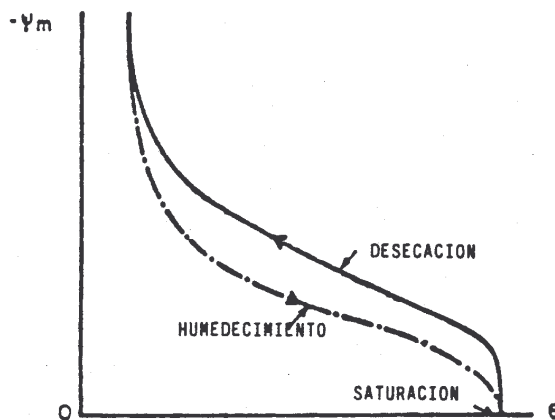


Figura 1.6. Relación humedad-potencial mátrico. Histéresis

### **2.5. MEDICIÓN DEL CONTENIDO POTENCIAL Y DEL HÍDRICO DEL AGUA DEL SUELO**

CAMPBELL y MULLA (1990) han realizado un magnífico estudio sobre las ventajas e inconvenientes que presentan los distintos métodos para medir el contenido de agua en el suelo (gravimétricos, nucleares, microondas), así como del potencial hídrico (tensiómetros, placas de presión, métodos de resistencia eléctrica, de papel de filtro y sicómetros de termopar).

Para medir directamente el contenido hídrico del suelo se utiliza el método gravimétrico, mientras que de forma indirecta puede medirse a través de la atenuación de rayos gamma, la sonda de neutrones, o la reflectometría en el tiempo (*Time Domain Reflectometry* [TDR] y *Frequency Domain Reflectometry* [FDR]) (ARTIGAO y GUARDADO, 1993; CASTELAO et al., 1995).

Varios son los aparatos que se pueden utilizar para la determinación del potencial hídrico o de alguno de sus componentes: los tensiómetros (miden la suma del potencial mátrico y el gravitacional), los bloques de yeso y los sicómetros de termopar (ambos miden la suma del potencial mátrico y del osmótico). Los equipos de placa o membrana de presión se utilizan para medir el contenido hídrico del suelo en función del potencial mátrico.

## **3. PROFUNDIDAD DE ENRAIZAMIENTO**

Como se ha visto anteriormente, para conocer el agua útil que contiene un suelo, es necesario tener en cuenta la profundidad del mismo y evidentemente esta profundidad debe corresponder a la de enraizamiento de la planta a cultivar.

Del análisis de la humedad del suelo a distintas profundidades tras haber transcurrido de 8 a 12 días después de un riego o lluvia intensa, se desprende la proporción de agua extraída de cada zona radical (expresada como porcentaje del total).

En la figura 1.7 se presenta el modelo típico de consumo de agua por las plantas; se observa que si se divide la profundidad total de enraizamiento en cuatro partes iguales, la cantidad de agua extraída en cada una de ellas, de arriba a abajo, corresponde al 40, 30, 20 y 10% del total respectivamente. Debido a esta distribución del consumo de agua, para el diseño del riego no se considera la profundidad máxima de enraizamiento, sino lo que se denomina profundidad efectiva, que para algunos autores comprende el 75% de la profundidad total, mientras que para otros comprende entre el 70 y el 90% de la misma.

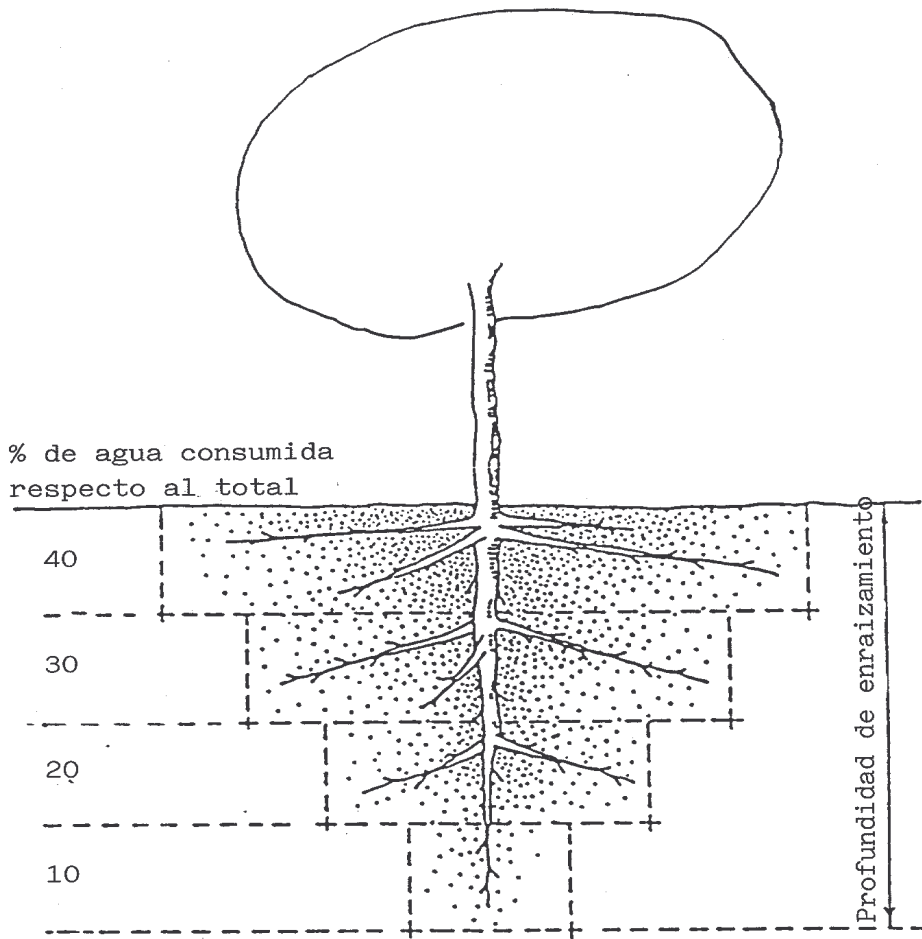


Figura 1.7. Agua consumida por las plantas

Si bien esto puede considerarse como general, existen multitud de factores que pueden modificar este modelo de extracción, por ejemplo la propia naturaleza del cultivo. La figura 1.8 muestra la distribución en el suelo del sistema radical de varias plantas.

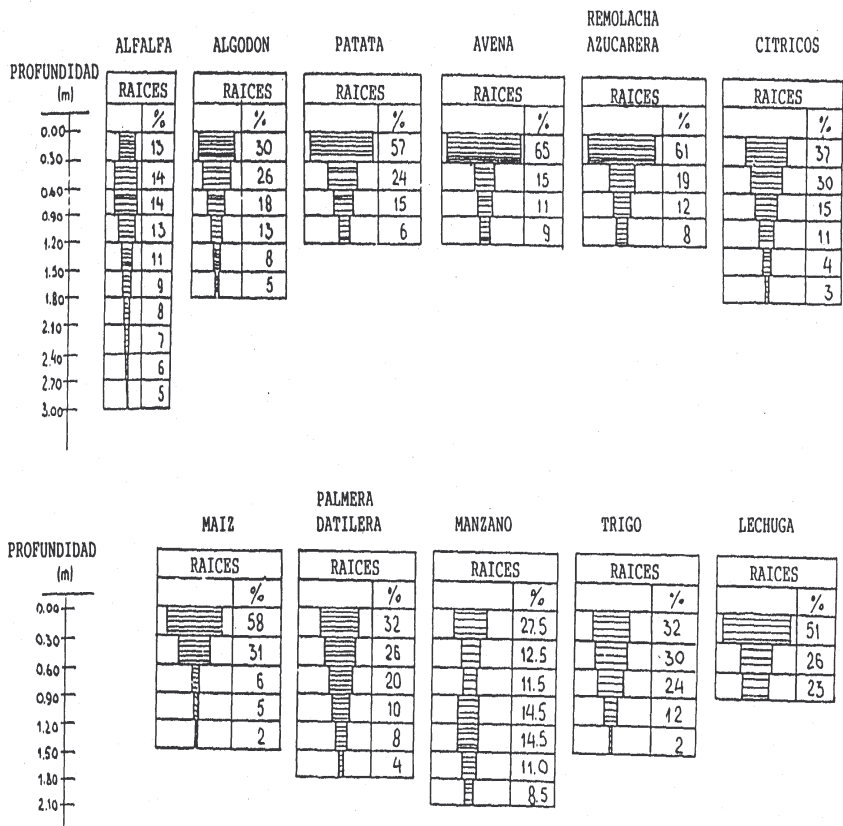


Figura 1.8. Distribución de raíces a varias profundidades en suelos de perfil uniforme (De NEUMAN, 1982)

La profundidad del sistema radical depende de la especie y de la fase de su ciclo vegetativo, siendo los datos encontrados al respecto en la bibliografía muy variables según los diferentes autores. En general puede decirse que la profundidad de las raíces de los cultivos permanentes (frutales, alfalfa, etc.) en suelos medios puede superar 1,5-2 m., la de los cereales y cultivos industriales puede llegar hasta 0,6-1 m., y la de los cultivos hortícolas en general no supera los 35-50 cm. (GRASSI, 1987; OLLIER y POIREE, 1981).

Entre las características físicas del suelo destaca la textura, de forma que el sistema radical es más profundo en los suelos de textura gruesa que en los de textura fina, pudiendo llegar a reducirse a la mitad en estos últimos.

El cuadro 1.4 da una orientación de la profundidad y de la disponibilidad de agua en función del cultivo y de la textura del suelo.

**Cuadro 1.4. Capacidad provisional de almacenaje de agua en diferentes combinaciones de suelo y vegetación (según THORNTHWAITTE-MATHER, 1957)**

TIPO DE SUELO	ZONA RADICAL (m)	DISPONIBILIDAD DE AGUA (mm)
a) Espinacas, guisantes, remolacha, zanahoria, etc.		
A.- Arena fina	0,50	50
B.- Franco arenoso	0,50	75
C.- Franco limoso	0,62	125
D.- Franco arcilloso	0,40	100
E.- Arcilloso	0,25	75
b) Maíz, algodón, tabaco, cereales		
A.- Arena fina	0,75	75
B.- Franco arenoso	1,00	150
C.- Franco limoso	1,00	200
D.- Franco arcilloso	0,80	200
E.- Arcilloso	0,50	150
c) Alfalfa, pastos, arbustos		
A.- Arena fina	1,00	100
B.- Franco arenoso	1,00	150
C.- Franco limoso	1,25	250
D.- Franco arcilloso	1,00	250
E.- Arcilloso	0,67	200
d) Montes, frutales		
A.- Arena fina	1,50	150
B.- Franco arenoso	1,67	250
C.- Franco limoso	1,50	300
D.- Franco arcilloso	1,00	250
E.- Arcilloso	0,67	200
e) Bosques desarrollados		
A.- Arena fina	2,50	250
B.- Franco arenoso	2,00	300
C.- Franco limoso	2,00	400
D.- Franco arcilloso	1,60	400
E.- Arcilloso	1,17	350

El cuadro 1.5 presenta una clasificación de diversos cultivos hortícolas en función de la profundidad de su sistema radical.

**Cuadro 1.5. Clasificación de diversos cultivos hortícolas en función de la profundidad de su sistema radical (Fuente: LORENZ y MAYNARD, 1980)**

SUPERFICIAL (45-60 cm)	MODERADAMENTE PROFUNDO (90-120 cm)	PROFUNDO (más de 120 cm)
Ajo	Berenjena	Alcachofa
Apio	Calabacín (verano)	Batata
Brócoli	Guisante	Calabacín
Cebolla	Judía	Calabaza
Col	Melón	Chirivía
Col de Bruselas	Mostaza	Espárrago
Col china	Nabo	Judía de Lima
Coliflor	Pataca	Sandía
Escarola	Pepino	Tomate
Espinaca	Pimiento	
Lechuga	Remolacha	
Maíz	Zanahoria	
Patata		
Puerro		
Rábano		

En el cuadro 1.6 se presentan las profundidades efectivas (que contienen aproximadamente el 80% de las raíces "alimentadoras") de diversos cultivos en su fase adulta, en suelos profundos, homogéneos y bien drenados.



**Cuadro 1.6. Profundidad efectiva (m) de las raíces en diversos cultivos en fase de maduración, en suelos profundos, homogéneos y bien drenados (Fuente: KELLER y BLIESNER, 1990; DOORENBOS y PRUITT, 1976; WALKER y SKOGERBOE, 1987)**

Acelga*	0,9	Judía de Lima	0,6 - 1,2
Aguacate	0,6 - 0,9	Judía (verde)	0,5 - 0,9
Albaricoque	0,6 - 0,9	Judía (seca)	0,6 - 1,2
Alcachofa	0,6 - 0,9	Lechuga	0,2 - 0,5
Alfalfa	1,2 - 1,8	Lino	0,6 - 0,9
Algodón	0,6 - 1,8	Maíz dulce	0,4 - 0,6
Almendro	0,6 - 1,2	Maíz (grano y ensilar)	0,6 - 1,2
Apio	0,6	Manzano	0,8 - 1,2
Avena	0,6 - 1,1	Melocotonero	0,6 - 1,2
Berenjena	0,8	Melón*	1,5
"Berries"	0,6 - 1,2	Melón Cantalupo	0,6 - 1,2
Boniato	0,6 - 0,9	Mostaza*	1,1
Brócoli	0,6	Nabo	0,5 - 0,8
Cacahuete	0,4 - 0,8	Nogal	1,7 - 2,4
Café	0,9 - 1,5	Olivo	0,9 - 1,5
Calabacín	0,6 - 0,9	Pasto del Sudán	0,9 - 1,2
Calabaza	0,9 - 1,2	Pastos	0,3 - 0,8
Caña de azúcar	0,5 - 1,1	Patata	0,6 - 0,9
Cártamo	0,9 - 1,8	Pepino	0,4 - 0,6
Cebada	0,9 - 1,1	Peral	0,6 - 1,2
Cebolla	0,3 - 0,6	Pimiento	0,6 - 0,9
Cerezo	0,8 - 1,2	Plátano	0,3 - 0,6
Ciruelo	0,8 - 1,2	Rábano	0,3
Cítricos	0,9 - 1,5	Remolacha azucarera	0,6 - 1,2
Col de Bruselas	0,6	Sandía	0,6 - 0,9
Col	0,6	Soja	0,6 - 0,9
Coliflor	0,6	Sorgo (ensilar)	0,9 - 1,2
Chirivía	0,6 - 0,9	Sorgo (grano y dulce)	0,6 - 0,9
Espárrago	1,2 - 1,8	Tabaco	0,6 - 1,2
Espinaca	0,4 - 0,6	Tomate	0,6 - 1,2
Fresón	0,3 - 0,5	Trébol*	0,6
Fruto de la pasión	0,3 - 0,5	Trigo	0,8 - 1,1
Girasol	0,9 - 1,5	Vid	0,5 - 1,2
Guisante	0,4 - 0,8	Zanahoria	0,4 - 0,6
Higuera	0,9		

El 80% de las raíces "alimentadoras" están aproximadamente en el 60% superficial del perfil del suelo ocupado por las raíces.

\* Estos valores se refieren a la profundidad media del sistema radical.

La profundidad del sistema radical aumenta con el crecimiento de la planta, por tanto es interesante conocer su profundidad en cada fase del cultivo, para intentar humedecer en cada riego únicamente el suelo ocupado por las raíces, evitando así pérdidas por percolación profunda.

De forma aproximada, la profundidad se puede estimar:

$$PR = PRmin + (PRmax - PRmin) Rf \quad (1.12)$$

siendo:

*PRmin* : Profundidad radical en el momento de la siembra (profundidad de siembra). Si el cálculo se inicia cuando la plántula emerge, se considera *PRmin* = 0.1-0.15m.

*PRmax* : PR máxima (en la floración en los cultivos de grano)

*Rf* : factor de crecimiento radical (representa la velocidad de crecimiento de las raíces). Puede *estimarse (por ejemplo) en función de la relación lineal con el tiempo*:

$$Rf : \frac{t}{te - m}$$

*t*: es el tiempo desde la emergencia.

*te - m* : es el tiempo desde la emergencia hasta que se alcanza la *PRmax* .

#### 4. UMBRAL ÓPTIMO DE RIEGO

El momento óptimo de riego condiciona tanto la dosis de riego como el intervalo entre los mismos. En los riegos de superficie (y en parte en los de aspersión no mecanizados ni de cobertura total) con el objeto de disminuir al máximo la mano de obra, se tiende a alargar lo máximo posible el intervalo entre riegos, siendo muy importante en estos casos la determinación del momento a regar. En cambio esta determinación no es tan importante en los riegos de alta frecuencia (localizados y de aspersión), pues debido a la elevada frecuencia de los riegos, el suelo siempre posee contenidos elevados de humedad.

Realmente los cultivos tienen a su disposición el contenido de agua comprendido entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento, es decir, lo que hemos denominado agua útil. Por tanto el intervalo máximo supondría no regar hasta que la humedad del suelo llegara hasta el punto de marchitamiento, con lo cual la dosis a aportar sería la máxima, e igual al agua útil. Pero esto no es viable en la práctica, porque entonces las plantas ya han sufrido daños irreversibles.

Como se ha visto anteriormente, los suelos con distinta textura poseen diferentes curvas Potencial mátrico- Humedad, por ello HIDALGO (1971) recomendaba regar cuando se había agotado diferentes porcentajes del agua útil en función de la textura del suelo. Así, en los suelos muy arenosos o con grava recomendaba regar cuando se hubiera agotado el 40% del agua útil, el 50% en los arenosos, 60% en los francos y 66% en los arcillosos. OLLIER y POIREE (1981) recomiendan regar antes de que se haya agotado 2/3 del agua útil. Para PIZARRO (1987) frecuentemente se riega cuando se ha agotado 1/3 del agua útil. Para GRASSI (1987) en la práctica no se admite un agotamiento superior al 40-70% del agua útil. Vemos pues, que no todos los autores coinciden en el momento óptimo de riego. Pensamos que una regla práctica adecuada con fines de diseño puede ser la dada por GRASSI (1987) consistente en regar cuando se ha agotado el 50% del agua útil.

Parece evidente que esta forma de elegir el momento óptimo de riego no es la ideal, pues no tiene en cuenta el tipo de cultivo, y la experiencia ha demostrado que no todas las plantas son capaces de extraer la misma cantidad de agua de un suelo, ni responden de igual manera ante una reducción de la ET real, dependiendo además de la fase del ciclo vegetativo, de las condiciones meteorológicas que exigirán de la planta una ET determinada.

KELLER Y BLIESNER (1990) establecen unas recomendaciones de regar cuando se ha consumido el 25-40% del agua útil en cultivos de alto valor y/o de raíces superficiales; el 40-50% en cultivos con raíces de profundidad intermedia, y el 50% en cultivos con raíces profundas y/o de menor valor.

El cuadro 1.7 presenta 4 grupos de cultivos clasificados según su respuesta a la falta de humedad en el suelo. En el cuadro 1.8 figura la fracción de agotamiento del agua útil del suelo permitida, expresada en tanto por uno, según el grupo de cultivo y la Evapotranspiración máxima.

**Cuadro 1.7. Grupos de cultivos de acuerdo con el del agua del suelo**

GRUPO	CULTIVOS
1	Cultivos hortícolas de raíz superficial
2	Col, guisante, plátano, tomate, vid
3	Alfalfa, cacahuete, cítricos, girasol, judía, piña, sandía, trigo
4	Algodón, caña de azúcar, cártamo, maíz, olivo, remolacha azucarera, soja, sorgo, tabaco

**Cuadro 1.8. Fracción de agotamiento del agua del suelo ( $p$ ) para grupos de cultivos y evapotranspiración máxima ( $ET_m$ ) (Fuente: DOORENBOS y KASSAM, 1979)**

GRUPO DE CULTIVO	$ET_m$ mm/día								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,50	0,425	0,35	0,30	0,25	0,225	0,20	0,20	0,175
2	0,675	0,575	0,475	0,40	0,35	0,325	0,275	0,25	0,225
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375	0,35	0,30
4	0,875	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,425	0,40

Según estas premisas, se regará cuando se haya consumido  $p * Au$  (donde  $Au$  es el agua útil,  $dt$  de la expresión (1.2)), que será precisamente la lámina de agua a aportar (dosis de riego).

Ahora bien, también debe tenerse en cuenta la salinidad del suelo y del agua de riego, pues al incrementar la salinidad de la solución del suelo se incrementa el potencial osmótico, y por tanto la dificultad en la extracción del agua por parte de las plantas. Por todo ello parece más aconsejable definir el momento óptimo de riego en función del potencial hídrico que en función del contenido en humedad, aunque sea necesario conocer la relación potencial hídrico-contenido en humedad para la determinación de la dosis y del intervalo de riego.

En el cuadro 1.9 se presenta información sobre la tensión de humedad del suelo que toleran diversos cultivos sin provocar una reducción de los rendimientos, no aplicables en períodos críticos con respecto a la humedad del suelo.

**Cuadro 1.9. Niveles de agotamiento del agua del suelo, expresados como tensiones de humedad del suelo (atm\*), tolerados por distintos cultivos para los que la ET (cultivo) se mantiene en el nivel previsto y se obtienen unos rendimientos máximos (Fuente: DOORENBOS y PRUITT, 1976; PIZARRO, 1987)**

Aguacate	0,5	Judías	0,6-1,0*
Alfalfa	0,8-1,5*	Lechuga	0,4-0,6
Algodón	1,0-3,0	Limonero	0,4
Apio	0,2-0,3	Maíz*	0,5-1,5
Banana	0,3-1,5	Melón	0,3-0,8
Cártamo	1,0-2,0*	Patatas	0,3-0,7
Caña de azúcar	0,8-1,5*	Remolacha azucarera	0,6-0,8
Cebolla	0,4-0,7	Soja	0,5-1,5
Cereales de invierno	0,4-1,0	Sorgo	0,6-1,3*
Cítricos	0,5-1,0	Tabaco temprano	0,3-0,8
Coles	0,6-1,0	Tabaco tardío	0,8-2,5
Flores y plantas ornamentales	0,1-0,5	Trébol	0,3-0,6
Fresas	0,2-0,5	Tomate	0,5-1,5
Frutales de hoja caduca	0,6-1,0	Trigo	0,8-1,5
Gramíneas	0,4-1,0	Trigo (maduración)	3,0-4,0
Guisantes	0,3-0,8	Vid	0,4-1,0
		Zanahoria	0,5-0,7

Los valores superiores se refieren a condiciones de ET baja y los inferiores a ET elevada.

\* Valores superiores a los indicados, durante la fase de maduración.

Conocido el óptimo del cultivo, el momento óptimo se puede determinar con la utilización de tensiómetros (en los suelos no salinos) o de bloques de yeso o sicómetros de termopar (en los casos con problemas de salinidad).

No obstante, para calcular la dosis de riego es necesario conocer la relación  $\psi - \theta$  (potencial hídrico-humedad), que puede determinarse mediante los equipos de placas o membranas de presión (según se ha visto en el epígrafe 2.5) en suelos no salinos. En los suelos salinos la dosis de riego puede determinarse en función de la conductividad eléctrica del extracto de saturación. En efecto, de los cuatro componentes del potencial hídrico del suelo (expresión 1.7) los potenciales de presión y el gravimétrico no influyen en la absorción del agua, por lo tanto el problema se reduce a conocer las relaciones entre el contenido de humedad del suelo ( $\theta$ ) y los potenciales mátricos ( $\psi_m$ ) y osmótico ( $\psi_o$ ).

La relación  $\psi_m - \theta$  es un dato de laboratorio, o en caso contrario puede estimarse de forma aproximada en función de la textura del suelo (Fig. 1.3).

De las expresiones (1.10) y (1.11) se concluye:

$$\psi_o = -0,36 \frac{PS}{\theta} C E e \quad (1.13)$$

siendo las unidades las indicadas en las expresiones (1.10) y (1.11), pudiendo calcularse de esta manera  $\psi_o$  cuando se conoce la conductividad eléctrica del extracto de saturación ( $C E e$ ), el porcentaje de saturación ( $PS$ ) y el contenido en humedad (% en volumen).

Sumando los datos  $\psi_o$  y  $\psi_m$  correspondientes a cada contenido de humedad ( $\theta$ ) e igualando al potencial hídrico que tolera cada cultivo sin provocar disminución del rendimiento, se obtiene la humedad a la que conviene regar y por tanto, la dosis de riego:

$$dr = D \frac{Acc - \theta}{100} \quad (1.14)$$

## 5. INFILTRACIÓN

La infiltración, velocidad de infiltración o velocidad de entrada, puede definirse como la velocidad de penetración del agua en el suelo, cuando la superficie del terreno está cubierta por una capa de agua poco profunda (GRASSI, 1988).

Tiene dimensiones de velocidad ( $LT^{-1}$ ); en efecto puede considerarse como la lámina de agua ( $L$ ) admitida por el suelo por unidad de tiempo ( $T^{-1}$ ), o bien como volumen de agua absorbido ( $L^3$ ) por unidad de superficie ( $L^2$ ) y unidad de tiempo ( $T^{-1}$ ). Generalmente se expresa bien en mm/h (mm/min, cm/h) o bien en  $l/m^2$ seg ( $l/m^2$ min).

Si se representan gráficamente en función del tiempo la infiltración (velocidad de infiltración) y la infiltración acumulada, se obtienen dos curvas como las de la figura 1.9.

**Para seguir leyendo haga click aquí**