

**RÉGIMEN HÍDRICO DEL SUELO Y
PRODUCCIÓN DE VIÑAS BAJO DIFERENTES
SISTEMAS DE RIEGO EN RAIMAT
(LLEIDA, ESPAÑA)**

Tesis doctoral presentada por: Humberto Carlos Dalurzo

Director de Tesis: Dr. Ildefonso Pla Sentis

Director

Doctorando



**Universidad de Lleida
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Agraria
Departamento de Medio Ambiente y
Ciencias del Suelo
Lleida 2010**



Intégrate a la naturaleza, coopera con ella y será tu mejor aliada. Concíbela como una unidad e interprétala con todo su poder infinitamente superior al tuyo. No trates de cambiar en un instante lo que ha costado milenios en ser ordenado. Mas bien, se su humilde interrogador y cultivador para descubrir su funcionamiento colaborando en su equilibrio.

Interpreta sus leyes en los ruidos del viento entre las ramas, en el silencio de las montañas, en la música de sus ríos, escucha y observa atentamente. Sobre todo ámala, como un hijo que nace de ella y que pertenece a ella. Transfórmate en el protector de tu medio, de tu entorno y de tu hábitat y ella te susurrará sus secretos convirtiéndose en tu legado y el de tus hijos para toda la humanidad.

Humberto Carlos Dalurzo

AGRADECIMIENTOS:

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a:

Mi compañera, amiga y esposa Mirian, quien siempre acompañó mis proyectos, los alentó y estimuló, haciéndome sentir su presencia en cada instante y sin cuyo apoyo no hubiese logrado cristalizar este objetivo.

A amigos, integrantes de la Cátedra de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNNE y a las autoridades de dicha Facultad que me alentaron en este proyecto.

A quienes me becaron con fondos del Convenio entre: el Ministerio de Educación Ciencia y Tecnología, la Universidad Nacional del Nordeste (U.N.N.E.) de Argentina y la Fundación Carolina de España.

A mi director de Tesis el Dr. Ildelfonso Pla Sentis, el “Gran Jefe”, por sus consejos, por brindar sus conocimientos desinteresadamente y por ayudarme cuando lo solicité.

A mi amigo Dr. Francisco “Kiko” Fonseca por haber trabajado “codo a codo” en el campo, sufriendo juntos las penurias de los intensos fríos y los aplastantes calores de Lleida, por tomar datos cuando no pude hacerlo, por recibir su ayuda en el laboratorio y en gabinete y por sus buenos y oportunos consejos.

Al Dr. Francesc Ferrer de Lab Ferrer por proveerme los sensores de FDR, dataloggers y el WP4-T usados en este trabajo.

Al Dr. José A. Martínez Casanovas, Director del Dpto de Sòls i Medi Ambient, por su permanente apoyo y facilitarme el GPS y los mapas NDVI y a la Lic. Cs. Amb. Silvia Espinal por su inestimable colaboración en el uso de estas herramientas y brindarme dicha información.

A Clara Llana, la reciente y “novel padrina”, especialista en cualquier trámite administrativo universitario, dispuesta a informarme y ayudarme en lo que necesitase.

A Montse Antunez por su predisposición a tender una mano en el laboratorio con camaradería y buena voluntad.

A la Dra Rosa Poch por brindarme su opinión y conocimientos de las calicatas de Raimat in situ. A los Dres Miquel Pascual, Josep Villar, Carles Balash y Francesc Castellví por asesoramiento y detalles bibliográficos brindados cuando fueron requeridos.

Por los consejos recibidos de los Dres Jaume Porta y Marta López.

A la Dra Ángela Bosh por su amable desinteresada ayuda.

A los integrantes del Departament de Sól i Medi Ambient como los Dres: Joserra, Silvana, y Rafa, tan amables y amigables ofreciéndome una mano en lo que precise, a los Dres Pedro, Rosa, Conchi, y a Encarna...y a todos esos buenos amigos y amigas de la Facultad, compañeros del tercer ciclo, o que pasaron por él, con quienes compartí cenas y salidas en grupo: Kiko, Silvia, Javier, Xavier, José, Carlos, Ma Alba, Corina, Efraín, Nati, Germán, Sandro, Yolanda, Sahar, Sharom, Isa, Brígida, Pati, Zahng, Omarbek, Muratbek, Aibek, Roser, Ramón, Jordi, Jonay y tantos otros que me acompañaron en este trayecto, y todos los visitantes ocasionales que transitaron y dejaron su rastro estos años por este Departamento.

A la Empresa Codorniu por permitir instalar el ensayo en sus viñedos y por la colaboración prestada por su personal: Ing. Agr. Xavier Bordes y Jordi Civit, y a los Sres Joan Esteve y Francisco Martínez.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Posicionamiento de España dentro del contexto vitivinícola mundial	1
1.2. Aspectos edáficos, sistematización de los suelos, y vitivinicultura.....	3
1.3. Irrigación de los viñedos en la zona mediterránea.....	7
1.4. Efectos de la irrigación de la vid en la producción.....	10
2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
2.1. Objetivos generales.....	13
2.2. Objetivos específicos	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1. Geología y Geomorfología	19
3.2. Suelos.....	20
3.3.1. Determinación de las características estructurales y mecánicas del suelo.....	22
3.3.1.1. Distribución del tamaño de partículas del suelo	22
3.3.1.2. Densidad aparente.....	22
3.3.1.3. Resistencia a la penetración.....	22
3.3.1.4. Porosidad total	23
3.3.1.5. Estabilidad de los agregados.....	23
3.3.2. Determinación de las propiedades hidráulicas.....	23
3.3.2.1. Infiltración	23
3.3.2.1.1. Método de inundación con el método del doble cilindro.....	23
3.3.2.1.2. Método de inundación con cilindros de 20 cm de diámetro	24
3.3.2.1.3. Infiltración a través del sello superficial.....	24
3.3.2.1.4. Infiltración bajo lluvia simulada en el campo.....	25
3.3.2.1.5. Infiltración bajo lluvia simulada en el laboratorio.....	26
3.3.2.2. Conductividad hidráulica.....	26
3.3.2.2.1. Conductividad hidráulica saturada en el campo	26
3.3.2.2.2. Conductividad hidráulica saturada con carga constante en laboratorio:.....	26
3.3.2.2.3. Conductividad hidráulica saturada del sello superficial frente al impacto de las gotas e índice de sellado	27
3.3.3. Retención de agua en el suelo.....	29
3.3.3.1. Saturación y Capacidad de campo	29
3.3.3.2. Curvas de retención de humedad.....	30
3.3.3.3. Agua retenida en mesa de tensión a 0,01 MPa	30
3.3.3.4. Agua retenida a -1,5 MPa	30
3.3.4. Escorrentía superficial y pérdida de suelo en ensayos de campo	31
3.3.5. Evolución del contenido de humedad del suelo y drenaje en campo	31
3.3.6. Régimen hídrico del suelo	33
3.3.7. Determinación de propiedades químicas del suelo.....	35
3.3.7.1. pH:	35
3.3.7.2. Conductividad eléctrica	35
3.3.7.3. Carbonato cálcico equivalente.....	35
3.3.7.4. Materia orgánica	36
3.4. Desarrollo de raíces	36

3.5. Lluvias y riegos.....	36
3.6. Producción de la vid y criterios de calidad del mosto	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1. Propiedades químicas	39
4.1.1. pH y conductividad eléctrica	39
4.1.2. Materia orgánica (MO)	40
4.2. Propiedades Físicas.....	40
4.2.1. Propiedades mecánicas	40
4.2.1.1. Distribución del tamaño de partículas	40
4.2.1.2. Densidad aparente.....	42
4.2.1.3. Resistencia a la penetración.....	44
4.3. Desarrollo de raíces	48
4.4. Retención de humedad.....	50
4.4.1. Capacidad de campo	52
4.4.2. Curvas de retención de humedad.....	52
4.4.3. Punto de marchitez permanente.....	54
4.5. Propiedades hidráulicas	59
4.5.1. Infiltración	59
4.5.2. Infiltración a través del sello superficial.....	63
4.5.3. Simulación de lluvias.....	65
4.5.4. Conductividad hidráulica saturada.....	66
4.6. Contenido de humedad del suelo:.....	68
4.6.1. Reflectometría en dominio de tiempo (TDR).....	68
4.6.2. Reflectometría en Dominio de Frecuencia (FDR).....	75
4.7. Régimen hídrico del suelo	88
4.8. Producción y características de calidad de uvas y del mosto	115
5. CONCLUSIONES	119
5.1. Conclusiones Generales.....	119
5.2. Conclusiones Específicas.....	119
5.3. Recomendaciones y sugerencias agronómicas:	120
6. BIBLIOGRAFIA	123
7. ANEXO	139

ÍNDICE DE TABLAS

	página
Tabla 1. Materia orgánica (%) por el método de Walkley & Black (modificado), Conductividad eléctrica (CE) en relación 1:1 de suelo y agua desionizada y pH en relación 1:2,5 de las diferentes profundidades evaluadas, en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.	39
Tabla 2. Clases por tamaño de partículas y material grueso (> 2 mm) en las diferentes profundidades evaluadas en posiciones de loma (vides en zonas elevadas con pendientes), de bajos (vides en zonas de fondo de valle) y planos (vides en zonas en plataformas) de Raimat.	41
Tabla 3. Densidad aparente en laboratorio determinado por el método de los cilindros de 100 cm ⁻³ y por el método de la excavación en campo, en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.	43
Tabla 4. Contenido de agua determinada en condiciones de saturación en el campo de muestras extraídas con barrena, en laboratorio en cilindros de 100 cm ⁻³ , de capacidad de campo y agua retenida a 0,01 MPa en mesa de tensión en muestras inalteradas en cilindros de 100 cm ⁻³ en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.	51
Tabla 5. Determinaciones físicas en diferentes profundidades evaluadas y en posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat. Contenido de humedad en condiciones de saturación y de capacidad de campo, porcentaje de agua retenida en punto de marchitez permanente por el método de Richards y por el método de WP4-T y agua aprovechable.	56
Tabla 6. Retención de humedad del suelo, profundidad efectiva de raíces en cada uno de los sitios de viña en la loma, en el bajo y en el plano de la localidad de Raimat (Catalunya - España).	58
Tabla 7. Infiltración del agua por el método del doble cilindro con el cilindro interno de 30 cm de diámetro en la línea, en la huella del tractor y en el centro de las entrelíneas del cultivo de la vid en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.	60
Tabla 8. Infiltración en cilindros de 20 cm de diámetro (C20), en sectores de las parcelas con y sin presencia de cobertura vegetal en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.	62
Tabla 9. Infiltración del agua por el método del doble cilindros con el cilindro interno de 30 cm de diámetro y con cilindros de 20 cm de	62

diámetro evitando la alteración del suelo y con la formación de sello superficial, en el cultivo de la vid del bajo de Raimat.

Tabla 10. Simulaciones de lluvia en suelos que estaban previamente a la determinación con cobertura vegetal o sin ella, en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat. 65

Tabla 11. Conductividad hidráulica saturada determinada en campo en cilindros de 30 cm de diámetro (C30) en los peldaños excavados en las calicatas y con el método de laboratorio de carga constante en cilindros de 5 cm de diámetro (volumen de 100 cm³) con muestras inalteradas en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat. 66

Tabla 12. Rendimiento de la vid por cepas y por hectárea, y características del mosto en grados Brix, pH y acidez total expresada como g L⁻¹ de ácido tartárico en los sitios de plano con la variedad Chardonnay y bajo riego por aspersión, en la loma y el bajo con la variedad Tempranillo, riego por goteo y una densidad de plantación de 3 por 2,2 m, de las cosechas 2007, 2008 y 2009 (n: 24). 116

ÍNDICE DE FIGURAS

	página
Fig. 1. Ubicación de la Finca de Codorniu en la localidad de Raimat (Cataluña - España) con la distribución de las diferentes variedades de vid implantadas.	15
Fig. 2. Ubicación del lote N° 31 y emplazamiento de las parcelas evaluadas en la posición de Loma (L) y del Bajo (B) en un mapa de índice de vegetación (Raimat, España).	17
Fig. 3. Ubicación del lote N° 113 y de la parcela evaluada en la posición de Plano (P) en un mapa de índice de vegetación (Raimat, España).	18
Fig. 4. Medias mensuales de las lluvias y temperaturas de la localidad de Raimat (Cataluña) de los últimos 21 años (1989-2009).	19
Fig. 5. Perfil de la loma (L) con viñas bajo riego por goteo.	20
Fig. 6. Perfil del bajo (B) con viñas bajo riego por goteo.	21
Fig. 7. Perfil del plano (P) con viñas bajo riego por aspersión.	21
Fig. 8. (a) Conductividad hidráulica del suelo medida en los peldaños de la calicatas de los sitios estudiados, donde se pueden visualizar las muestras sacadas de densidad aparente, saturación, capacidad de campo extraídas con barrena y resistencia a la penetración realizadas simultáneamente; (b) Calibración de los FDR; (c) Simulación de lluvia; (d) Plano con Chardonnay (e) Bajo con Tempranillo; (f) Loma con Tempranillo.	28
Fig. 9. Diagrama de flujo del modelo hidrológico SOMORE (balance diario de agua en el suelo) para predecir el régimen de humedad y los procesos potenciales de degradación del suelo (Pla, 1997).	34
Fig. 10. Vista del paisaje luego de modificaciones efectuadas por movimientos de suelo con maquinaria pesada.	42
Fig. 11. Variación de la resistencia a la penetración (MPa) y de la humedad del suelo expresada en fracción volumétrica ($\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) con la profundidad del sitio de la loma (L), del bajo (B), y del plano (P) de Raimat, de la campaña 2006-2007.	46

Fig. 12. Relación entre la resistencia a la penetración y el contenido de agua del suelo, en fracción volumétrica, de las determinaciones realizadas en la Loma, el Bajo y el Plano de Raimat.	47
Fig. 13. Número de raíces y Porcentaje de raíces de vid hasta un metro de profundidad en las posiciones de loma (vides en zonas elevadas con pendientes), de bajos (vides en zonas de fondo de valle) y en planos (vides en zonas en plataformas) de Raimat.	49
Figura 14. Curvas de retención de hídrica de la fracción fina del suelo (<2 mm) de los viñedos en las posiciones de Loma, Bajo y Plano de cada espesor de suelo muestreado en cada calicata de Raimat (Catalunya - España).	53
Fig. 15. Estructura laminar en la situación B, donde además se observaron eflorescencias salinas.	59
Fig. 16: Relación entre las lecturas el TDR expresadas volumétricamente y el contenido de humedad volumétrica del suelo (cm^3 de agua 100 cm^{-3} de suelo), obtenida de valores de humedad gravimétrica de las muestras barrenadas y de la densidad aparente medida con el método de excavación en el Bajo (B) de Raimat.	69
Fig. 17: Relación entre las lecturas el TDR expresadas volumétricamente y el contenido de humedad volumétrica del suelo (cm^3 de agua 100 cm^{-3} de suelo), obtenida de valores de humedad gravimétrica de las muestras barrenadas y de la densidad aparente medida con el método de excavación en el plano (P) de Raimat.	70
Fig. 18: Relación entre las lecturas el TDR expresadas volumétricamente y el contenido de humedad volumétrica del suelo (cm^3 de agua 100 cm^{-3} de suelo), obtenida de valores de humedad gravimétrica de las muestras barrenadas y de la densidad aparente medida con el método de excavación en la loma (L) de Raimat.	71
Fig. 19. Evolución del contenido de humedad volumétrica del suelo medidos con el TDR a partir del 1/03/2007, momento en el cual se instalaron los tubos en el suelo y se éste se estabilizó para realizar las lecturas, hasta la fecha de finalización de la campaña agrícola de las viñas el 30/09/2007 en la loma, del bajo y del plano en Raimat.	73
Fig. 20. Evolución del contenido de humedad volumétrica del suelo con las lecturas del TDR desde el 2/10/2007 al 30/10/2008 de las viñas de la loma, del bajo y del plano en Raimat.	74
Fig. 21. Ecuación de regresión obtenida con las lecturas del FDR	76

(milivoltios) y los contenidos de humedad volumétrica del suelo, obtenidas de datos de humedad gravimétricos y de densidad aparente por el método de excavación en las viñas del bajo en Raimat.

Fig. 22. Resultados obtenidos con el FDR sin calibrar en el bajo de Raimat, y luego de su calibración en campaña. 77

Fig. 23. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 80 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas en la Loma de Raimat de la campaña agrícola 2006/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades durante el período de 31/03/2007 al 28/09/2007. 80

Fig. 24. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 70 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Bajo de Raimat de la campaña agrícola 2006/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y los momentos que se detectaron pérdidas de agua por drenaje interno durante el período de 30/03/2007 al 30/09/2007. 81

Fig. 25. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 90 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Plano de Raimat de la campaña agrícola 2006/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y el momento en que se detectó pérdida de agua por drenaje interno dentro del período de 31/03/2007 al 27/09/2007. 82

Fig. 26. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 80 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas en la Loma de Raimat de la campaña agrícola 2007/2008. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades durante el período de 1/10/2007 al 30/09/2008. 83

Fig. 27. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad 84

ponderada de 0 a 70 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Bajo de Raimat de la campaña agrícola 2007/2008. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y los eventos con pérdidas de agua por drenaje interno durante el período de 1/10/2007 al 30/09/2008.

Fig. 28. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 90 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Plano de Raimat de la campaña agrícola 2007/2008. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y el momento en que se detectó pérdida de agua por drenaje interno. Período de 1/10/2007 al 30/09/2008.

85

Fig. 29. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 80 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas de la Loma de Raimat de la campaña agrícola 2008/2009. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades durante el período de 1/10/2008 al 28/09/2009.

86

Fig. 30. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 70 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Bajo de Raimat de la campaña agrícola 20086/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y los cuatro momentos con pérdidas de agua por eventos de drenaje interno durante el período de 1/10/2008 al 26/09/2009.

87

Fig. 31. Régimen hídrico del suelo basado en mediciones horarias con sensores FDR (HS medida: humedad del suelo medida) en la loma (L) de Raimat bajo riego por goteo, y humedad del suelo simulada (HS simulada) determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal y con una profundidad radical efectiva de 80 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 7 mm; Drenaje simulado: 36 mm.

94

Fig. 32. Régimen hídrico del suelo basado en mediciones horarias con sensores FDR (HS medida: humedad del suelo medida) en el bajo (B) de

95

Raimat con riego por goteo, y humedad del suelo simulada (HS simulada) realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio con cobertura vegetal y con una profundidad radical efectiva de 70 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 46 mm; Drenaje simulado: 0 mm.

Fig. 33. Régimen hídrico del suelo basado en mediciones horarias con sensores FDR (HS medida: humedad del suelo medida) en el plano (P) de Raimat con riego por aspersión, y humedad del suelo simulada (HS simulada) determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal y con una profundidad radical efectiva de 90 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 0 mm; Drenaje simulado: 4,3 mm. 96

Fig. 34. Régimen hídrico del suelo en la loma (L) de Raimat. Humedad del suelo simulada (HS simulada) determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio y en las siguientes condiciones: con sello superficial, y con una profundidad radical efectiva de 80 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 140 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 97

Fig. 35. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm en el año más húmedo (656 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 155 mm; Drenaje simulado: 127 mm. 98

Fig. 36. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio y bajo las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm, en el año más húmedo (656 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 428 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 99

Fig. 37. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm en el año más seco (156 mm) en un período de retorno de 21 años. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa). Escorrentía simulada: 8 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 100

Fig. 38. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos 101

en el sitio, en las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm en el año más seco (156 mm) en un período de retorno de 21 años. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa). Escorrentía simulada: 67 mm; Drenaje simulado: 0 mm.

Fig. 39. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: sin cobertura vegetal, con riego por goteo y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año 2007/2008. Escorrentía simulada: 181 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 104

Fig. 40. Régimen hídrico del suelo del Bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más húmedo (656 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 272 mm; Drenaje simulado: 59 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa). 105

Fig. 41. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más húmedo (Período de retorno 21 años). Escorrentía simulada: 495 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 106

Fig. 42. Régimen de hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más seco (156 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 23 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 107

Fig. 43. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más seco en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 84 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 108

Fig. 44. Régimen hídrico del suelo del plano (P) de Raimat, con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con sello superficial, riego por 110

aspersión y con una profundidad radical efectiva de 90 cm durante la campaña agrícola 2007/2008 con precipitaciones cercanas al promedio (306 mm). Anegamiento simulado: 114 mm; Drenaje simulado: 0 mm.

Fig. 45. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 90 cm del año más húmedo (656 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 0 mm; Drenaje simulado: 144 mm. 111

Fig. 46. Régimen hídrico del suelo del Plano (P) de Raimat con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo y con una profundidad radical efectiva de 90 cm del año más húmedo, en un período de retorno 21 años. Anegamiento simulado: 406 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 112

Fig. 47. Régimen hídrico del suelo del plano (P) de Raimat, con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 90 cm en el año más seco (156 mm) de un período de retorno 21 años. Anegamiento simulado: 0 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 113

Fig. 48. Régimen hídrico del suelo del plano (P) de Raimat, con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo y con una profundidad radical efectiva de 90 cm en el año más seco con un período de retorno 21 años. Anegamiento simulado: 56 mm; Drenaje simulado: 0 mm. 114

ABREVIATURAS:

B	Bajo
C20	Cilindros de 20 cm de diámetro
C20 cs	Cilindros de 20 cm de diámetro con sello
C30	Cilindros de 30 cm de diámetro
CaCO ₃	Carbonato de calcio
CC	Capacidad de campo
CE	Conductividad eléctrica
D.O.	Denominación de Origen
DA	Densidad aparente
EA	Estabilidad de los agregados
ESC	Escorrentía superficial
FDR	Reflectometría en Dominio de Frecuencia
HS medida	Humedad del suelo medida en el campo
HS simulada	Humedad del suelo simulada con el modelo SOMORE
K	Conductividad hidráulica saturada
Kc	Conductividad hidráulica con protección al impacto de las gotas de agua
Ks	Conductividad hidráulica sin protección al impacto de gotas de agua
L	Loma
MO	Materia orgánica
P	Plano
PMP	Punto de marchitez
RP	Resistencia a la penetración
SAT	Saturación
TDR	Reflectometría en dominio de tiempo
UE	Unidad Europea

RESÚMEN: Los objetivos del estudio fueron: a) Predecir el régimen hídrico del suelo en diferentes posiciones geomorfológicas, suelos, sistemas de riego y cobertura. b) Determinar el efecto de las propiedades físicas sobre el régimen hídrico del suelo, los procesos de degradación y la producción de vid bajo riego. c) Establecer la influencia de las características del suelo y de la presencia de la cobertura vegetal sobre la infiltración y la retención de agua del suelo. d) Predecir la generación de escorrentía superficial, los procesos de erosión y la disponibilidad de agua para la vid mediante modelos de simulación que integren parámetros hidrológicos, climáticos y de manejo del suelo.

El área de estudio se localiza en Raimat (Lleida, España) tiene un clima mediterráneo semiárido. Se seleccionaron tres sitios experimentales laderas con pendientes del 15%, llamadas lomas (L); bajos en fondos de valle (B) con 1-2% de pendiente y planos (P) en plataformas con pendientes menores al 1%. Los dos primeros (L y B) plantados con vid (*Vitis vinifera*, L.) variedad Tempranillo con riego por goteo y el tercero (P) con viñas Chardonnay bajo riego por aspersión. Los suelos fueron clasificados como: Xerorthent en L y B, y Calcixerept en P. Todos los suelos tenían elevados contenidos de limo (más de 48%), bajos contenidos de materia orgánica (menor de 1,7%) y bajo porcentaje de agregados estables en agua. Las velocidades de infiltración fueron baja en B (4 mm h^{-1}), elevada en P (36 mm h^{-1}) e intermedia en L (8 mm h^{-1}). Se llevó un registro de las precipitaciones, de los riegos y de los contenidos de humedad del suelo (con FDR y TDR) y se determinó la profundidad efectiva de las raíces en cada sitio. Los datos fueron analizados e integrados en el modelo hidrológico SOMORE y validados, encontrándose un buen ajuste de los valores simulados con los observados en los tres sitios experimentales. Con el modelo se simuló el régimen de humedad de los suelos y el riesgo de degradación del suelo por erosión, lo que permitiría establecer estrategias de manejo en diferentes escenarios climáticos mejorando la eficiencia en el uso del agua y la sustentabilidad del sistema.

Los valores de escorrentía superficial obtenidos al simular con el modelo (utilizando datos medidos de campo) resaltan la importancia que tiene la cobertura vegetal en suelos con viña bajo riego y en pendiente como alternativa de protección del suelo para disminuir la escorrentía y la erosión. Con ello, se incrementaría la recarga de agua del suelo, mejorando las posibilidades y estrategias de riego que garanticen agua disponible en los estados de: “brotación”, “floración” y “cuajado”. En suelos sin cobertura y con pendiente aumentaría la escorrentía superficial y la erosión, lo que provocaría anegamiento temporal en las zonas bajas sin pendiente.

En base a las simulaciones realizadas con el modelo, en años muy lluviosos, habría mayor escorrentía superficial que el promedio de las precipitaciones de la zona y la humedad resultante del suelo sería menor que con cobertura, generando incluso deficiencias hídricas para el cultivo. En viñedos con cobertura vegetal, habría mayor contenido de humedad final del suelo a pesar de haber más consumo de agua, por presentar mayor infiltración que los suelos con sello superficial. En años con una distribución irregular de las precipitaciones, con prácticas de manejo conservacionistas del suelo, cobertura vegetal y un seguimiento de los contenidos de humedad en profundidad, se podría llegar a producir vides con menores dosis de riego que las actualmente aplicadas.

Se presentó una buena correspondencia entre los valores medidos y simulados con el modelo SOMORE, posibilitando pronosticar posibles problemas de degradación de suelo y de manejo de la viña que podrían afectar a la producción especialmente en años muy húmedos o muy secos, demostrándose la utilidad del modelo si se cuenta con datos apropiados de las propiedades mecánicas e hidrológicas del suelo, integrando estos atributos medidos en campo y laboratorio. Este modelo permitiría evaluar además las posibles consecuencias de diferentes prácticas de manejo de suelos, bajo diferentes condiciones meteorológicas y precisar los requerimientos de agua de riego en diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

ABSTRACT: The objectives of the study were: a) To predict the soil moisture regime in different geomorphology positions, soils, irrigation systems, and covering. b) To determine the effect of the physical properties on the soil moisture regime, the degradation processes and the vineyard productions under watering. c) To establish the influence of soil characteristics and the presence of vegetation cover on infiltration and soil water retention. d) To predict the generation of surface runoff, erosion processes and the availability of water for the vineyards through simulation models that integrate hydrological parameters, climate and soil management.

The study area is located in Raimat (Lleida, Spain) has a semiarid Mediterranean climate. We selected three sites with steep slopes of 15%, called hillocks (L), low valley bottoms (B) with 1-2% slope and flat (P) on platforms with slopes of less than 1%. The first two (L and B) planted with vines (*Vitis vinifera* L.) variety Tempranillo with drip irrigation and the third (P) with Chardonnay vineyards under sprinkler irrigation. The soils were classified as: Xerorthent in L and B. In P was a Calcixercept All soils had high silt content (over 48%), low organic matter content (less than 1.7%) and low percentage of water stable aggregates. The infiltration rates were lower in B (4 mm h⁻¹), high in P (36 mm h⁻¹) and intermediate in L (8 mm h⁻¹).

He kept a record of rainfall, irrigation, the soil water content (with FDR and TDR) determining the effective depth of roots. The data were analyzed integrated into the hydrological model SOMORE and validated, finding a good fit of the simulated values with those observed in the three chosen sites. With the model system was simulated soil moisture and the risk of soil degradation through erosion thus establishing management strategies in different climate scenarios to improve efficiency in water use and sustainability of the system.

Runoff values obtained by simulating the model (using measured data from field) stress the importance of vegetation coverage in soils under irrigation and soil protection alternative to reduce runoff and erosion. This will increase the recharge of soil water, improving the prospects and strategies for irrigation that ensure water is available for the following states: "budburst", "flowering", "berry set" and "veraison". In soils without coverage and increase slope surface runoff and erosion, it could cause temporary flooding in lowland areas with no slope.

Based on the simulations with the model, in years with high rain, runoff would be higher than average rainfall in the area and resulting soil moisture would be less than with surface cover, generating even water deficiency for the crop. In vineyards with cover, that have higher moisture content of soil despite having more consumption of water, at greater soil infiltration than in surface seal. In years with irregular distribution of rainfall, with management practices of soil conservation, vegetation cover and monitoring the moisture content in depth, may eventually yield grapes with lower irrigation doses of the currently implemented.

There was a good agreement between simulated and measured values with SOMORE model, allowing to predict potential soil degradation problems and management of the vineyard that could affect production especially in very wet or very dry years, showing the usefulness of the model whether data are appropriate mechanical and hydrological properties of soil, integrating these attributes measured in the field and laboratory. This model would also assess the possible consequences of different land management practices under different weather conditions and determine the irrigation water requirements at different stages of crop development.

RESUM: Els objectius de l'estudi van ser: a) Predir el règim hídric del sòl en diferents posicions geomorfològiques, sòls, sistemes de reg i coberta vegetal. b) Determinar l'efecte de les propietats físiques sobre el règim hídric del sòl, els processos de degradació i la producció de vinya sota reg. c) Establir la influència de les característiques del sòl i de la presència de la coberta vegetal sobre la infiltració i la retenció d'aigua del sòl. d) Predir la generació d'escorrentia superficial, els processos d'erosió i la disponibilitat d'aigua per a la vinya mitjançant models de simulació que integren paràmetres hidrològics, climàtics, de maneig del sòl i de presència de coberta.

L'àrea d'estudi es localitza a Raimat (Lleida, Espanya) té un clima mediterrani semiàrid. Es van seleccionar tres llocs experimentals vessants amb pendents del 15%, anomenades turons (L); baixos en fons de vall (B) amb 1-2% de pendent i plànols (P) en plataformes amb pendents menors al 1%. Els dos primers (L i B) plantats amb vinya (*Vitis vinifera*, L.) varietat Tempranillo amb reg per degoteig i el tercer (P) amb vinyes Chardonnay sota reg per aspersió. Els sòls van ser classificats com: Xerorthent a L i B, i Calcixerept a P. Tots els sòls tenien elevats continguts de llim (més de 48%), baixos continguts de matèria orgànica (menor de 1,7%) i baix percentatge d'agregats estables en aigua. Les velocitats d'infiltració van ser baixa a B (4 mm h^{-1}), elevada a P (36 mm h^{-1}) i intermèdia en L (8 mm h^{-1}).

Es va dur un registre de les precipitacions, dels regs i dels continguts d'humitat del sòl (amb FDR i TDR) i es va determinar la profunditat efectiva de les arrels a cada lloc. Les dades van ser analitzades i integrats en el model hidrològic SOMORE i validades, trobant un bon ajust dels valors simulats amb els observats en els tres llocs experimentals. Amb el model es va simular el règim d'humitat dels sòls i el risc de degradació del sòl per erosió, que permetrà per tal d'establir diferents estratègies de maneig en diferents escenaris climàtics millorant l'eficiència en l'ús de l'aigua i la sostenibilitat del sistema.

Els valors d'escorrentia superficial obtinguts al simular amb el model (utilitzant dades mesurades de camp) ressalten la importància que té la coberta vegetal en sòls amb vinya sota reg i en pendent com a alternativa de protecció del sòl per disminuir l'escorrentia i l'erosió. Amb això, s'incrementaria la recàrrega d'aigua del sòl, millorant les possibilitats i estratègies de reg que garanteixin aigua disponible en els estats de: "brotació", "floració", "quallat" i "verolat". En sòls sense coberta i amb pendent augmentaria l'escorrentia superficial i l'erosió, el que provocaria inundació temporal en les zones deprimides sense pendent.

En base a les simulacions realitzades amb el model, en anys molt plujosos, hi hauria una major escorrentia superficial que fins i tot superaria la mitjana de les precipitacions de la zona i la humitat resultant del sòl seria menor que amb coberta, generant fins i tot deficiències hídriques al cultiu. En vinyes amb coberta vegetal, hi hauria major contingut d'humitat final del sòl tot i haver-hi més consum d'aigua, per presentar major infiltració que els sòls amb segell superficial. En anys amb una distribució irregular de les precipitacions, amb pràctiques de maneig conservacionistes del sòl, coberta vegetal i un seguiment dels continguts d'humitat en profunditat, es podria arribar a produir raïm amb menors dosi d'aigua que les actualment aplicades.

Es va presentar una bona correspondència entre els valors mesurats i simulats amb el model SOMORE, aquest fet possibilita pronosticar possibles problemes de degradació del sòl i de maneig de la vinya que podrien afectar la producció especialment en anys molt humits o molt secs, demostrant la utilitat del model si es compta amb dades apropiats de les propietats mecàniques i hidrològiques del sòl, integrant aquests atributs mesurats en camp i laboratori. Aquest model va permetria a més avaluar les possibles conseqüències de diferents pràctiques de maneig de sòls, sota diferents condicions meteorològiques i precisar els requeriments d'aigua de reg en diferents etapes de desenvolupament del cultiu.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Posicionamiento de España dentro del contexto vitivinícola mundial

La vid, uno de los principales cultivos de España, ocupa el 4% de la superficie labrada, con un 5% del valor total de la producción agrícola nacional y 1.129.951 hectáreas de viñedos encontrándose en el tercer lugar en producción mundial de vinos, después de Italia y Francia.

Su gran variedad de suelos y climas, facilitó su cultivo desde el 600 a. de C., permitiendo elaborar actualmente caldos de gran prestigio: Priorato y Penedés de Catalunya; Rioja y Cariñena del Ebro; Cigales y Vino de Toro del Duero; Ribeiro y Rosado de Galicia; Txacolí del País Vasco; Rueda de Castilla y León; Salvatierra y Tierra de Barros de Extremadura; Jerez y Manzanilla de Sanlúcar; Yecla y Jumilla de Murcia; Cebreros y Mérida de Toledo; Valdepeñas, Mancha y Manchuela en Ciudad Real, Toledo y Cuenca; Requena-Utiel y Cheste en Valencia; Montilla y Moriles en Córdoba; Felanitx y Binissalem en Mallorca; Taronte e Icod en Tenerife, etc.

La producción de vinos en España cuenta con gran prestigio internacional y se encuentra distribuida en varias regiones con marcadas diferencias climáticas y de suelos. Ello determinó su especificidad y riqueza en la elaboración de vinos originales con diferentes Denominaciones de Origen (D.O.), respaldadas por su larga tradición y una marcada personalidad. El esmerado cultivo de las viñas les ha permitido alcanzar una justa fama universal y la necesidad de reglamentar la producción en todas sus fases, a efectos de garantizar su calidad.

Para que un vino pueda ser amparado por una Denominación de Origen, es necesario que haya sido producido y elaborado en la zona de esa Denominación. Los Reglamentos establecen los tipos de cepas que puedan cultivarse, las formas más adecuadas de poda de las viñas, los límites de producción de cada variedad, en definitiva, reglamentar el cultivo, elaboración y crianza de los vinos, permitiendo que al llegar éste al consumidor puedan ofrecer las garantías exigidas. Cuando España ingresó en la Unión Europea (UE) los vinos españoles considerados por la normativa comunitaria como “vinos de calidad producidos en Región determinada” (v.c.p.r.d.) y los “vinos espumosos de calidad producidos en Región determinada” (v.e.c.p.r.d.) fueron protegidos y comercializados por las Denominaciones de Origen (Salazar & Melgarejo, 2005).

En el 2008 la producción de la Unión Europea fue de 185 10⁶ hl de de vino anuales, de los cuales correspondieron a Francia 53 10⁶ hl, Italia 50 10⁶ hl y España 4510⁶ hl, siendo éstos además los tres primeros productores del mundo.

En exportaciones de vino, en cambio España superó a Francia, alcanzando el segundo lugar mundial después de Italia. En cambio el consumo mundial de vino disminuyó a $2 \cdot 10^{-6}$ de hectolitros, sobre todo en Europa, a causa de la crisis económica. La producción mundial, sin embargo, registró una ligera alza de $1 \cdot 10^{-6}$ de hectolitros, según datos provisionales de la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV) presentados en abril de 2009 en París. El mismo año, España exportó 16,5 millones de hectolitros (19% de los intercambios internacionales), con la misma cuota que Italia que, sin embargo, sigue siendo el líder mundial pues la superó ligeramente (17,2 millones), ocupando Francia el tercer lugar en volumen, con 13,6 millones y un 15% de cuota, manteniendo ésta el liderazgo mundial en valor de ventas al extranjero (<http://www.elperiodico.com>. Fecha de ingreso: 7/07/09).

En el período 1981-1985 la producción mundial de vino se incrementó firmemente, pero su consumo no presentó el mismo comportamiento, por ello muchos países empezaron a tener sobrantes, que generaron problemas en el mercado internacional. Según Jackson & Lombard, (1993) aumentó la cantidad pero no la calidad de dichos excedentes, como los caracteres visuales, el sabor o el aroma y para el período 1986-1990 la producción de vinos disminuyó, debido principalmente a medidas económicas de arranque de la Unión Europea (Hidalgo, 1999).

En las dos últimas décadas la Comunidad Europea (CE) promovió el cultivo de la vid en España con aportes económicos, aunque actualmente la Organización Común de Mercado (OCM) del vino contempla la posibilidad de abandonar en toda la UE hasta 175.000 hectáreas en las próximas tres campañas, con ayudas decrecientes y en función de los rendimientos medios fijados para cada zona. Aproximadamente un tercio de ellas (60.000 ha), se concentran en España (<http://www.elpais.com>. Fecha de ingreso: 7/07/09).

La superficie cultivable de viñedos se orienta a la baja debido a la política de arranque de viñas en la UE. En todo el mundo, la superficie de viñedos disminuyó unas 28.000 ha (-0,35%) quedando un total de 7,8 millones y el mayor descenso se produjo en la UE, que en el 2008 contaba con 3,8 millones de ha (33.000 menos que en el 2007). En España, las hectáreas de viñedo sumaron este mismo año 1,12 millones (-0,34%). Pero aún sigue siendo el país con mayor superficie de la UE, por delante de Francia que posee 852.000 ha e Italia con 840.000 ha. La superficie de viñedos españoles en 2008 alcanzó 1.129.951 ha con una ligera caída del 0,7% en comparación con el 2007, según la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE) efectuada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural (MARM) y analizada por el Observatorio Español del Mercado del Vino (OEMV). Este último, informó que la Comunidad Autónoma con mayor superficie de viñedos, fue Castilla-La Mancha, con 580.080 hectáreas, (-0,31% respecto al año anterior), alcanzando el 51% de la superficie total. Le siguieron Extremadura, con 88.178 hectáreas (-1,72%), Comunidad

Valenciana, con 75.903 hectáreas (-2,45%), y Castilla y León, con 68.313 hectáreas (-5,30%). En cambio se incrementaron en Cataluña con 61.117 ha (+0,58%) y La Rioja con 49.672 (+2%).

1.2 Aspectos edáficos, sistematización de los suelos, y vitivinicultura

Actualmente entre las amenazas principales que afectan a los suelos europeos figuran la erosión, la pérdida de materia orgánica, la contaminación, la salinización, la compactación, la pérdida de biodiversidad del suelo, el sellado, los deslizamientos de tierras y las inundaciones (Perfil ambiental de España, 2007).

La explotación agrícola ha afectado los recursos hídricos del mundo lo cual llevará a una severa escasez de agua para el 2025, agravada por el consumo generado por más de 30 países altamente poblados (India, Nigeria, Irán, Egipto, Túnez y China entre otros) amenazando la seguridad alimentaria por falta de recursos hídricos adecuados. Además, la agricultura que es un gran consumidor de agua, tiene una competencia creciente en el uso urbano e industrial. El problema de escasez del agua es exacerbado por la contaminación y la eutrofización, tanto industrial como agrícola, y por los cambios en la alimentación de algunos países, que pasaron de basarse en una dieta vegetariana a una animal (se estima, que los requerimientos de agua por kilogramo de una dieta en base a productos animales son tres o cuatro veces más que la de una dieta vegetariana). Otro aspecto negativo es el previsto cambio climático que impactará negativamente en la disponibilidad de agua, debido a la fuerte relación de éste con la degradación del suelo y los recursos hídricos, haciendo evidente la necesidad de manejar los recursos edáficos para incrementar la eficiencia en el uso del agua, evitar la contaminación, incrementar la recarga de los acuíferos, mejorar la producción en cuencas protegidas y la calidad del agua (Lal, 2007).

El aumento del uso de tecnologías como el riego y la fertilización, resaltan la importancia de conocer sus consecuencias sobre el comportamiento de los suelos para no afectar el medio ambiente, ya sea por que podrían alterar las propiedades físicas del suelo, el régimen hidrológico, producir erosión, eutrofización de aguas, o salinización entre otros efectos.

Las respuestas de la vid a la temperatura, al riego y a la fertilización, dependen del estado fenológico. Un mismo factor puede resultar perjudicial para el cultivo en ciertos períodos y favorable o indiferente en otros. Así tenemos períodos críticos en los cuales un factor a una determinada intensidad, como puede ser la falta de agua, o temperaturas elevadas tienen un efecto relevante sobre el resultado final en el desarrollo y rendimiento del cultivo, resultando una condicionante para alcanzar las máximas producciones.

La vid es una planta de clima mediterráneo y la temperatura óptima para el desarrollo del fruto varía entre 20 y 30° C (Elías & Castellví, 1996). Entre 6 y

10°C se detiene el crecimiento y a temperaturas de 35 a 40°C o más, la planta sufre daños. Durante el período vegetativo, las temperaturas inferiores a 0°C son fatales para los brotes y hojas nuevas. Sin embargo en el período de reposo la vid resiste temperaturas del orden de -12°C, existiendo variedades que pueden resistir temperaturas de -15 a -20°C. El período vegetativo se completa cuando la suma de temperaturas es de unos 2.500 a 3.500°C dependiendo de sus variedades. En cuanto a requerimientos de precipitaciones, estos mismos autores, consideran que serían necesarias de 600 a 800 mm anuales (sin embargo hay regiones donde se la cultiva con valores inferiores a 600 mm). En contraposición, precipitaciones excesivas durante la floración, podrían ocasionar caída de flores y disminución de la producción. Asimismo, la disponibilidad de buena radiación aumenta el contenido de azúcar y reduce la acidez.

En contraposición a la política actual de disminución de superficies del cultivo de vid que se plantea la Organización Común de Mercado (OCM) del vino, años atrás, entre finales del año 1999 y el 2000 se evidenció un resurgimiento e intensificación de la vid como cultivo de alto rendimiento económico en España. Ante los cambios globales a nivel económico, la producción agropecuaria se adaptó a dichas situaciones para compensar los elevados costos de mano de obra, y los requerimientos tecnológicos que plantearon los diferentes sistemas de manejo del cultivo de la vid. Ello llevó, entre otros cambios, a una mecanización como paliativo a la falta de mano de obra para disminuir los costos de producción.

La tendencia actual se dirige a una mecanización de todas las prácticas agrícolas facilitando las labores culturales y la cosecha. Para esto fue necesario un mayor distanciamiento entre las líneas de la vid de 2,4 a 3,2 m y entre plantas de 1,2 a 1,4 m. Esta sistematización del cultivo proporciona menor protección superficial del suelo que en las plantaciones tradicionales, aunque de todas formas, la protección es baja en ambos casos en el período otoño – invierno, cuando se producen las mayores precipitaciones (Pla *et al.*, 2004).

La mecanización de la viña lleva, muchas veces, a realizar largas líneas de plantación, en ocasiones a favor de la pendiente. Ello implica además, cambiar la topografía y las pendientes con grandes movimientos de suelo, nivelación y realización de terrazas para facilitar la mecanización, afectando a las propiedades hidrológicas de los suelos, y al drenaje natural, favoreciendo la erosión superficial y movimientos en masa, especialmente cuando ocurren eventos extremos de lluvias (Pla & Nacci, 2001; Nacci *et al.*, 2002).

La expansión del cultivo de la vid en algunas zonas de Cataluña ha sido estimulada y favorecida por políticas de la Unión Europea que subvencionaron parte de los gastos de sistematización del terreno por nivelación, para instalación de terrazas y eliminación de piedras a fin de poder mecanizar completamente la producción.

En el caso del Penedés (España) estas alteraciones por nivelación y movimiento de suelo, ocasionaron cambios graves en ellos, especialmente en la profundidad efectiva de enraizamiento (Nacci *et al.*, 2002; Pla & Nacci, 2003) y en la capacidad de infiltración de agua de lluvia en el suelo, aumentando la escorrentía, la erosión y las deficiencias de agua para la viña en etapas críticas, lo cual afecta tanto a la cantidad como a la calidad de la producción (Pla, 2007).

En las terrazas con suelos pedregosos del Priorat (España) se hallaron mayores profundidades efectivas de enraizamiento de la vid, y capacidad de retención de agua disponible. En años húmedos, especialmente con lluvias continuas y concentradas en los períodos de descanso (durante el otoño e invierno) habrían condiciones potenciales de humedad cercanas a saturación en el perfil por períodos prolongados, que favorecerían deslizamientos en los terraplenes de terrazas no protegidas por cubiertas vegetales, que podrían ayudar a consumir el exceso de agua en tal período (Pla, *et al.*, 2005).

En el Penedés, estudios hechos en pequeñas terrazas de absorción (Pla *et al.*, 2005), mostraron que éstas pueden favorecer los movimientos en masa cuando la humedad del suelo supera el límite líquido, coincidiendo simultáneamente con alta escorrentía, principalmente durante el período de descanso de la vid coincidente con la época de lluvias.

Los procesos hidrológicos que conducen a erosión superficial o movimientos en masa son diferentes entre sí, por ello las prácticas de conservación de suelos apropiadas para controlar procesos de erosión superficial, como terrazas en bancales, pueden incrementar el peligro de movimiento en masa bajo condiciones específicas de combinaciones de suelo, clima y pendiente (Pla, 2002).

Las nuevas prácticas de cultivo y manejo del suelo con mecanización, en viñas de secano de las regiones del Alt Penedés y del Priorat (España), generaron cambios grandes en el régimen de humedad de los suelos. Sus mayores efectos se expresaron en la escorrentía, la erosión superficial, los movimientos en masa y la retención del agua de lluvia por el suelo para el consumo de la vid. Los análisis de evaluaciones *in situ*, adecuadas a las características climáticas, a los procesos y las propiedades hidrológicas del suelo, complementadas con el uso de modelos de simulación de balance de agua simples, basados en dichos procesos, pueden ser muy útiles e indispensables para un adecuado planeamiento del uso de la tierra más sustentable para producción de vid u otro uso alternativo (Pla, *et al.*, 2005).

Los problemas de degradación de suelos y aguas, y sus consecuencias derivadas están aumentando en todo el mundo, debido en parte a la falta de una identificación, y evaluación apropiadas de los procesos de degradación, y a las relaciones causa - efecto de la degradación de suelos para cada situación específica y al uso generalizado de aproximaciones empíricas para seleccionar y

aplicar prácticas de conservación de suelos y aguas, lo que en ocasiones, sumado a la mala selección o aplicación de prácticas y estructuras pueden aumentar los procesos de degradación e impactos ambientales derivados (Pla, 2002).

Los modelos de simulación precisan datos de clima, propiedades físicas e hidrológicas de los suelos. A pesar de que existen metodologías y equipos comerciales cada vez más sofisticados y precisos para medir las diferentes propiedades físicas e hidrológicas relacionadas con los procesos de degradación, la mayoría de ellos son solo aplicables bajo condiciones de laboratorio, en suelos y condiciones muy particulares, por lo que, son preferibles métodos de campo simples y directos, adaptables a diferentes tipos de suelos, climas y tamaños de muestras, que a datos obtenidos en reconocimientos de suelos y funciones de pedotransferencia (Pla, 2005).

Los registros de suelos confiables, obtenidos en campo, son fundamentales como datos de entrada para ser empleados, por ejemplo, en modelos de simulación, sin embargo varios factores intervienen en la disparidad de resultados analíticos, Tisdall (1951) encontró diferencias significativas entre la densidad aparente determinada con cilindros y el método de excavación, según sea la heterogeneidad del suelo, el grado de pedregosidad, y el tamaño de la fracción gruesa.

La determinación de propiedades físicas e hidrológicas de suelos pedregosos, realizadas en el laboratorio, que solo tienen en cuenta para su análisis la fracción fina, no se ajustan a las condiciones reales determinadas en campo (Fonseca, 2006).

Determinaciones físicas como infiltración de agua, conductividad hidráulica, distribución del tamaño de partículas, distribución del tamaño de poros, y la resistencia a la penetración, pueden ser muy importantes para diagnosticar y lograr buenos resultados de un proyecto, por lo que deberían incluirse entre los análisis a ser considerados (Klesta & Bartz, 1996).

Youngs (1987) midiendo infiltración con cilindros de radios de 0,46, 0,30, 0,15, 0,09, 0,05, 0,02 y 0,01 m, obtuvo buenos resultados cuando el tamaño de los cilindros fue superior a 0,15 m. Chowdary et al. (2006) buscando mayor precisión y practicidad, evaluaron la entrada de agua en el suelo con cilindros de diferentes diámetros, y estudiaron los componentes verticales y laterales de infiltración, estimados en base a la humedad almacenada en el suelo durante dicho proceso, obteniendo una variación del componente lateral de 32 al 68% para el caso de los cilindros simples y del 12% para los cilindros dobles. Esto demostró posibles fuentes de error que deberían ser tenidas en cuenta al momento de realizar las determinaciones y que sería importante tener en consideración al emplear una determinada metodología.

Otro factor para evaluar propiedades edáficas es su compleja variabilidad intrínseca, clasificada en dinámica y estática (Universidad de California, 1985). Las dinámicas están asociadas al transporte de agua, tal como la conductividad hidráulica, o la infiltración y tienen metodologías que dependen de modelos para definir el proceso de transporte. Los estadísticos usados para definir la variabilidad, como el desvío estándar o el coeficiente de variación de las variables dinámicas, normalmente son mayores que en las variables estáticas como la densidad aparente, que depende de la matriz rígida del suelo y presenta normalmente menor variabilidad.

La resistencia a la penetración constituyó la mejor medida del impedimento que presentó el suelo para las raíces que crecían donde las condiciones estructurales no eran adecuadas para su avance, como consecuencia de la degradación de la estructura del suelo. Al aumentar las áreas de contacto entre partículas individuales, se genera mayor cohesión produciendo el ordenamiento de partículas arcillosas y la disminución del espacio poroso afectando al crecimiento de raíces y la exploración del suelo (Bengough & Mullins, 1990).

Con datos fiables los modelos de simulación basados en procesos hidrológicos, pueden ser muy útiles para integrar y convertir parámetros medidos de suelo en el campo, con datos de clima, cultivo y manejo, para determinar predicciones de balances de agua, y regímenes de humedad del suelo, en diferentes combinaciones logrando una producción más sustentable de vinos de alta calidad (Pla et al., 2007).

Dicha información aportaría datos y conocimientos básicos para evaluar los procesos físicos que rigen el movimiento y retención de agua en el suelo y contribuiría a definir el régimen hídrico en relación a la posición que ocupan en el paisaje y a las prácticas de manejo utilizadas.

1.3. Irrigación de los viñedos en la zona mediterránea

La vid ocupa extensas áreas agrícolas en regiones áridas y semiáridas, muchas de ellas, tradicionalmente sin riego. Su crecimiento y producción bajo condiciones mediterráneas con deficiencias hídricas transitorias constituyen la principal limitante medioambiental (Schulze, 1988). La buena adaptación de este cultivo se debe a su potencial hídrico foliar y conductancia estomática que actúan como reguladores de las necesidades básicas de agua, permitiendo mantener una fotosíntesis eficiente sin manifestar, hasta cierto punto, los inconvenientes que producen sequías extremas. El riego produciría una mayor actividad fotosintética y una transpiración más regular que favorecería a la fisiología del vegetal (Reynier 1999, cit por Salazar y Melgarejo, 2005). Por esto es necesario que la irrigación, y el uso eficiente del agua sean considerados a efectos de mejorar la productividad de la vid y la calidad de las cosechas en zonas semiáridas.

En varias zonas de España se introdujo la irrigación para aumentar los rendimientos, buscando un equilibrio con la calidad logrando vinos de alto nivel. El cultivo de vid es uno de los de mayor importancia en Raimat, Cataluña y está destinado a la producción de vinos y cavas. Su clima mediterráneo y semiárido de elevada irregularidad en la distribución de precipitaciones con lluvias torrenciales aceleraría los procesos erosivos que combinado a deficiencias hídricas frecuentes afectarían a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas llevando a cubrir dichos faltantes con riego.

Las prácticas y métodos de irrigación inciden sobre la estructura del suelo y un mantenimiento de producción de una agricultura sustentable (Bouma, 1991), pudiendo afectar el riego al régimen de agua y sales en la zona de raíces y a la uniformidad de su distribución con efectos significativos para el cultivo (Warrick & Gardner, 1983). El riego por aspersión es muy común y usado mundialmente con sistemas de pivote en U.S.A. y en Israel (Ben Hur, 1994). Las características que lo hacen más populares son: la automatización, el poder cubrir grandes áreas y la capacidad de operar en terrenos relativamente irregulares (Gilley & Mielke, 1980).

En suelos mediterráneos con cultivos cuya canopia o dosel no cubre la totalidad de la superficie el suelo, no queda protegido del impacto de las gotas de agua y en consecuencia habría mayores problemas de escorrentía y erosión. Crescimanno y colaboradores (2007) citaron que el fuerte impacto de las gotas del sistema riego por aspersión causó la destrucción de los agregados del suelo, la dispersión de arcillas, la separación de partículas y su movimiento dentro de los poros, causando oclusión parcial de los macroporos y determinando un comportamiento hidráulico diferente.

En cambio, Bouma (1991) al comparar sistemas de riego por aspersión y goteo no halló diferencias significativas de porosidad y compactación en ambas situaciones. La mayor conductividad hidráulica saturada (K), medida con cilindros en el sistema de riego por goteo, reflejó la continuidad de los macroporos observados a campo, mientras que en el sistema de riego por aspersión se hallaron macroporos cortos que explicaron la baja K (sat).

La disponibilidad de agua en el periodo de crecimiento se la consideró como el factor más relevante en el crecimiento y calidad de la vid (Matthews, et al., 1990; Jackson & Lombard, 1993).

El consumo de agua del viñedo se debe básicamente a las pérdidas por evapotranspiración (ET) producidas por: la transpiración de la superficie foliar de la vid y por la evaporación de agua del suelo, esta última puede ser alta cuando el suelo está húmedo pero al secarse, la evaporación decrece rápidamente y llega a ser despreciable (Sotes Ruiz, 1996a). Las pérdidas por transpiración deben ser compensadas con la absorción de agua del suelo por las raíces, superando las

resistencias del potencial mátrico del suelo y hasta que el agua se intercambie por los estomas deberán superarse las resistencias hidráulicas que se oponen, en un gradiente decreciente de potencial hídrico desde el suelo, a través de la planta, hacia la atmósfera. La transpiración proporciona la mayor contribución a las fuerzas necesarias para la absorción del agua, siendo poco significativo el papel de la presión de raíz resultante de la absorción activa (Begg & Turner, 1976).

La resistencia al transporte de agua desde la masa del suelo hasta la interfase suelo-raíz puede ser importante dependiendo del contenido hídrico, de características del suelo y del enraizamiento de la planta. Las resistencias aportadas por raíz, xilema y hojas componen la resistencia total de la planta, siendo la resistencia del xilema la menor de todas.

El desequilibrio en la absorción de agua está limitado por su almacenaje en la planta, que en el caso de las especies leñosas puede ser hasta del 100%. El agua almacenada por las cepas de un viñedo puede equivaler a 6 mm, equivalente a las mayores tasas de transpiración citadas de 5,9 mm (Begg & Turner, 1976).

La vid tiene un requerimiento aproximado de 300 a 800 l de agua para la formación de 1 kg de materia seca (Sotes Ruiz, 1996a). Por lo tanto un rendimiento de 7.000 a 45.000 kg ha⁻¹ de materia fresca, equivalen de 1.500 a 9.000 kg ha⁻¹ de materia seca total, suponiendo un consumo de agua de 750 a 4.500 m³ ha⁻¹ año⁻¹, con una media de 2600 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (260 mm). Si a ello, se suman otras posibles pérdidas de agua, se llegan al uso de agua de los viñedos citados en la bibliografía de 200 a 800 mm.

La eficiencia de la vid en el uso del agua (g de materia seca por kg de agua transpirada) se incrementa con el aumento del vigor, variando según Smart & Coombe (1983) de 1,4 a 5 g kg⁻¹ y se la considera como un indicador de la capacidad de producción específica de cada genotipo (potencial de producción).

El consumo hídrico de la vid (var. Tempranillo), en Ribera del Duero, se estimó en un 2% para el período invernal, un 10% para el período de “brotación” (estado “B”: desborre con 90% de yemas de algodón) a “cuajado” (estado “J” cuando los frutos poseen el tamaño de un grano de arroz), un 43% de cuajado a “envero” (estado “M2” cuando se tienen el 50% de las bayas coloreadas) y un 45% de envero a “caída de las hojas” (estado “O”). Todo ello dependiendo entre otros factores de las condiciones climáticas, el sistema radicular y el consumo de racimos (Bartolomé, 1993; Bartolomé et al., 1995). Esta variedad junto con la variedad Manto negro fueron calificadas entre las más sensibles al estrés hídrico (Delgado et al., 1995; Barceló et al., 1998; Escalona et al., 1999)

Las necesidades hídricas de la vid se extienden hasta la postcosecha, para completar el segundo crecimiento de raíces, evitar la defoliación, continuar la actividad fotosintética y generar reservas de carbohidratos que se emplearán en el

siguiente ciclo (Kliewer, 1981; Williams et al., 1994). Las elevadas temperaturas y humedad del suelo en el otoño pueden favorecer una brotación anticipada, provocando un gasto importante de carbohidratos (Winkler et al., 1974; Neja et al., 1994), una susceptibilidad a las bajas temperaturas invernales, disminuyendo la brotación de las yemas en la siguiente campaña y deteriorando la estructura permanente de la planta, lo que repercute en un menor rendimiento (Osterass, 1962; Hamman et al., 1990). Por ello, para evitar brotaciones prematuras se mantienen bajos contenidos de humedad de suelo (Williams et al., 1991; Kamande et al., 1997). En vides de la variedad Cariñena al mantener la humedad del suelo a -0,3 y a -0,6 MPa, aumentó el rebrote (número y peso seco) respecto a la situación de mantener el suelo a -0,9 MPa en el periodo de la postcosecha, incrementándose la susceptibilidad de las yemas a las bajas temperaturas invernales, afectando a la brotación y a la producción con una reducción del 45% respecto al total del año anterior (Godoy Avila et al., 2001).

1.4. Efectos de la irrigación de la vid en la producción

La dificultad en establecer un adecuado balance hídrico, se basa en la cuantificación de las necesidades de agua de la vid, y en la respuesta de la planta al aporte de agua, ya que hay otros factores que también la condicionan como el sistema de conducción, los cambios de la masa vegetativa a medida que avanza la estación e incremento de transpiración. Otro aspecto relevante es el de evaluar las necesidades de agua con el fin de optimizar su capacidad productiva.

El modo en que el efecto riego se manifiesta en la producción de materia seca, rendimientos, calidad del mosto, concentración de azúcares, acidez y pH entre otros son importantes para una buena vinificación, actuando como factor regulador de la producción, manteniendo en el tiempo los niveles de cosecha a intervalos más equilibrados y regulares que sin riego (Sotes Ruiz, 1996b).

En vides de la variedad Tempranillo en la zona de Ribera del Duero con riego por goteo se obtuvieron aumentos de la superficie foliar, lo que favoreció la absorción de la radiación. El régimen hídrico resultó un factor determinante en la producción global de la materia seca (Pérez, 2002). En ensayos realizados en viñedos de las denominaciones de origen: Rioja, Navarra y Ribera del Duero, el efecto del riego fue positivo, aumentando la producción, el peso del racimo, y el peso y tamaño de la baya con riegos de hasta 150 mm ha⁻¹, y un máximo productivo que no se superó con aportes de 300 mm ha⁻¹ (Sotes Ruiz, 1996b). En la zona central de España con vides (var. Tempranillo) bajo riego por goteo se encontró mayor producción sin afectar la acumulación de azúcares (Esteban et al., 1999).

Los parámetros de calidad del mosto fueron mejores en vides irrigadas al alcanzar tensiones menores de -1,2 MPa con respecto a las regadas en tensiones menores de -0,6 MPa (Girona, et al., 2006), pero la combinación de deficiencia de

agua del suelo con las limitantes climáticas comunes conduce a una reducción progresiva del crecimiento de la vid y rendimiento de uva (Schultz, 1996).

Rühl & Alleweldt (1985) hallaron que el contenido de azúcares se incrementó cuando se regó durante el estado de maduración, cuando éstos se acumulan en las bayas, mientras el riego en los primeros estados de desarrollo de los frutos produce un aumento del peso de los mismos y un decrecimiento de la concentración de azúcares. Tanto el exceso de irrigación (Matthews & Anderson, 1988) como severas deficiencias hídricas (Hardie & Considine, 1976) pueden afectar la acumulación de azúcares.

La acidez total del vino constituye un importante elemento de sus características gustativas, interviniendo en mayor medida que el pH, en la sensación de “verdor” o “frescura”. Hay quienes sostienen que un vino de consumo corriente es más agradable y digestivo si su acidez es algo elevada, estos vinos también toleran mejor el agregado de agua. En general, en todos los tipos de vinos tintos se busca más bien una baja acidez, elemento esencial para la “suavidad”, el “aterciopelado” y el “cuerpo”, mientras que una mayor acidez, aún cuando no se manifieste como tal, es un elemento de “aspereza”, de “falta de cuerpo” y de la cualidad de “seco”. Esta noción no se aplica por igual a los vinos blancos, en los cuales una acidez ligeramente dominante puede resultar un atractivo. El papel que desempeña la acidez total es un elemento esencial para los vinos tintos ya que constituye la base de los cuidados y tratamientos, tratándose de asegurar el mantenimiento de éstos por una vía que no lleve a una acidez elevada. La noción para que un vino tinto sea suave y posea ante todo una acidez baja, se impuso muy difícilmente, y todavía hay quienes siguen pensando que una acidez elevada es uno de los elementos de la calidad y del mantenimiento.

La acidez del vino es aproximadamente de tres cuartos de la acidez del mosto que ha originado dicho vino. Si el mosto es poco ácido, la acidez total aumenta durante la fermentación; por el contrario, disminuye cuando se trata de mostos ácidos, tanto más cuanto más ácidos sean éstos. Durante la fermentación primeramente aumenta la acidez por la formación de ácidos y disminuye luego, por fermentación maloláctica y por precipitación de bitartrato de potasio, pudiendo suceder primero cualquiera de ellas.

La acidez total del mosto (debido al ácido málico) se incrementó con el aumento de las dosis de riego y cuando éstas se aplicaron entre “cuajado” y “envero”. En cambio el pH disminuyó con aportes elevados de agua (300 mm) sin observarse efectos al modificar el momento de su aplicación (Sotes Ruiz, 1996b).

En variedad Tempranillo, García Escudero et al., (1994) encontraron que el riego entre cuajado y envero, aumentó la producción, y la acidez total, sin modificar la concentración de azúcares, ni el pH del mosto. En general los

viñedos regados presentan frutos de mayor acidez y los mostos resultan más “herbáceos” y “tánicos” (Lissarrague, 1997).

También la distribución de raíces de viñas está influenciada también por el riego y por la capacidad de retención hídrica del suelo. En viñas de Australia Soar & Loveys, (2007) determinaron que las variaciones texturales influyeron en la distribución vertical de raíces, y el tipo de irrigación influyó en las variaciones horizontales. La conversión de vides con riego por aspersión a riego por goteo aumentó la masa total de raíces y las de 1 a 4 mm de diámetro bajo las líneas de goteo, entre los 25 y 50 cm de profundidad. Con el cambio del sistema de riego por aspersión a riego por goteo aumentó significativamente el sistema radical, logrando mejorar las condiciones para soportar deficiencias hídricas.

Reynier (1995) constató un mayor desarrollo en el sistema radical de las viñas adultas (entre los 20 a 50 cm de profundidad) debido a que en superficie dependen de las prácticas culturales y de las condiciones de humedad. A mayor profundidad la penetración de raíces puede dificultarse por presencia de piedras, asfixia y mantenimiento de las temperaturas bajas en primavera. Según Salazar y Melgarejo (2005), las raíces de la vid ocupan generalmente las capas poco profundas del suelo, entre los 0,20 y 0,40 m, en función a las características edáficas, a la profundidad y a las prácticas de manejo. Fahn, (1985, citado por Salazar & Melgarejo, 2005) halló que la mayor parte de las raíces, se sitúan entre los 0,70 y 1 m de profundidad, pudiendo llegar fácilmente a más de 2 m dependiendo del tipo y estructura del suelo. Sin embargo, en determinadas condiciones más favorables pueden lograr un amplio desarrollo lateral alcanzando más de 5 metros (si lo permite el marco de plantación y el suelo) y en profundidad de 4 a 5 m en condiciones muy particulares de cepas viejas, suelos y condiciones ecológicas propicias.

2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Objetivos generales

- Determinar el efecto de las propiedades físicas sobre el régimen hídrico del suelo, los procesos de degradación y la producción de vid bajo riego en Raimat (Lleida, España).

- Predecir el régimen hídrico del suelo en diferentes posiciones geomorfológicas, suelos, sistemas de riego y cobertura.

2.2 Objetivos específicos

- Seleccionar los métodos de análisis de propiedades físicas de suelos evaluados, considerados más apropiados para usarlos como datos de entrada fiables en modelos de simulación.

- Establecer la influencia del suelo y de la cobertura vegetal sobre la infiltración y la retención de agua del suelo.

- Predecir la generación de escorrentía superficial, los procesos activos y potenciales de erosión superficial y la disponibilidad de agua para la vid mediante modelos de simulación que integren parámetros hidrológicos (determinados a campo y en laboratorio), información climática y de la presencia de cobertura.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localizó en una propiedad de la Empresa Codorniu que posee 747 has, en la zona de Raimat, de la Provincia de Lleida, Comunidad de Catalunya, ubicada al nordeste de España. Esta área pertenece a la Denominación de Origen (D.O.) de Costers del Segre, o laderas del Segre. La totalidad del cultivo de vid, en dicha propiedad de 701,87 has, se destina a la producción de vinos y cavas de alta gama, distribuidas en 61 parcelas con diferentes variedades, que se manejan bajo riego por aspersión o por goteo. Entre las variedades en producción figuran: Albariño, Cabernet Sauvignon, Chardonnay, Godello, Macabeo, Malbec, Merlot, Petit Verdot, Pinot Noir, Sauvignon Blanc, Syrah, Tempranillo, Verdejo y Xarel.lo (Fig. 1).

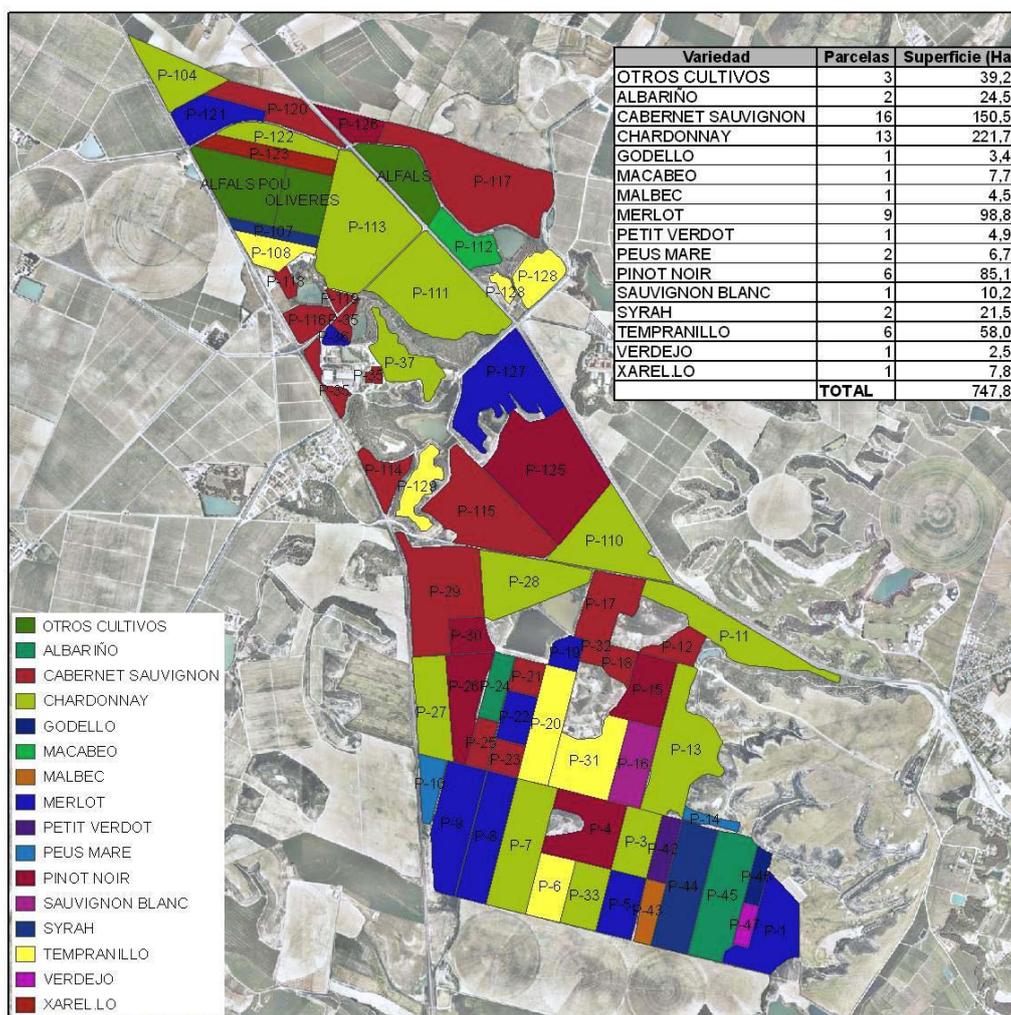


Fig. 1. Ubicación de la finca de Codorniu en la localidad de Raimat (Cataluña - España), con la distribución de las diferentes variedades de vid implantadas.

En el presente estudio se seleccionaron tres áreas correspondientes a características morfológicas, físicas y químicas de suelos de la zona vitícola de la denominación de origen (D.O.) Costers del Segre. Se realizó una prospección de campo en parcelas de viñedos transformadas principalmente por nivelación para disminuir pendientes y adaptarlas a prácticas de mecanización y riego. Algunas zonas elevadas perdieron horizontes superficiales, quedando en superficie los subsuperficiales, y áreas deprimidas recibieron materiales transportados para rellenar de las cotas superiores. Las líneas de las vides estaban orientadas en el sentido de la pendiente, con mecanización total de las labores agrícolas.

Para la selección de la zona de estudio se buscaron suelos representativos, basados en determinaciones previas de las propiedades físicas del suelo (en condiciones de campo) y químicas (realizadas en laboratorio). De acuerdo a la información obtenida en la microcuenca de Raimat, se escogieron las parcelas con viñas en tres posiciones geomorfológicas diferentes:

a) LOMA: (**L**): denominando así a la parcela en zonas de laderas con pendientes del 14 al 16% ubicadas en el lote N° 31, con vides tintas, *Vitis vinifera* L., variedad Tempranillo de 9 años plantadas a una distancia de 3 m entre líneas y 2,2 m entre plantas (Fig. 2) con riego por goteo.

b) BAJO: (**B**) Vides en zonas de fondo de valle del lote del mismo lote citado (N° 31) con pendientes de 1 a 2 % con el mismo tipo de variedad, densidad de plantación y riego (Fig. 2).

c) PLANO: (**P**) Vides en zonas en plataformas con pendientes menores al 1% del lote N° 113 con la variedad blanca Chardonnay de 24 años a la misma densidad de plantación que las anteriores y riego por aspersión (Fig. 3).

El clima del área de estudio es mediterráneo semiárido, con una precipitación media anual de 343 mm, en los últimos 21 años. En éste período, el año más seco fue el 1989, con 123 mm anuales, y los años más húmedos fueron los años 1996 con 613 mm anuales y el 2003 con 594 mm anuales.

Las precipitaciones consideradas según el ciclo del cultivo de la vid en la zona, o campaña agrícola, comprendieron de octubre de un año a septiembre del siguiente (época de cosecha en la zona). El período más seco fue la campaña de los años 1988-1989 con 156 mm, y el más húmedo en los años 1996-1997 con 656 mm anuales. La campaña con lluvias más cercanas al promedio fue la 1997/1998 con 379 mm. Las precipitaciones se concentran en los meses de primavera y otoño (Fig. 4) al no cubrirse las necesidades hídricas durante el verano y a efectos de evitar condiciones muy estresantes se aplica riego.

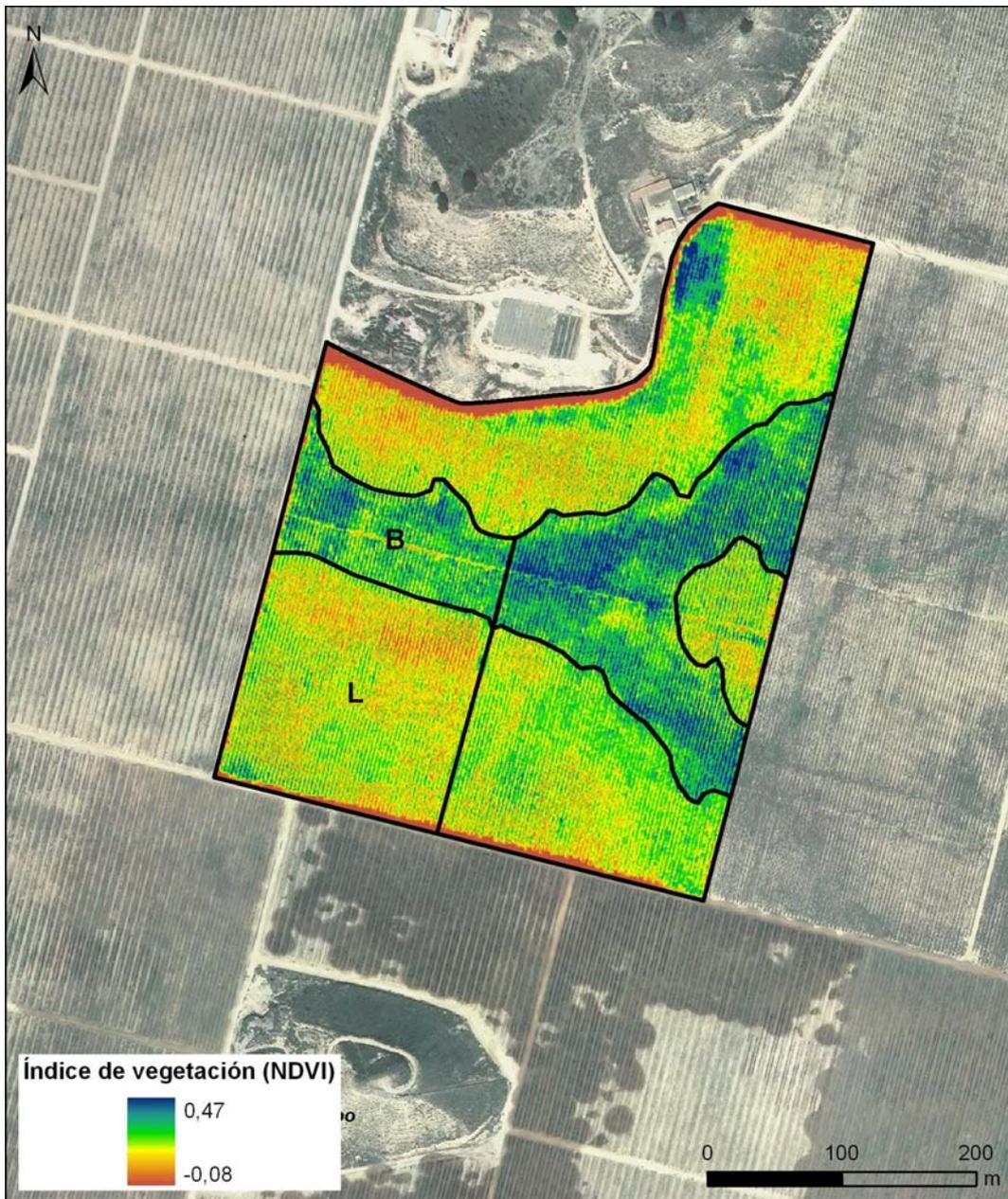


Fig. 2. Ubicación del lote N° 31, y el emplazamiento de las parcelas evaluadas en la posición de Loma (L) y del Bajo (B) en un mapa de índice de vegetación (Raimat, España).

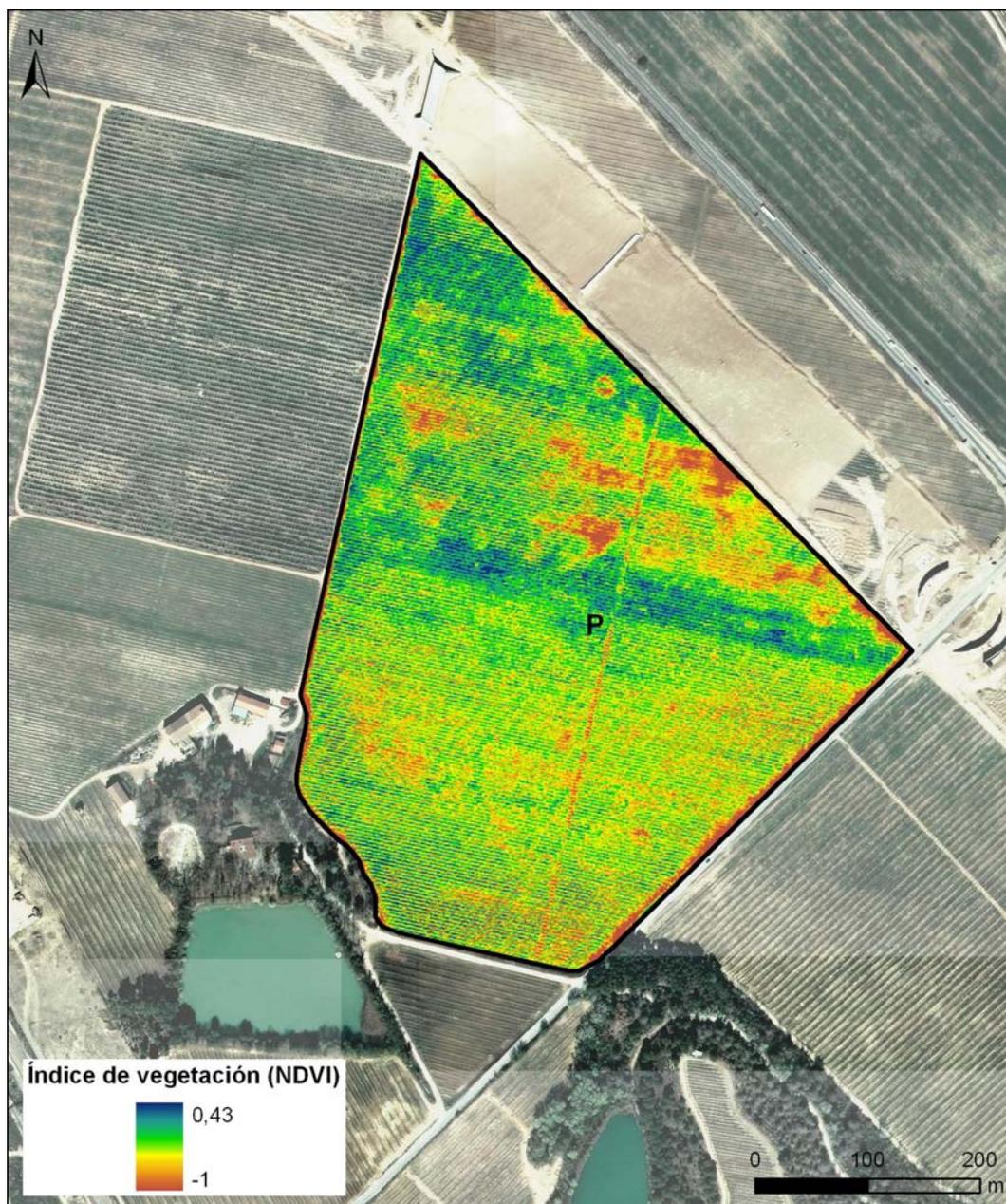


Fig. 3. Ubicación del lote Nº 113, y de la parcela evaluada en la posición de Plano (P) en un mapa de índice de vegetación (Raimat, España).

Todas las viñas están apoyadas en espalderas con la vegetación en un plano para permitir la intensificación del cultivo facilitando la mecanización y la disminución de costes de producción. En las tres situaciones se consideraron y evaluaron áreas con y sin cubierta vegetal.

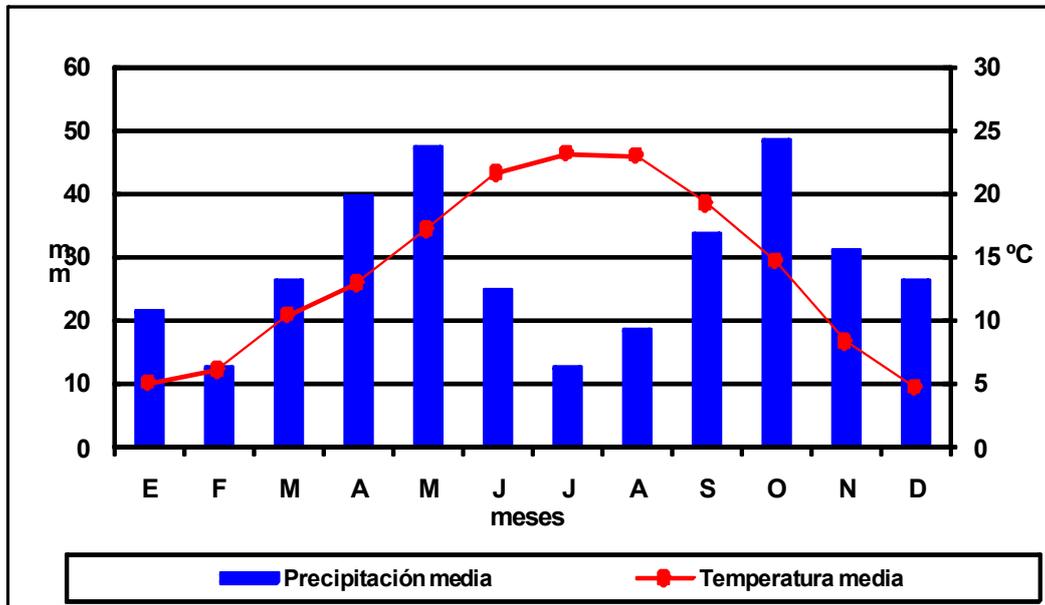


Fig. 4. Medias mensuales de las lluvias y temperaturas de la localidad de Raimat (Cataluña) de los últimos 21 años (1989-2009).

3.1 Geología y Geomorfología

La zona de la Loma está emplazada en la pendiente, próxima a una colina, llamada en la región Turó del Tibidabo, formada por lutitas con intercalaciones de bancos de areniscas o gresos. La formación “Catiense”, corresponde al Oligoceno y está constituida por conglomerados lenticulares y a menudo tubulares.

La zona del Bajo está formada por depósitos aluviales y coluviales de gravas con matriz arenosa y arcillosa, correspondientes al Holoceno.

En ambas zonas pueden hallarse rocas de diferentes coloraciones, distribuidas dentro del perfil. Éstas pueden ser de colores grisáceos o calcarenitas (denominadas también inapropiadamente areniscas ricas en CaCO_3 y limonitas), y rojizos corresponden a margas abigarradas, erróneamente denominadas lutitas ricas en CaCO_3 (Comunicación personal del Dr. Balash).

La zona del Plano está formada por gravas aluviales y materiales limo arenosos de edad Plioceno – Pleistoceno, a 160 m sobre el nivel del río Noguera-

Ribagorzana. Ambos niveles superficiales recubren sustratos del Oligoceno formado por alternancias de areniscas, limonitas y lutitas (Catiense).

3.2 Suelos

Los suelos que se emplearon para el estudio en la Loma fueron clasificados como Xerorthentes típicos, de familia esquelética franca, mésica (Fig. 5) en pendientes del 14 al 16%, con buen drenaje interno del perfil y cuyas principales limitaciones son erosión hídrica moderada y salinidad a poca profundidad. En el anexo se presentan la descripción de esta calicata en la tabla I. En el Bajo se trabajó en un suelo de igual clasificación (Fig. 6) en pendientes de 1 a 2% con escurrimiento lento, moderadamente bien drenado y salinidad ligera (Tabla II del Anexo) y en el Plano se empleó un Calcixerept típico, de familia franca fina, mésica, (Fig. 7) con una pendiente menor del 1% con buen drenaje y erosión hídrica ligera (Tabla III del Anexo).



Fig. 5. Perfil de la loma (L) con viñas de la variedad Tempranillo bajo riego por goteo.

En cada una de las tres zonas seleccionadas, se abrió una calicata para describir y muestrear los diferentes horizontes del perfil del suelo y se realizó la evaluación de las condiciones físicas de los suelos, con determinaciones de campo y de laboratorio. Para complementar los parámetros físicos evaluados en el laboratorio se tomaron en forma separada muestras de suelo por horizontes en cada calicata.



Fig. 6. Perfil del bajo (B) con viñas de la variedad Tempranillo bajo riego por goteo.



Fig. 7. Perfil del plano (P) con viñas de la variedad Chardonnay bajo riego por aspersión.

En éstos se evaluó en campo sus condiciones estructurales a través de mediciones de la densidad aparente, la resistencia a la penetración, y las características hidráulicas por medio de las determinaciones de: infiltración, conductividad hidráulica a flujo saturado y retención de humedad.

3.3.1 Determinación de las características estructurales y mecánicas del suelo

Las condiciones estructurales y mecánicas del suelo tienen una gran influencia sobre la retención y entrada de agua del suelo, movimiento y drenaje interno, aireación, crecimiento de raíces así como facilidad de laboreo

3.3.1.1 Distribución del tamaño de partículas del suelo

Se aplicó el método hidrométrico tomando las lecturas en diferentes tiempos preestablecidos en la suspensión del suelo, a medida que sedimentaban, para obtener la fracción fina, conociendo la concentración de sólidos en suspensión a una profundidad dada. Las muestras de suelos recibieron un tratamiento previo de dispersión mecánica con dispersor y dispersión química con Calgón al 10%. La determinación de arenas se realizó por tamizado en la misma suspensión de suelo (Pla, 1983; Gee & Bauder, 1986).

3.3.1.2. Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente del suelo se tomaron, por horizontes, 6 cilindros no alterados. El diámetro generalmente usado es de 4,8 cm (Blake & Hartge, 1986). Los empleados en este trabajo fueron de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura (98,2 cm³) con un muestreador tipo Uhland, que se clavaba en el suelo. Al extraer los cilindros se emparejaban cuidadosamente sus extremos, y ya en laboratorio se registraba el peso seco del suelo a 105°C (Pla, 1983).

Se usó también el método de excavación, haciendo un hueco de alrededor de 20 cm de diámetro a la profundidad del horizonte en evaluación. El volumen del suelo se hallaba colocando una lámina de plástico que se adaptaba a la forma interna del orificio, midiéndose el volumen de agua requerido para llenarlo. Todo el suelo extraído era llevado al laboratorio donde se lo pesaba con la “humedad presente”, se lo mezclaba bien, tomándose una muestra de alrededor de 500 g para secar en estufa y determinar el contenido de humedad (Pla, 1983).

3.3.1.3. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) se evaluó con un penetrómetro de impacto (hasta 70 cm de profundidad). Dicho aparato consta de una punta de forma cónica con un ángulo de 30° y de 0,8 cm² de área basal, registrándose el número de golpes de una pesa de 1 kg en caída libre desde una altura de 50 cm cada vez que la varilla profundizaba 5 cm en el suelo (Pla, 1996; Nacci, 2001). El peso del equipo es de 1,9 kg cm². Cada golpe ejerce una presión de 3 kg cm² y la presión total ejercida se calcula según la siguiente fórmula:

$$RP \text{ (MPa)} = (1,9 + (3*N)) * 10^{-1} \text{ (MPa)} / L \text{ cm}$$

Donde:

N: indica el número de golpes de la pesa para que penetre la punta cónica de $0,8 \text{ cm}^2$

L: profundidad de penetración en cm.

3.3.1.4. Porosidad total

La porosidad del suelo se determinó en laboratorio con muestras inalteradas tomadas con los cilindros antes descritos para densidad aparente, con el muestreador tipo Uhland, donde se determinó del contenido de agua en condiciones de saturación con posterioridad a la determinación de conductividad hidráulica a flujo saturado.

3.3.1.5 Estabilidad de los agregados

Se determinó según el método de Kemper & Rosenau (1986), empleando la máquina de tamizar por ellos descrita. Para la determinación se usaron agregados de 2 a 3,36 mm, humedecidos previamente por capilaridad, empleándose tamices de 0,5 mm. La longitud del desplazamiento de los tamices fue de 13 mm, con una frecuencia de 35 ciclos por minuto. El recorrido del desplazamiento de éstos se realizó siempre dentro del agua. El tiempo de tamizado fue de 5 minutos. Los agregados que soportaron el tamizado fueron secados a 105°C , pesados y corregidos por su contenido de arena.

3.3.2. Determinación de las propiedades hidráulicas

3.3.2.1. Infiltración

La infiltración de agua se evaluó en campo, con diferentes formas de aportes de agua al suelo, midiéndose los cambios en la velocidad de infiltración y considerando el efecto de las condiciones superficiales (presencia o no de cobertura) bajo diferentes situaciones de tránsito de maquinarias. En los eventos de lluvia simulada se registraron las pérdidas por escorrentía superficial. La infiltración se determinó por diferentes métodos:

3.3.2.1.1. Método de inundación con el método del doble cilindro

Se determinó con cilindros con diámetro interno de 30 cm. El cilindro externo que tiene 50 cm se suplió haciendo un reborde con suelo para mantener una lámina permanente de agua, a fin de suprimir o reducir al mínimo el flujo lateral del agua que se infiltra en el suelo debajo del cilindro, conservando el suelo inundado alrededor del cilindro central donde se hacían las mediciones. El agua se vertía en ellos, cuidando de no dañar la estructura del suelo, protegiendo la

superficie del mismo mientras se lo llenaba con agua. La entrada de ésta se registró por minuto durante los primeros 5 minutos, luego y hasta que el flujo se hacía constante, cada 5 o 10 minutos según su velocidad de entrada, momento que correspondía a la infiltración mínima o infiltración básica (Pla, 1983).

3.3.2.1.2. Método de inundación con cilindros de 20 cm de diámetro

El agua se vertía con los mismos cuidados que en el caso anterior para evitar el sellado del suelo. Se llenaba hasta 5 cm de altura de agua y se registraba el tiempo necesario para la entrada de dicha lámina, repitiéndose la medición hasta que la velocidad de entrada de agua era constante.

Con el mismo método, se midió la infiltración, pero provocando la formación de un sello superficial dentro de los cilindros pequeños de 20 cm con una regadera, dejando caer el agua desde 1,50 m de altura, continuando con el mismo procedimiento ya detallado, para evaluar la infiltración del suelo a través de un sello superficial formado adrede.

3.3.2.1.3. Infiltración a través del sello superficial

Se midió (en campo) según la metodología propuesta por Pla (1996) cuando se formaba un “sello” o capa delgada superficial de suelo de permeabilidad restringida, debida al impacto de gotas de lluvia sobre el suelo desnudo, por riego por aspersión, o por compactación del tráfico de maquinaria pesada, o por depositación de partículas en suspensión en el agua de inundación o escorrentía superficial. La tasa de infiltración queda controlada por la conductividad hidráulica saturada de esa capa, o por la conductividad hidráulica no saturada del suelo subyacente a ésta, cuando aún permanece relativamente seco.

La medición de la infiltrabilidad de un suelo ya sellado superficialmente se hace con un gotero de diámetro pequeño sin alterar el sello superficial donde caen las gotas. Bajo el gotero se forma una mancha o halo más oscuro y brillante, el cual se distingue mejor cuando la superficie del suelo originalmente se halla seca. El diámetro de dicha mancha, algunas veces aproximadamente circular, va aumentando hasta estabilizarse cuando el suelo con sello superficial alcanza una humedad próxima a la saturación.

Para la determinación se emplean recipientes con el sistema de “Mariotte” para regular el flujo de salida de agua a través de un tubo conectado a un gotero en su extremo, cayendo el agua gota a gota sobre el sello superficial previamente formado. Otro tubo (3 mm de diámetro) abierto en ambos extremos va desde el fondo del frasco hasta unos 3 cm por encima del tapón sirviendo como entrada de aire y para que se mantenga siempre igual a la presión atmosférica. La parte inferior de los tubos dentro del frasco quedan cerca del fondo para poder utilizar

al máximo su contenido sin variar la velocidad de goteo. Para el sifón, se puede utilizar un “catéter” (empleado en medicina) que dispone de un sistema para la regulación del flujo del agua. Si no existía sello al momento de hacer las determinaciones, se lo provocaba previamente con una regadera para determinarlo días después. Un buen flujo de agua a través del sifón se logra si el frasco alimentador se instala a más de 30 cm por encima del nivel del suelo.

Cuando toda el agua aplicada con el gotero logra infiltrar a través del área mojada, y ésta se estabiliza, se delimita el área mojada con alfileres de cabezas de colores y se registra el área a través de la cual el agua infiltra verticalmente. Antes y después de la determinación se hacía un control del caudal de salida del gotero. La tasa de infiltración (I_s) se calcula:

$$I_s (\text{mm h}^{-1}) = 10 Q / S$$

Donde:

Q es el flujo de goteo calibrado en $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$.

S es la superficie mojada luego de estabilizada, expresada en cm^2 .

3.3.2.1.4. Infiltración bajo lluvia simulada en el campo

Para ello se empleó un simulador de lluvia desmontable con una caja metálica de 20 cm de ancho por 30 cm de largo y 15 cm de profundidad, cuyo fondo contiene goteros a 1 cm de distancia entre sí, usando el sistema de tubitos y alambres descritos por Nacci & Pla (1991) formando gotas de 2,5 – 3 mm de diámetro. Dicha caja es soportada por patas regulables, para su nivelación, a 2,5 m de altura. Dentro de la caja, una estructura metálica soporta un frasco invertido de 5 litros de capacidad, que suministra agua para la determinación por un tubo de salida flexible de 5 cm. Para regular la intensidad de lluvia aplicada, se varía la longitud de dicho tubo.

La lluvia simulada debe caer sobre una parcela previamente delimitada de 600 cm^2 que cuenta con un vertedero de aluminio que recolecta el agua de escorrentía a un recipiente ubicado dentro de un hueco excavado en el suelo (20 x 20 cm). En él se recoge el agua de escorrentía.

Las intensidades de lluvia se miden al inicio y al final de las pruebas. Los volúmenes recogidos cada 5 minutos se registran continuamente, hasta obtener, en tres o cuatro oportunidades, volúmenes similares de agua escurrida (Pla, 1983).

Para cada intervalo de tiempo (T) de medición y volumen de agua recogido (V), se calcula la tasa de infiltración (I) en la parcelita de área (A), para una determinada intensidad (i) de lluvia simulada:

$$I (\text{mm h}^{-1}) = i (\text{mm h}^{-1}) - 600 * V (\text{cm}^3) / A (\text{cm}^2) * t (\text{minutos})$$

3.3.2.1.5. Infiltración bajo lluvia simulada en el laboratorio

A efectos de complementar los datos de los simuladores de lluvias en campo, en el laboratorio se determinó la infiltración bajo condiciones controladas de lluvia simulada en bandejas. Las pruebas se realizaron, utilizando el mismo simulador de lluvia empleado en el campo con bandejas de acero inoxidable de 20 x 30 x 20 cm (ancho, largo y profundidad) y un vertedero de también de acero inoxidable, para recolectar el agua de escorrentía. Las bandejas tienen además, un doble fondo realizado con una lámina perforada a 5 cm de su base, donde se coloca un lienzo para retener el suelo y permitir el paso del agua percolada e impedir la escorrentía por sobresaturación. Las determinaciones se efectuaron con agregados de suelos del horizonte superficial menores de 8 mm y para evitar las pérdidas de agua y suelo por salpique, se colocó alrededor de la bandeja una extensión metálica de 30 cm de altura. Las pruebas se hicieron a intensidades de 90 mm h^{-1} , con una pendiente del 5%. Tanto para las determinaciones en el campo como en el laboratorio se empleó agua desionizada con una C.E. $< 0,2 \text{ mmhos cm}^{-1}$ a 25°C .

3.3.2.2. Conductividad hidráulica

La determinación se realizó de dos formas:

3.3.2.2.1 Conductividad hidráulica saturada en el campo

En cada horizonte definido en las calicatas, se emplearon los cilindros metálicos de 30 cm de diámetro antes descritos para infiltración. Estos se insertaron más de 20 cm en los escalones excavados de las calicatas, coincidentes con los horizontes muestreados hasta la profundidad equivalente a su espesor (Fig. 8). El agua se vertió en los cilindros evitando dañar la estructura del suelo y se mantuvo por reposición una carga permanente de agua, hasta lograr una velocidad constante de percolación. Este dato corresponde a la conductividad hidráulica en flujo saturado del horizonte en cuestión (Pla 1983).

3.3.2.2.2 Conductividad hidráulica saturada con carga constante en laboratorio:

La determinación se realizó en las muestras de suelo no alterados, tomadas con los cilindros del muestreador tipo Uhland (98 cm^3 aproximadamente) previamente mencionados y transportados cuidadosamente hasta el laboratorio. Luego de emparejar sus extremos, sin sellar las caras del cilindro, se colocó una malla de tela en su parte inferior, sujeta por una banda elástica. Los cilindros así acondicionados, fueron saturados por capilaridad y colocados en una bandeja con agua. La parte superior del cilindro se conectó a una extensión metálica de 2,5 cm de altura y fueron sujetos por una banda de goma en su unión, a fin de evitar

pérdidas de agua. En un permeámetro de carga constante (Pla, 1983) se midieron los volúmenes percolados y se registraron los tiempos empleados en recolectarse el agua. Si en 24 horas no se alcanzaba a recoger 100 cm³ se consideraba finalizada la determinación.

La conductividad hidráulica a flujo saturado se calculó según la siguiente fórmula:

$$K_s \text{ (cm h}^{-1}\text{)} = V \text{ (cm}^3\text{)} / A \text{ (cm}^2\text{)} * \Delta t \text{ (h)} * ((H+L\text{(cm)})/L\text{(cm)})$$

Donde:

K_s : es la conductividad hidráulica saturada.

H: carga hidráulica.

L: espesor del suelo.

Δt : tiempo transcurrido.

V: volumen de agua recogido.

A: área de la sección circular del cilindro de suelo.

3.3.2.2.3 Conductividad hidráulica saturada del sello superficial frente al impacto de las gotas e índice de sellado

Si el suelo sin cobertura estará expuesto al impacto de gotas de lluvia de elevada intensidad, es necesario conocer el efecto de éste sobre el deterioro estructural. Esa destrucción de la estructura se va a manifestar fundamentalmente en la disminución de la tasa de infiltración de agua, limitada por la conductividad hidráulica a flujo saturado del sello que se forme. El método mide un índice que refleja ese fenómeno, calibrando el aporte de lluvia simulada y logrando la intensidad de precipitación artificial deseada (mm h⁻¹). Para ello se debe medir el volumen de agua, el tiempo empleado y el área interna del tamiz. Las gotas impactan sobre una capa de agregados de suelo y se calculan los cambios de conductividad hidráulica saturada (K_s) sin protección superficial del suelo hasta llegar a un valor mínimo constante. De igual modo se hace una determinación con una capa de agregados protegida del impacto de las gotas con una tela (K_c). Con la relación K_c y K_s se calcula finalmente el índice de sellado (ISR) o índice de estabilidad estructural del suelo superficial al impacto de las gotas de lluvia y del efecto protector que la cobertura ejerce al impacto de las gotas de lluvia (Pla, 1983; Nacci & Pla, 1991; Ramos & Nacci, 1997).



Fig. 8. (a) Conductividad hidráulica del suelo medida en los peldaños de la calicatas de los sitios estudiados, visualizándose las muestras sacadas de densidad aparente, saturación, capacidad de campo extraídas con barrena y resistencia a la penetración realizadas simultáneamente; (b) Calibración de los FDR; (c) Simulación de lluvia; (d) Plano con Chardonnay (e) Loma con Tempranillo; (f) Bajo con Tempranillo.

Se emplearon agregados de suelo de 2-4 mm, secos al aire, y se colocaron uniformemente sobre el fondo del tamiz de 300 mallas. Para evitar el “salpique” se empleó una extensión superior al tamiz, situada sobre el embudo Buchner que se hallaba fijo al plato rotatorio. Este conjunto estaba situado de tal manera que el fondo del tamiz quedase 2-2,5 m por debajo de los goteros.

Se hizo girar el plato rotatorio cuando las gotas (2,5 a 3 mm) comenzaban a caer sobre los agregados del suelo (1 cm de espesor) se anotó el tiempo. El tubo de salida del embudo se colocó sobre una probeta graduada anotándose el tiempo del inicio de percolación del agua. A partir de ese momento se mide cada cierto tiempo el volumen del agua percolada. Esos intervalos de tiempo pueden ser de dos minutos al inicio, y pueden alargarse posteriormente hasta diez minutos. También se anotó el tiempo cuando comienza a acumularse agua sobre la superficie del suelo en el tamiz.

Al cabo de 60 minutos se comprobó nuevamente la intensidad de la lluvia. Con los datos obtenidos, se graficaron en las abscisas los tiempos y en las ordenadas las intensidades y con los valores de intensidad al inicio y al final, se interpolaron gráficamente en la función lineal hallada para obtener los valores de cada intervalo.

Con los volúmenes de agua percolada (V) en cada intervalo de tiempo (t), el área del embudo (A), y la intensidad de lluvia simulada (I), se calculó el gradiente hidráulico Δi y la conductividad hidráulica saturada promedio (K) de cada intervalo de tiempo (t):

$$\Delta i = (I(\text{cm h}^{-1}) * t \text{ acum (h)}) - (V \text{ acum.} / A (\text{cm}^2)) / \text{espesor de suelo (cm)}$$

$$K (\text{mm h}^{-1}) = (((V (\text{cm}^3) / A (\text{cm}^2)) * 10) / \Delta i * T (\text{horas}))$$

V: volumen acumulado en horas desde el inicio de la percolación;

T: tiempo acumulado desde el inicio de la percolación.

El índice de sellado relativo será: $ISR = K_c / K_s$

3.3.3. Retención de agua en el suelo

3.3.3.1. Saturación y Capacidad de campo

Al terminar la determinación de la infiltración en superficie antes mencionada y las de conductividad hidráulica saturada en campo en los escalones de la calicata, se eliminó el agua que quedaba en la superficie tomándose en ese instante muestras de suelo para determinar el contenido de humedad a saturación

en campo en los diferentes horizontes definidos en cada calicata. Hecho esto, se cubrió el cilindro de 30 cm con una lámina de polietileno a fin de evitar pérdidas por evaporación. Pasadas unas 48 horas, se realizó un segundo muestreo para obtener la humedad retenida del suelo a capacidad de campo, (máximo contenido de agua que retendría el suelo al cesar las pérdidas de exceso de agua por el drenaje interno) a las profundidades ya consideradas para saturación (Pla, 1996).

3.3.3.2. Curvas de retención de humedad

La retención de humedad se determinó a - 0,01; - 0,03; - 0,1; - 0,2 y - 1,5 MPa, según el método desarrollado por Richards (1943). Se emplearon muestras de suelo disgregado y tamizado por 2 mm. Las muestras se colocaron en anillos de goma sobre las placas de porcelana porosa y luego de ser saturadas, se procedió a aplicar las presiones de aire establecidas dentro de las cámaras de Richard por unas 72 horas, extrayendo parte del agua retenida hasta alcanzar la condición de equilibrio. Pasado este tiempo, las muestras se retiraron de la cámara y se determinó gravimétricamente la humedad (Klute, 1986; Pla, 1986).

3.3.3.3. Agua retenida en mesa de tensión a 0,01 MPa

Se realizó en los cilindros de muestras de suelo inalterados, donde se determinó conductividad hidráulica a flujo saturado. Se colocaron los cilindros de suelo saturados sobre un plato de porcelana instalado en una mesa, con bordes laterales y tapa que permitió cubrir el plato y los cilindros. Sobre la superficie de la mesa y por debajo del plato se colocó un papel secante, el cual se mantuvo saturado con agua. Luego se aplicó una succión con una columna de agua suspendida de 100 cm. Con ello, se extrajo el agua retenida en los poros con radio equivalente mayor de 15 μm . Por diferencia de peso entre los cilindros a saturación, bajo 100 cm de succión y los secos en estufa, se calculó la fracción del volumen total del suelo ocupado por la porosidad total y por poros con diámetro > 15 μm (Pla, 1983).

3.3.3.4 Agua retenida a -1,5 MPa

En el presente método se utilizó el Higrómetro (WP4-T) para determinar el agua retenida a -1,5 MPa (considerado generalmente como punto de marchitez permanente) con corrección de temperatura. Este aparato mide el potencial del agua de una muestra de suelo en base a la técnica del punto de rocío. La muestra es equilibrada térmicamente en una cámara sellada con un espejo que detecta la condensación del agua. En el punto de equilibrio, el potencial agua del aire en la cámara es igual al potencial agua de la muestra de suelo. La temperatura del espejo es controlada por un enfriador termoeléctrico. Una célula fotoeléctrica, sensible a cambios de reflectancia, detecta cuándo se inicia la condensación de vapor sobre el espejo refrigerado, por medio de la incidencia de un haz de luz que

es reflejado por éste. Una termocupla conectada al espejo registra la temperatura en la cual se produce la condensación (Scanlon, et al., 2002). La determinación se realizó empleando 30 g de suelo pasado por tamiz de 2 mm, humedeciendo la muestra y dejando que se equilibre la humedad al ir perdiéndose progresivamente. La metodología fue seguida, según modificaciones realizadas por Fonseca (comunicación personal) a la propuesta original de Scanlon, et al., (2002) y Decagon (2002) ya que con las pequeñas cantidades de suelo que usaban en los protocolos iniciales se tenía mucha variabilidad y fuentes de error.

3.3.4. Escorrentía superficial y pérdida de suelo en ensayos de campo

En la zona de “la pendiente” en las situaciones de L, y B se instalaron estructuras colectoras o canaletas tipo Gerlach (1967) de 50 cm de ancho en sentido perpendicular a las líneas del cultivo y de la pendiente, conectadas a recipientes de 10 L de plástico enterrados en el suelo. En éstos se recolectaba el total de escorrentía superficial posterior a cada evento de lluvia. En ellos se tomaron alícuotas de 1,5 L (de agua de escorrentía y sedimentos arrastrados). El área de recolección demarcada de la escorrentía fue de 1 m². Los sedimentos fueron separados de la alícuota tomada por decantación y secados en estufa a 105°C. El promedio de la concentración de sedimentos fue determinada como la relación entre la masa de sedimentos secos totales respecto al volumen de agua de escorrentía superficial. La escorrentía y la concentración de sedimentos fueron evaluadas en el período comprendido entre el 10 de abril del año 2007 y diciembre de 2008.

3.3.5. Evolución del contenido de humedad del suelo y drenaje en campo

En las tres condiciones estudiadas se instalaron adicionalmente, sondas que permitieron medir en forma continua y no disruptiva, los cambios semanales en la humedad del suelo. Para ello se enterraron, en cada sitio, 6 tubos de fibra de vidrio de un metro de profundidad donde se introdujo una sonda de reflectometría de dominio temporal (TDR time domain reflectance Imko Trime FM 7545 tube probe) en las siguientes profundidades: 0–20 cm; 20–40 cm; 40–60 cm y 60–80 cm por duplicado. Tales mediciones se hicieron desde el mes de diciembre de 2006 hasta diciembre de 2008. Paralelamente a éstas, y para hacer una calibración de las lecturas del TDR, se tomaron quincenalmente muestras con barrena, determinando gravimétricamente en el laboratorio, el contenido de humedad del suelo, en las mismas profundidades que las lecturas realizadas con las sondas.

El TDR determina la permitividad dieléctrica del suelo midiendo el tiempo que tarda una onda electromagnética en propagarse a lo largo de una línea de transmisión en la que el dieléctrico es el propio suelo (Heimovaara, 1994). El tiempo que tarda un pulso electromagnético en propagarse por una línea de

transmisión y volver al punto de partida está relacionado con la permitividad dieléctrica del medio.

El agua retenida fuertemente en la superficie de las partículas, no es detectable fácilmente ya que el valor de la frecuencia de oscilación de los dipolos, en las capas de agua cercanas a las superficies sólidas en presencia de un campo eléctrico oscilante, se reduce conforme se incrementa la magnitud de las fuerzas de la ligadura. (Fabregat-Santiago et al., 1999).

La principal ventaja de esta metodología de trabajo es que las medidas son relativamente insensibles y no se ven afectadas cuando la salinidad es baja, y la desventaja el elevado coste de la instrumentación necesaria para la determinación (Sánchez Pérez et al., 1999).

En el P, L y B se instalaron sondas FDR (Reflectometría en Dominio de Frecuencia) que registraban cada hora la evolución de la humedad del suelo a las siguientes profundidades: 30, 50 y 70 cm. Los FDR emplean barridos de frecuencias de resonancias que proporcionan información del contenido de agua del suelo. Un par de electrodos determinan el contenido hídrico, actuando el suelo como medio dieléctrico (Heimovaara, 1994; Heimovaara et al., 1994). Las medidas del FDR y del TDR, dependen del contenido de agua, y de los posibles huecos de aire del suelo que se formen en las proximidades de los electrodos o de las sondas.

Para medir el agua de drenaje interno del suelo se instalaron lisímetros de capilaridad pasiva por debajo del metro de profundidad, diseñados en el laboratorio de hidrología del Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo (D.M.A.C.S.) de la UdL, con una conexión a una unidad de memoria (datalogger), que permitió un registro continuo del drenaje interno del suelo hasta un metro de profundidad (Gee *et al.*, 2002a).

Para el bajo se diseñó, en el laboratorio de hidrología del D.M.A.C.S. de la UdL, (Fonseca et al., 2007) un lisímetro herméticamente sellado, a fin de evitar la entrada del agua que pudiera provenir de aportes de capas freáticas. Se redujeron las longitudes del tubo de control de divergencia (TCD) de 66 a 40 cm, y del tubo de medición que pasó a tener de 90 a 60 cm, y el equipo completo pasó de una longitud de 150 cm a 100 cm. Esto facilitó su instalación en el terreno. Solamente un reservorio es usado para medir el nivel de agua y tomar las muestras. El hermetismo es total por debajo del plato colector. La tensión del mismo se mantiene por la succión de hilos de fibra de vidrio de 45 cm de longitud. Los sensores empleados en los lisímetros en los tres sitios fueron “ECH₂O” para humedad de suelo de 10 cm de longitud (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA).

En las muestras de aguas de percolación que se tomaron durante los eventos de lluvia natural y de riego en los lisímetros instalados a tales efectos en P, en L y en B se analizó el pH, potenciométricamente, y la conductividad eléctrica de dichas muestras.

3.3.6. Régimen hídrico del suelo

El régimen hídrico del suelo se calculó con el modelo SOMORE propuesto por Pla (1997), el cual puede ser aplicado en predicción de la ocurrencia e impacto de procesos erosivos particulares muy comunes en relieves de elevadas pendientes en las zonas tropicales, los cuales no han sido considerados en los modelos de erosión previamente usados.

Por medio de una adecuada modelización de los procesos hidrológicos se demostró que la identificación y monitoreo de diferentes procesos erosivos, movimientos en masa y sus efectos, pueden lograrse con una buena aproximación (Pla, 1997). En el presente caso se realizaron simulaciones de la evolución del balance del agua del perfil de estos suelos, bajo vides con riego en diferentes posiciones del relieve, en condiciones específicas de: geomorfología, meteorología, de coberturas y riego.

Este modelo requiere una apropiada selección de los parámetros de entrada (Fig. 9) y tienen una influencia crítica en los procesos hidrológicos. Aunque se precisa de un posterior control y validación, el modelo de simulación de balances hídricos (Pla, 1992; Pla, 1995; Pla, 1996b; Pla, 1998) tiene la ventaja de basarse en parámetros de entradas fácilmente disponibles o medibles en el campo o en el laboratorio. La salida del modelo puede ser usada para guía de selección de las mejores alternativas con más probabilidades de éxito de uso y manejo de los recursos (suelo y agua), para cada combinación de suelo, clima, y topografía, a efectos de prevenir o controlar la erosión hídrica. También fue usado para predecir probabilidades de deslizamientos y procesos de movimientos en masa, bajo determinadas condiciones de clima, suelo y pendientes.

En las condiciones que se ha probado este modelo, produjo simulaciones bastante aproximadas, pero la exactitud de las predicciones depende principalmente de cuan buenas y adecuadas son las estimaciones y las medidas directas necesarias del clima y de los parámetros del suelo, teniendo en la cuenta la variabilidad espacial y temporal.

Con los datos climáticos de las estaciones meteorológicas y de los pluviómetros totalizadores, instalados en las parcelas así como los parámetros edáficos aquí evaluados y requeridos por el modelo SOMORE, se pretendió predecir el régimen hídrico de los suelos estudiados, estimando las posibilidades de escorrentía y erosión, que pudieran surgir ante cambios meteorológicos o de manejo de las parcelas.

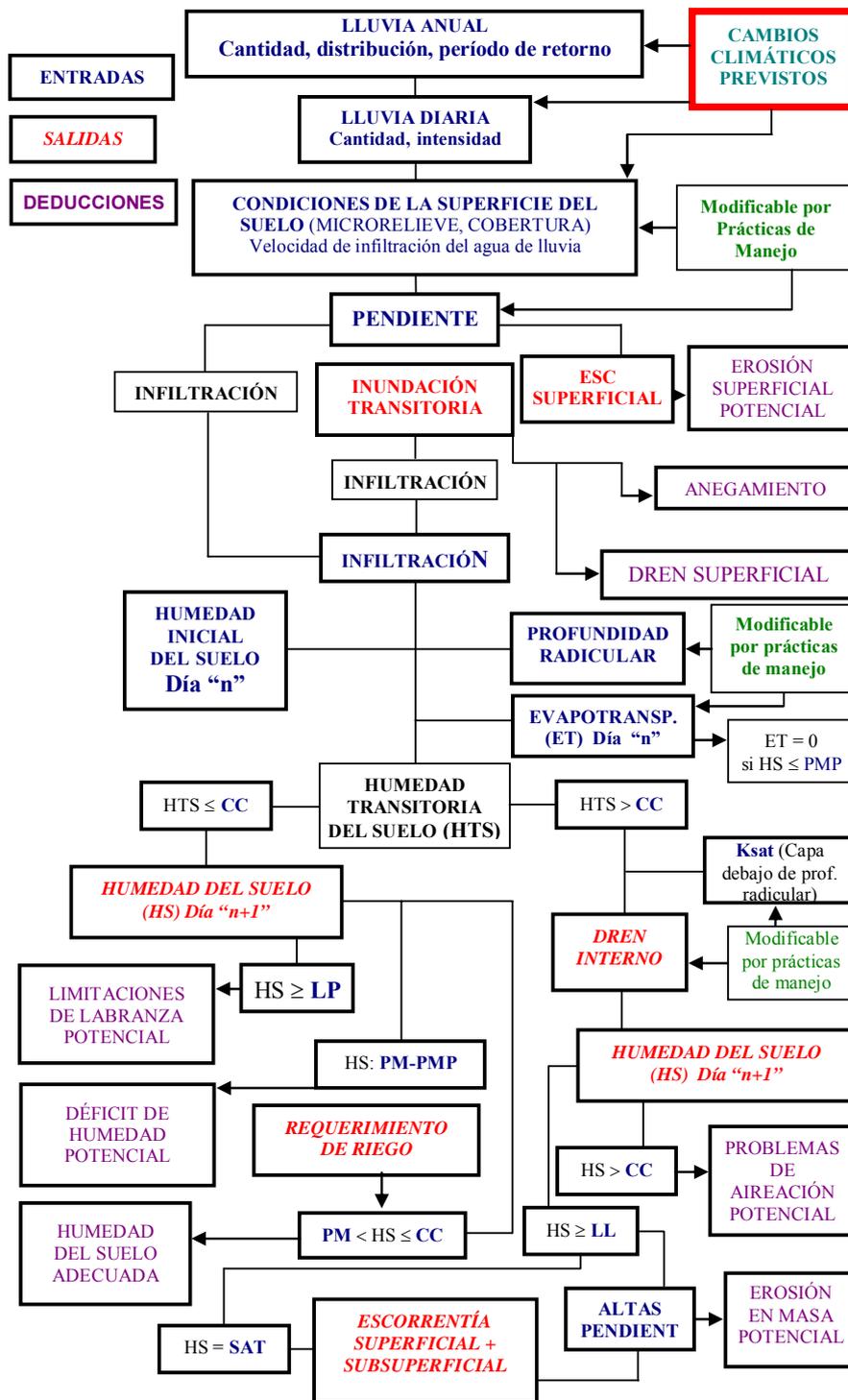


Fig. 9. Diagrama de flujo del modelo hidrológico **SOMORE** (balance diario de agua en el suelo) para predecir el régimen de humedad y los procesos potenciales de degradación del suelo (Pla, 1997).

Nota: **Ksat:** Conductividad hidráulica saturada; **CC:** Capacidad de campo; **PMP:** Retención de agua a 1,5 MPa; **LP:** Limite plástico; **LL:** Limite liquido; **SAT:** Saturación; **Dren:** Drenaje; **ESC:** escorrentía.

Las entradas del modelo son las condiciones que inciden en la velocidad de infiltración, en la escorrentía superficial, el drenaje interno del perfil, en la retención de humedad del suelo, el crecimiento de las raíces (todas ellos medidos en este proyecto) y de la evapotranspiración, que puede estimarse. Las salidas son el régimen hídrico del suelo en la zona de exploración de las raíces y las predicciones ya mencionadas previamente de escorrentía superficial y drenaje interno del perfil.

Al identificar los factores críticos y evaluar adecuadamente con este modelo se pueden prever problemas de degradación de suelos y cambiar prácticas de uso y manejo con un fundamento sólido. Se demostró (Pla, 1992; Pla, 1995; Pla 1996b) la posibilidad, conjuntamente con los períodos de retorno de eventos meteorológicos, de predecir con cierta probabilidad, en que períodos podrían presentarse situaciones catastróficas (movimientos en masa, deslizamientos, erosión, inundaciones, sedimentación) que otros modelos empíricos no los pueden prever por estar basados en relaciones estadísticas, sin fundamentos físicos ni hidrológicos. Por ello, es importante que el modelo empleado analice y tenga en cuenta el funcionamiento del sistema y los procesos que ocurren.

Otros autores (Nacci, 2001, Abreu, 2005; Fonseca, 2006) han demostrado también que su empleo resultó útil para predecir el régimen de humedad de los suelos, y los procesos de degradación de suelos en vides de la zona mediterránea.

3.3.7. Determinación de propiedades químicas del suelo

3.3.7.1. pH:

La determinación de pH del suelo se realizó en una suspensión de agua destilada en una relación de 1:2,5. El potenciómetro usado consta de electrodos de vidrio calibrado con soluciones reguladoras de pH 4 y 8 (Porta et al., 1986).

3.3.7.2. Conductividad eléctrica

La salinidad del suelo se estimó midiendo la conductividad eléctrica en un extracto 1:1 y en relación 1:5 de suelo en agua destilada y los resultados fueron expresados en dS m^{-1} .

3.3.7.3. Carbonato cálcico equivalente

La muestra pulverizada se colocó en un calcímetro a presión y temperatura constante, haciéndolo reaccionar con ácido clorhídrico concentrado. Los resultados se expresaron en gramos de CaCO_3 totales por cada 100 g de suelo (% CaCO_3), asumiéndose que todos los carbonatos son de calcio (Porta et al., 1986).

3.3.7.4. Materia orgánica

La determinación se realizó en base al método de Walkley y Black modificado. En 0,5 g de suelo tamizado por malla 0,5 mm se oxidó el carbono orgánico con dicromato de potasio 1 N y ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado con 30 minutos de reposo, empleando ortofenantrolina como indicador. Luego se valoró con sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7 H_2O$) 0,5 N, hasta obtener un color verde brillante. El contenido de materia orgánica fue calculado asumiendo que el 58% está compuesto por carbono orgánico (Nelson & Sommers, 1996).

3.4. Desarrollo de raíces

Para evaluar el desarrollo de las raíces de la viña se realizaron calicatas en cada situación estudiada, con conteo de las mismas en profundidad, a efectos de relacionarlo con los atributos físicos e hidrológicos evaluados. En la pared o cara principal de la calicata coincidente con la línea del cultivo se extrajeron las muestras de suelo estudiadas, excavándose cuidadosamente, exponiendo las raíces de una planta representativa de cada situación. Esta exposición permitió hacer observaciones directas de profundidad, distribución y densidad de raíces, complementándolo con fotografías para evaluaciones posteriores. La trinchera constó de 2 metros de lado por más de 1 metro de profundidad a fin de cubrir todas las raíces de la planta evaluada. Se superpuso un marco con un folio de acetato transparente en el cual se dibujó con marcador indeleble las raíces expuestas. En gabinete y sobre unas cuadrículas (10 por 10 cm), se hacía el conteo de las raíces que aparecían en ellas. Estos valores versus la profundidad se representaron gráficamente para tener una visión aproximada de la distribución de raíces en los diferentes horizontes, y calcular la fracción o porcentaje de raíces totales que crecían en cada horizonte, relacionándolas con las propiedades físicas del suelo (Pla, 1996).

3.5. Lluvias y riegos

Se llevó un control de las precipitaciones caídas en cada parcela, instalándose pluviómetros totalizadores en cada una de ellas. Éstos estaban por encima de la línea de plantación y conectados a un depósito enterrado en el suelo, donde se hacían los registros totales, caídos durante cada período. En la parcela con riego por aspersión sirvieron además, para controlar el agua de riego aportada, por diferencia con otro pluviómetro de control sin riego.

En los lotes de riego por goteo los controles se realizaron instalando medidores de agua en las líneas de goteros en las parcelas con Tempranillo.

3.6. Producción de la vid y criterios de calidad del mosto

Se registraron los datos de la vendimia en kg de fruta fresca por planta más próxima a cada tubo de TDR y a las sondas de FDR donde se evaluaron los contenidos de humedad de cada parcela, para estimar su producción por ha. Con una muestra de racimos representativos de cada planta, se determinaron características analíticas de calidad, como los sólidos solubles totales (grados Brix) que fueron medidos usando un refractómetro tipo Abbé (Zeis, mod. B). El pH del mosto con un potenciómetro con electrodo de vidrio, y finalmente la acidez por el método de titulación con una base (NaOH 0,1 M) hasta el punto final de pH 7. Los resultados fueron expresados en g L⁻¹ de ácido de tartárico (Amerine & Oug, 1988) y en todos los casos se usaron 8 repeticiones. Las cosechas se realizaron en los años 2007, 2008 y 2009.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades químicas

4.1.1. pH y conductividad eléctrica

El pH de estos suelos fue ligeramente alcalino, incrementándose en profundidad sin superar valores de 8,26 (Tabla 1). Estos resultados crecientes del pH estuvieron relacionados a las sales de carbonato de calcio presentes en el perfil que aumentaron en profundidad. En la loma (L) desde los 40 cm de profundidad la CE alcanzó valores de salinidad superando los 4 dS m⁻¹ en relación 1:1 de suelo y agua desionizada. En el bajo (B) a los 40 cm de profundidad la CE aumentó con valores de 1,2 dS m⁻¹, aproximándose a situaciones de ligera salinidad, llegando al metro de profundidad a los 2,2 dS m⁻¹.

Tabla 1. Materia orgánica (%) por el método de Walkley & Black (modificado), Conductividad eléctrica (CE) en relación 1:1 de suelo y agua desionizada y pH en relación 1:2,5 de las diferentes profundidades evaluadas, en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.

Sitios	Profundidad (cm)	Materia orgánica (%)	pH (1:2,5)	Conductividad eléctrica CE relación 1:1 (dS m ⁻¹)	Carbonato de calcio equivalente (%)
Loma (L)	A: 0-40	0,74	8,04	1,63	25
	C1: 40-90	0,70	8,05	4,13	29
	C2: 90-130	0,40	8,04	4,36	30
Bajo (B)	A: 0-40	1,34	8,06	0,82	29
	A/C: 40-70	0,39	8,08	1,20	30
	C1: 70-100	0,32	8,20	1,21	32
	C2b: 100-130	0,44	8,26	2,20	31
Plano (P)	A: 0-45	1,71	8,10	0,60	37
	C: 45-93	1,09	8,14	0,84	65
	Ab: 93-133	0,40	8,22	1,10	35

En los primeros 45 cm del suelo del plano (P) se determinó una CE baja, de 0,6 dS m⁻¹ aumentando a la profundidad de 93 cm a 1,1 dS m⁻¹ determinados en relación 1:1. Este suelo presentó un horizonte cálcico de unos 10 a 15 cm de espesor, dentro los primeros 60 a 80 cm de profundidad y variando ligeramente,

según el sector del lote evaluado. A mayor profundidad (más de 93 cm) se halló un suelo enterrado. En el horizonte sobrepuesto de 0 a 45 cm de profundidad, se halló 37% de CaCO₃ equivalente, aumentando a 65% en la siguiente profundidad, para disminuir a 35% de CaCO₃ equivalente, en el horizonte enterrado (Ab).

4.1.2 Materia orgánica (MO)

Los mayores contenidos de MO se hallaron en P (1,7%) y en B (1,3%), en las situaciones con mayor cobertura vegetal. Especialmente en P donde se contaba con riego por aspersión y mayor humedad en las calles y por tanto mayor densidad de vegetación herbácea. En cambio en L con muy baja cobertura vegetal (40%), se encontraron los menores contenidos de materia orgánica (0,74%).

En B se observó un ligero incremento en el contenido de materia orgánica a partir del metro de profundidad, en coincidencia con el horizonte enterrado (Tabla 1).

4.2. Propiedades Físicas

4.2.1 Propiedades mecánicas

4.2.1.1 Distribución del tamaño de partículas

Los suelos en L y B (Tabla 2) presentaron fracciones gruesas mayores a 2 mm, con contenidos superiores al 30%, de los 40 a 100 cm de profundidad (correspondiente al intervalo de la “zona de control de familia”). Dichas piedras en la situación de B llegaron a tener tamaños de 38 a 600 mm, en la profundidad de 40 a 70 cm, llegando a la “categoría” de lajas (150-380 mm) para la fracción gruesa aplanada, y de bloques (250-600 mm) para las redondeadas, irregulares o equiaxiales, según el Soil Survey Staff.

En L de 90 a 130 cm, los contenidos de fracción gruesa subieron a 39,8%, en B a partir de los 40 cm, llegaron a 37% superando el límite exigido por el Soil Taxonomy, siendo incluidos ambos suelos dentro de la familia esquelética franca. No así el suelo del plano, en que a diferencia de los anteriores, sus contenidos en fracción gruesa (> 2 mm) fueron menores del 10% y siempre inferiores al límite requerido para ese nivel categórico (Tabla 2).

Las clases texturales de los suelos evaluados, fueron francas y franco limosas, con 40 a 56% de limo, por lo cual tendrían tendencia a la baja estabilidad de los agregados y a la compactación (Gaucher, 1971). Los contenidos de arcilla

en L y en P fueron mayores en superficie, 18% y 20% respectivamente, disminuyendo hasta un 15% a los 100 cm de profundidad aproximadamente, debido a alteraciones antrópicas (uso de maquinarias pesadas y traslados de suelo para suavizar las pendientes y rellenar las depresiones a fin de poder mecanizar totalmente el manejo del cultivo).

Tabla 2. Clases por tamaño de partículas y material grueso (> 2 mm) en las diferentes profundidades evaluadas en posiciones de loma (vides en zonas elevadas con pendientes), de bajos (vides en zonas de fondo de valle) y planos (vides en zonas en plataformas) de Raimat.

Sitios	Profundidad (cm)	Fracción gruesa	Fracción fina	Distribución del material fino <2 mm			Clase textural (Material fino <2 mm)
		> 2 mm	< 2 mm	Arena	Limo	Arcilla	
		%					
Loma (L)	A: 0-40	8,5	91,5	31	51	18	Franco Limosa
	C1: 40-90	30,8	69,2	37	48	15	Franca
	C2: 90-130	39,8	60,2	39	46	15	Franca
Bajo (B)	A: 0-40	17,4	82,6	31	51	18	Franco Limosa
	A/C: 40-70	37,9	62,1	29	53	18	Franco Limosa
	C1: 70-100	13	87	24	56	20	Franco Limosa
	C2: 100-130	17,6	82,4	24	56	20	Franco Limosa
Plano (P)	A: 0-45	9,3	90,7	32	48	20	Franca
	C: 45-93	9,6	90,4	35	46	19	Franca
	Ab: 93-133	1,1	99,9	45	40	15	Franca

El incremento de arcilla que se observó en el sitio B a más de 70 cm, no se debe a un proceso de argiluvación, ni a una evolución pedogenética del perfil, ya que no se hallaron presencia de cutanes en la superficie de los agregados. Más bien podrían relacionarse consecuencias de movimientos de suelos debidas a las tareas de nivelación antes mencionadas con maquinaria pesada, como puede visualizarse en la modificación resultante del paisaje del lugar (Fig. 10). Cabe acotar, que podría ser justificable la inclusión de estos suelos dentro de los Antrosoles (W.R.B., 2006), por la significativa participación del factor “antrópico” en el estado actual en que se encuentran, mezclando horizontes y modificando los perfiles de los suelos originales, excluyéndose de dicho agrupamiento, al no reunir los requisitos de un epipedón antrópico, úmbrico, hórtico o térrico exigidos por las normas actuales propuestas en dicho sistema de clasificación de suelos.



Fig. 10. Vista del paisaje luego de modificaciones efectuadas por movimientos de suelo con maquinaria pesada.

4.2.1.2. Densidad aparente

La densidad aparente determinada en campo, por el método de la excavación, presentó resultados más elevados que el método del cilindro en laboratorio, donde se usaron muestras inalteradas en cilindros de 100 cm^3 (Tabla 3). En L hubo una mayor diferencia entre ambos métodos en las muestras de profundidad, donde de 40-90 cm se obtuvo $1,79\text{ Mg m}^{-3}$ contra $1,5\text{ Mg m}^{-3}$ y similar situación en la siguiente profundidad ($1,8$ contra $1,4\text{ Mg m}^{-3}$ respectivamente).

En B se presentó una situación similar de 40 a 70 cm, con mayor diferencia entre los métodos en comparación para la excavación con $1,82\text{ Mg m}^{-3}$ donde se halló un 37,9% de fragmentos gruesos (Tabla 2), contra $1,5\text{ Mg m}^{-3}$ para los cilindros (Tabla 3). Al usar los cilindros pequeños, únicamente se incluye fracción gruesa menor a 5 cm sin ingresan tanta cantidad como al usar el método de excavación. Las diferencias entre ambas metodologías disminuyeron en horizontes de menor contenido de fracción gruesa, con valores de alrededor de $1,5\text{ Mg m}^{-3}$ para el método de excavación y de $1,3$ a $1,4\text{ Mg m}^{-3}$ con cilindros.

En P de 0 a 45 cm se obtuvo por excavación $1,84\text{ Mg m}^{-3}$ en muestras que tenían 10% de material grueso, y con cilindros $1,3\text{ g cm}^{-3}$. Dichas diferencias entre métodos fueron disminuyendo a medida que bajaron en profundidad los contenidos de fragmentos gruesos. Así, de 93 a 133 cm, y con solo 1% de material grueso, se obtuvo menor discrepancia: $1,52\text{ Mg m}^{-3}$ para el método de excavación y $1,4\text{ Mg m}^{-3}$ para el de cilindro.

Este comportamiento en el método de la excavación sería atribuible a que se muestreaban grandes volúmenes de suelo, mayores de 6.000 cm^3 , donde era mucho más probable que se obtuvieran materiales gruesos de diferentes tamaños (por la cantidad de muestra extraída). Por la cantidad de muestra empleada, fue más representativa que el método de cilindros de tamaño mucho más reducido

(100 cm³). El método de la excavación, tiene la ventaja de decidir con una mayor flexibilidad el volumen de suelo a tomar, de acuerdo al tamaño y cantidad de piedras que tenga el suelo en consideración.

Tabla 3. Densidad aparente en laboratorio determinado por el método de los cilindros de 100 cm³ y por el método de la excavación en campo, en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.

Sitios	Densidad aparente	
	Excavación	Cilindros (100 cm ³)
	Mg m ⁻³	
Loma (0-40)	1,52	1,4
Loma (40-90)	1,79	1,5
Loma (90 – 130)	1,8	1,4
Bajo (0-40)	1,53	1,3
Bajo (40-70)	1,82	1,5
Bajo (70-100)	1,57	1,4
Bajo (100-130)	1,83	1,4
Plano (0-45)	1,84	1,3
Plano (45-93)	1,63	1,3
Plano (93-133)	1,52	1,4

A medida que se encontraron contenidos de piedra de mayor tamaño en los horizontes más profundos, tomar muestras con cilindros que incluyeran el material grueso del suelo fue imposible, con ello, el valor de densidad aparente se diferenció más entre ambas situaciones. Cabe resaltar que la toma de muestras inalteradas con cilindros de 100 cm³, solo pudo realizarse en profundidades donde la fracción gruesa fue de menor dimensión, permitiendo una tarea de muestreo sin obstaculizar la introducción de los cilindros en el suelo.

Fonseca (2006) en el Priorat (NE de España) halló que el método de densidad aparente tomando muestras de suelo inalteradas con cilindros, no fue representativo de las condiciones físicas en suelos pedregosos con contenidos superiores al 68% de material grueso, subestimándose los resultados respecto al método de excavación. Otros estudios han hallado menores valores de densidad aparente con el método del cilindro (Andraski, 1991; Muller & Hamilton, 1992). Igualmente Flint & Childs, (1984) hallaron con el método de los cilindros de diámetros menores a 4,8 cm, en suelos pedregosos, una subestimación de los resultados de densidad aparente, inferiores a los reales pues no incluían las piedras más grandes. Page-Dumroese et al (1999) en suelos pedregosos con fragmentos gruesos de 0,5 a 15 cm distribuidos uniformemente en el perfil, hallaron en

cambio, valores superiores de densidad aparente medidos con el método del cilindro respecto al de excavación, debido a una compactación de las muestras al ser introducidas con golpes de la pesa y resultados inferiores por llenado incompleto del cilindro o pérdidas de suelo durante la manipulación.

A pesar de que algunos autores (Blake & Hartge, 1986) expresaron que el método de los cilindros es sencillo, como se expuso previamente, son varios los cuidados a tener en cuenta para su uso, por ello cuando lo único que interesa determinar es el valor de densidad aparente, podría llegar a no justificarse tomar cilindros de suelo no alterados por su laboriosidad y por las precauciones especiales requeridas en su metodología. Los mayores inconvenientes se presentan en suelos labrados, agrietados o de textura muy suelta, donde resulta difícil extraer los cilindros sin alterar el suelo (Pla, 1983). Por dichos motivos y por los resultados hallados en este trabajo, el método de la excavación sería un dato más confiable para suelos con elevados contenidos de materiales gruesos.

4.2.1.3. Resistencia a la penetración

Al realizar las calicatas en los distintos sitios, se pudo evaluar la resistencia a la penetración (RP) de los horizontes que se hallaban a una profundidad mayor de 70 cm que es la que permitida por el penetrómetro de impacto. La RP en la calicata realizada en la posición de L en los primeros 40 cm fue 0,65 MPa (n: 5 en todos los sitios), incrementándose de forma progresiva en profundidad, hasta un máximo de 1,2 MPa y llegando a 1,1 MPa en profundidad. En L aumentó la RP con la disminución del contenido de humedad (Fig. 11), presentando un comportamiento similar la DA y la RP. Los valores de esta última se encontraron dentro de intervalos normales, para permitir el crecimiento y la exploración del suelo por las raíces de la vid, como fue citado por Hanson et al. (1999), quienes hallaron una fuerte correlación entre la RP y el crecimiento de raíces, como uno de los principales factores para el crecimiento vegetal. Los mayores desvíos estándares (0,25) y coeficientes de variación (60,3%), correspondieron a los últimos horizontes con 31-39% de fragmentos gruesos.

En B la resistencia del suelo hasta los 40 cm de profundidad, fue de 0,83 a 0,88 MPa aumentando a 0,95 MPa, hasta los 70 cm aproximadamente, comprobándose un comportamiento similar de la DA en estos horizontes. De 70 a 100 cm la RP alcanzó un máximo de 1,6 MPa a los 80 cm y bajó a 1,1 MPa en profundidad, conforme se redujo la cantidad de fragmentos gruesos en dicho horizonte (Fig. 11). El incremento y cambio de RP de 0,95 a 1,6 MPa en pocos cm, podría ser más restrictivo para las raíces que el valor máximo absoluto alcanzado, especialmente ante bajos contenidos de humedad del suelo, reflejado en el recuento de raíces en dicha calicata. Greacen & Sands (1980) hallaron que ante valores mayores de 1,8 MPa empezó a disminuir el crecimiento de raíces.

Aunque varios autores citaron el valor de 2,5 MPa como límite de restricción para dicho crecimiento (Pabin et al., 1998; Hamza & Anderson, 2005). Stepniewski y colaboradores (1994) informaron que únicamente un valor de RP, no define un límite crítico para el crecimiento de raíces, también dependen de otros factores como el espacio aéreo, condiciones de baja humedad y alta demanda de evapotranspiración.

Los coeficientes de variación en B fueron elevados (47-53%), pero acordes con Hillel (1998) quien informó que la RP posee elevados coeficientes de variación.

En el sitio B, de 70 a 100 cm, al aumentar la RP a 1,6 MPa, bajó la densidad aparente (de 1,8 a 1,6 g cm⁻³) debido a la disminución de la fracción gruesa, a pesar que la RP generalmente se incrementa con el aumento de la compactación o de la densidad aparente y disminuye con el aumento de contenido de agua del suelo (Ayers & Perumpral, 1982; Vepraskas, 1984; Lowery & Schuler, 1994). Sojka et al., (2001) hallaron en cambio, en un Haplocalcid que la RP varió independientemente de la DA, sin presentar una relación directa. La relación entre ambas variables ha originado resultados contrastantes, por lo cual, Voorhees (1983), Sojka et al. (2001) y Bruand et al. (2004) señalaron que cada variable presentó una sensibilidad diferente para medir la compactación del suelo y por tanto no siempre se halló buena correlación entre ambas propiedades.

En P se presentaron los menores valores de RP de los tres sitios y al aumentar la humedad con la profundidad, disminuyó la RP y la DA (Fig. 11 y Tabla 3). Los coeficientes de variación de la RP fueron más bajos (17-30%) debido al menor contenido de fracción gruesa.

Como el contenido de humedad del suelo incide en la interpretación de los resultados de RP, se presentan ambos datos para su mejor comprensión. En todas las posiciones evaluadas se comprobó una relación lineal e inversa entre ambas propiedades (Fig. 12), también demostrada por otros autores (Topp et al., 2003; Bruand, et al., 2004). Los contenidos de agua hallados en las determinaciones hasta los 70 cm de profundidad, variaron de 0,13 a 0,40 en fracción volumétrica, representando contenidos de humedad que pueden hallarse durante el desarrollo del cultivo de vid, con una RP de 0,12 a 1,8 MPa. En L, al considerar la totalidad de las determinaciones en cada sitio, se halló que ante un elevado número de observaciones (n: 80), y un promedio de 3 lecturas realizadas, el valor de r² fue de 0,68 (Fig. 12) explicándose el 68% de la variación de la RP por el contenido de humedad del suelo.

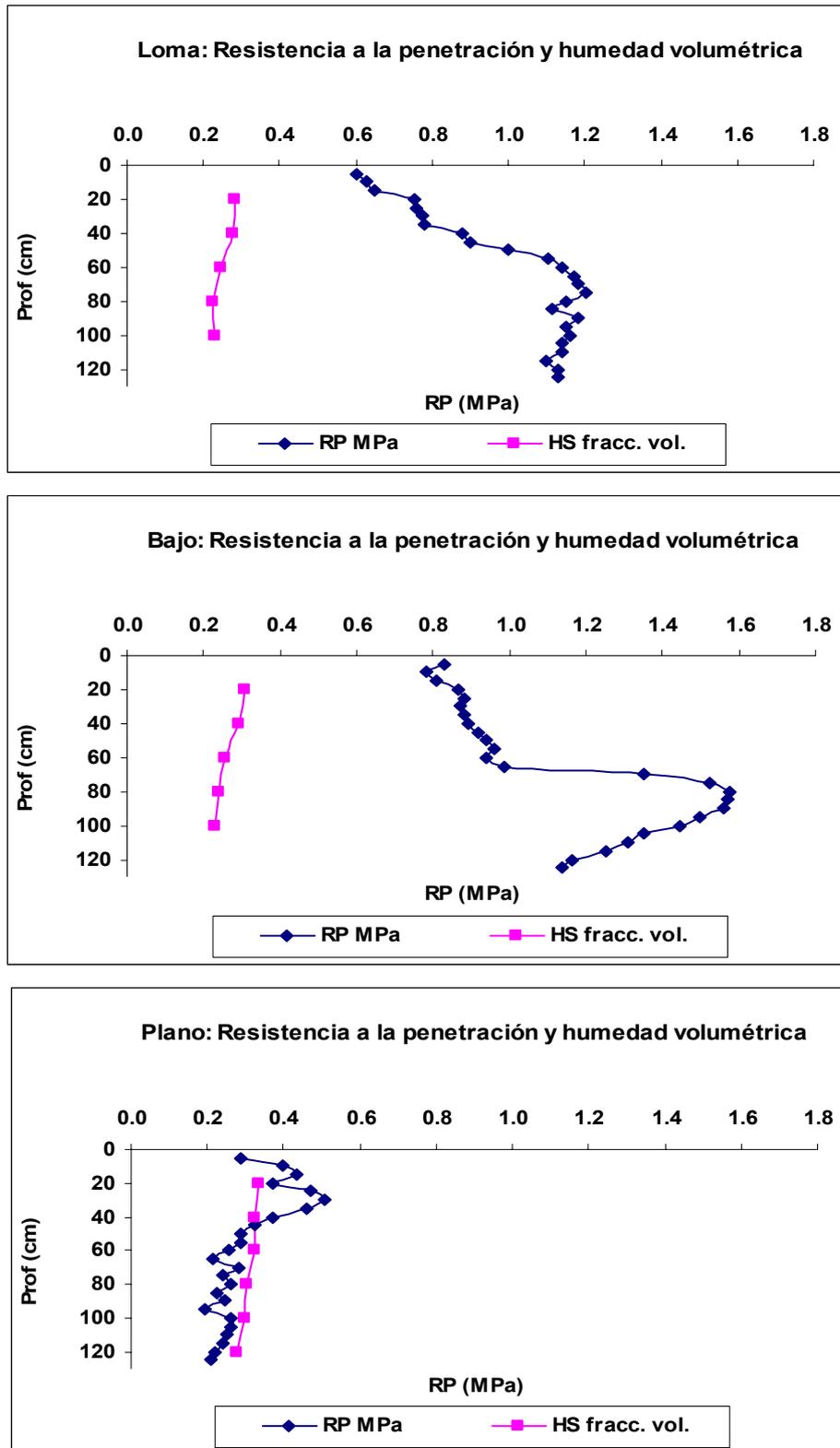


Fig. 11. Variación de la resistencia a la penetración (MPa) y de la humedad del suelo expresada en fracción volumétrica ($\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) con la profundidad del sitio de la loma (L), del bajo (B), y del plano (P) de Raimat, de la campaña 2006-2007.

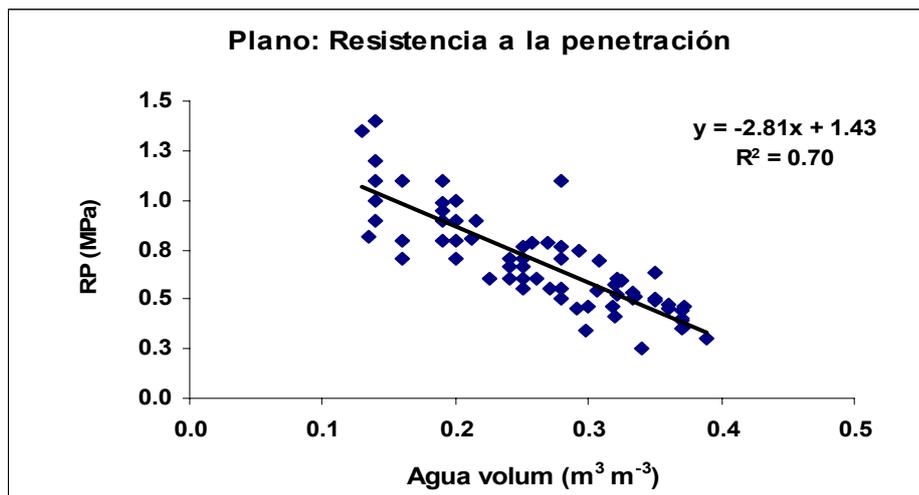
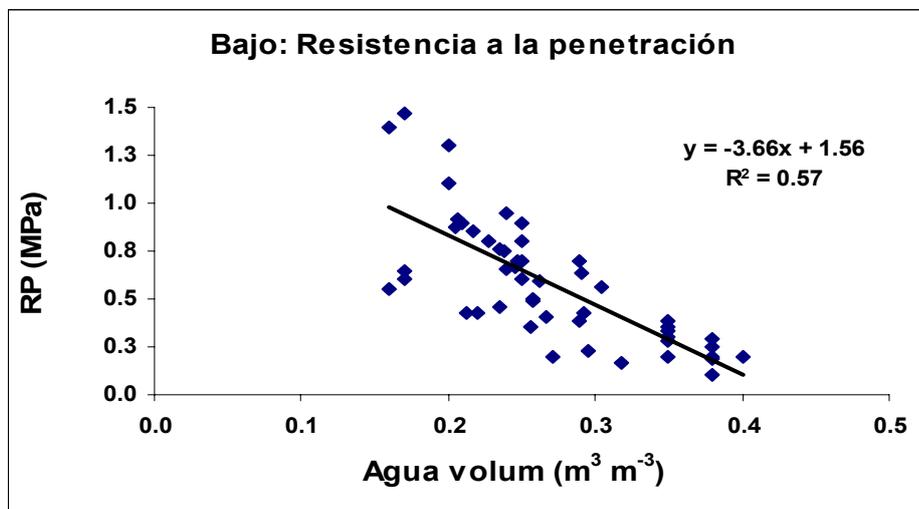
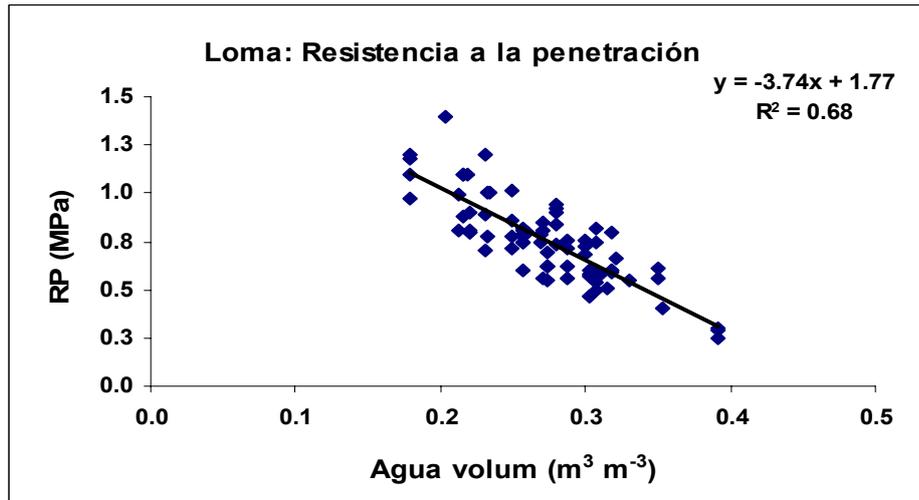


Fig. 12. Relación entre la resistencia a la penetración y el contenido de agua del suelo, en fracción volumétrica, de las determinaciones realizadas en la Loma, el Bajo y el Plano de Raimat.

En B, al evaluar la relación entre la RP y humedad del suelo, hubo un comportamiento similar con una relación fue lineal e inversa, explicándose el 57% de la variación de la RP con el contenido de humedad (Fig. 12). La disminución del coeficiente de determinación de B con respecto a L probablemente podría deberse, a que a partir de los 40 a 50 cm de profundidad, hubo un 37% de fragmentos gruesos de diferentes tamaños, que interceptaron el recorrido del penetrómetro.

En la Fig. 12 se halló para P una relación lineal inversa de la RP con respecto a la humedad del suelo y un $r^2 = 0,70$ con 64 pares de datos. Esta mejor explicación de la variación de la RP con la variación del contenido de humedad podría deberse a menores contenidos de fragmentos gruesos en dicho sitio, lo que generó menores obstáculos al recorrido del penetrómetro en el perfil del suelo, resultando valores altos de RP debidos a una menor humedad y una mayor consistencia del suelo.

4.3 Desarrollo de raíces

El enraizamiento de los cultivos afecta la productividad dependiendo de una serie de factores, como la estructura del suelo (porosidad, consistencia) y la humedad. Por ello, la evaluación de su desarrollo es indispensable, para deducir la influencia de las diferentes propiedades físicas sobre el mismo y para comprender sus diferentes interacciones. Este trabajo requiere menor tiempo y equipamiento proporcionando una información complementaria a las evaluaciones físicas del suelo.

En L y en B habían muy pocas raíces en las entrelíneas, debido a menores contenidos de agua, ya que el riego por goteo localizado, solo humedece a las líneas del cultivo y a la zona de tránsito por escorrentía superficial. Las raíces también ocuparon las zonas húmedas de las huellas o “pisadas” del tractor en las que se formaban esos surcos de escorrentía.

En las tres situaciones, las raíces fueron aumentando en número hasta alcanzar un pico a los 20 cm para L y P, y a los 30 cm en B, para ir en disminución con la profundidad (Fig. 13).

El suelo de L presentó un buen desarrollo radical, a pesar del creciente contenido de piedras (31%) a partir de los 40 cm de profundidad (Fig. 13), ya que como expresara Gladstone (1992) la vid posee una buena adaptación a suelos pedregosos. El número de raíces disminuyó casi a la mitad: de 425 raíces a los 20

cm hasta 200 raíces a los 50 cm de profundidad, en coincidencia con el aumento de la CE en profundidad (valores mayores de $4,16 \text{ dS m}^{-1}$).

Los valores de resistencia a la penetración en la loma fueron bajos, y fluctuaron en febrero con un intervalo de 0,6 a 1,2 MPa para los primeros 70 cm de profundidad (Fig. 11), continuando con dichos valores a más de 1 m de profundidad, observándose un buen crecimiento de raíces. Hussain y col. (1999) hallaron que la resistencia a la penetración, estuvo inversamente correlacionada con el desarrollo radical y suelos con elevadas RP disminuyeron su calidad.

Con un buen manejo de riego se evitaría llegar a bajos contenidos de humedad del suelo y con ello simultáneamente se obviaría el aumento de la impedancia mecánica del éste, lo que fue citado por Goss (1977) como una de las causas que más afectan a la elongación de las raíces.

En P se halló la menor cantidad de raíces de las tres posiciones geomorfológicas. Luego de llegar a un máximo de 250 raíces a los 20 cm de profundidad, equivalentes un 23% del total, presentaron posteriormente un brusco descenso a 60 raíces contabilizadas en los 50 a 70 cm de profundidad, un 6% del total en el horizonte cálcico (Fig. 13). Las raíces que superaron ese sector se incrementaron a 112 a partir de los 90 cm de profundidad. Paralelamente a ello, los contenidos de CaCO_3 equivalentes, fueron de 35% desde la superficie hasta los 42 cm y desde allí, hasta los 70 cm (en el horizonte cálcico) prácticamente se duplicaron a un 65% de CaCO_3 . Elevados contenidos de CaCO_3 afectan la asimilación del hierro produciendo deficiencias por insolubilización del mismo, por aumento del pH y precipitación en la solución del suelo. Por último, de los 70 a 100 cm el CaCO_3 equivalente disminuyó a 25%. Porta et al. (1986) citaron que al hallarse contenidos elevados de CaCO_3 (superiores al 40%) deben usarse portainjertos especialmente adaptados, a fin de evitar condiciones nutricionalmente adversas para la vid.

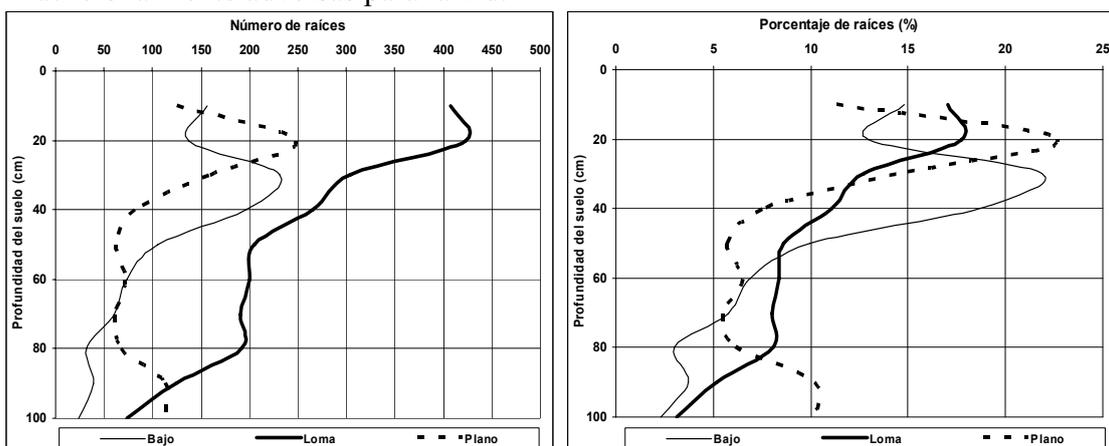


Fig. 13. Número de raíces y Porcentaje de raíces de vid hasta un metro de profundidad en las posiciones de loma (vides en zonas elevadas con pendientes), de bajos (vides en zonas de fondo de valle) y en planos (vides en zonas de plataformas) de Raimat.

En B se tuvo una situación intermedia, donde la gran disminución de raíces coincidió con un horizonte de 40 a 70 cm, que presentó un 38% de piedras, y un ligero aumento de la CE en los horizontes subyacentes ($1,2 \text{ dS m}^{-1}$). En dicha profundidad el número de raíces disminuyó prácticamente a la mitad, pasando de 197 raíces a 105 raíces a los 50 cm (Fig. 13). La razón de ello podría deberse a la baja conductividad hidráulica de los 70 a 130 cm ($0,8 \text{ mm h}^{-1}$) que limitaría la profundidad de enraizamiento al verse afectado ante excesos de agua. Sumado a esto, la densidad aparente subió de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ (de 0-40 cm) a $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ (de 40-70 cm). Chaudhary et al. (1991) e Ishaq et al. (2001) citaron que la compactación del subsuelo fue otro factor desfavorable para la penetración vertical de las raíces y su proliferación. Cuando el agua alcanza la zona radical, si se supera la capacidad de almacenaje, se llegarían a condiciones de saturación prolongada resultando una condición adversa, como fue mencionado por Gladstone (1992).

Concluyendo, la profundidad efectiva de raíces se consideró hasta donde éstas alcanzaron el 90% de su total, determinando para el B: 70 cm para la L: 80 cm y para el P: 90 cm. Las condiciones que resultaron adversas para el crecimiento y presencia de raíces en estos casos fueron: la baja conductividad hidráulica, la densificación de suelo y la salinidad.

4.4. Retención de humedad

El contenido de agua en condiciones de saturación en campo, de las muestras tomadas con barrena, con respecto a las del laboratorio, para la situación de L, fue de $0,27 \text{ g}$ de agua g^{-1} de suelo (Tabla 4) y de $0,30 \text{ g g}^{-1}$ para el promedio de cinco muestras inalteradas de los cilindros de 100 cm^3 en el laboratorio. En la siguiente profundidad se tuvo igual tendencia con menores contenidos en campo ($0,21 \text{ g g}^{-1}$) que en laboratorio ($0,28 \text{ g g}^{-1}$), y similares a más de 90 cm de profundidad.

Los valores en B, para ambos casos, siguieron el mismo comportamiento, con menores contenidos de humedad para el método de campo ($0,27 \text{ g g}^{-1}$) y mayores para el método de laboratorio ($0,35 \text{ g g}^{-1}$); manteniendo dicha tendencia en profundidad.

Los desvíos estándares de esta variable de los tres sitios fueron bajos y fluctuaron en un intervalo de 0,01 a 0,05 para las muestras de todas las profundidades.

De igual modo, en P el comportamiento fue similar con $0,28 \text{ g g}^{-1}$ para campo y $0,34 \text{ g g}^{-1}$ para laboratorio (Tabla 4). En P, la mayor diferencia entre ambos métodos se halló en el horizonte que presentó alto contenido de concreciones de CaCO_3 (45-93 cm), las cuales presentarían una menor porosidad

total y se comportarían como fracción mayor de 2 mm. Estas diferencias entre métodos serían atribuibles a que, al extraer las muestras con barrena de mayores dimensiones que los cilindros, se alteraba y mezclaba más el suelo, ingresando comparativamente más fracción gruesa. En cambio al extraer los cilindros inalterados en el campo, se incluía solo el material grueso menor a 5 cm de diámetro y mayormente material fino, resultando así una mayor porosidad total y mayor contenido de agua en condiciones saturadas. La toma de muestras solo se pudo realizar necesariamente, en lugares donde tendrían menor contenido de material >2 mm, ya que los fragmentos gruesos cercanos a ese diámetro (5 cm) impedían clavar los cilindros al suelo.

Los valores del contenido de agua en suelos con material grueso mayor de 2 mm fueron inferiores, debido a que éstos pueden ocupar un considerable volumen de la muestra de suelo y contribuir apreciablemente a la masa del mismo, disminuyendo el espacio poroso total y la capacidad de retener agua (Hanson & Blevins, 1979; Gardner, 1986).

Tabla 4. Contenido de agua determinada en condiciones de saturación en el campo de muestras extraídas con barrena, en laboratorio en cilindros de 100 cm³, de capacidad de campo y agua retenida a 0,01 MPa en mesa de tensión en muestras inalteradas en cilindros de 100 cm³ en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.

Sitios	Saturación		Capacidad de campo ⁽³⁾	Agua retenida a 0,01 MPa en mesa de tensión ⁽⁴⁾
	Campo ⁽¹⁾	Laborat. ⁽²⁾		
	W (g ¹ g ⁻¹)			
Loma (0-40)	0,27	0,30	0,22	0,22
Loma (40-90)	0,21	0,28	0,20	0,21
Loma (90-130)	0,27	0,28	0,21	0,21
Bajo (0-40)	0,27	0,35	0,23	0,26
Bajo (40-70)	0,23	0,27	0,20	0,20
Bajo (70-100)	0,24	0,30	0,20	0,21
Bajo (100-130)	0,23	0,30	0,19	0,22
Plano (0-45)	0,28	0,34	0,22	0,22
Plano (45-93)	0,22	0,35	0,20	0,22
Plano (93-133)	0,23	0,30	0,18	0,22

W: fracción gravimétrica (g g⁻¹)

⁽¹⁾ medidas en muestras extraídas con barrena. ⁽²⁾ en cilindros de 100 cm³. ⁽³⁾ medidas en campo. ⁽⁴⁾ medidas en cilindros de 100 cm³ en mesa de tensión.

4.4.1 Capacidad de campo

Fue definida por la Soil Sci. Soc. Am., (1984) como la cantidad de agua retenida por el suelo 2 o 3 días después de haber sido saturado y cuando el drenaje interno del perfil es prácticamente despreciable. Gardner (1960) consideró que el suelo se hallaba en capacidad de campo cuando la conductividad hidráulica era tan pequeña, que la redistribución del agua en el perfil resultaba insignificante (debido al gradiente de carga hidráulica). En algunos suelos de textura gruesa esa reducción en la conductividad hidráulica puede ocurrir al cabo de 6 a 24 horas (Cassel & Sweeney, 1974).

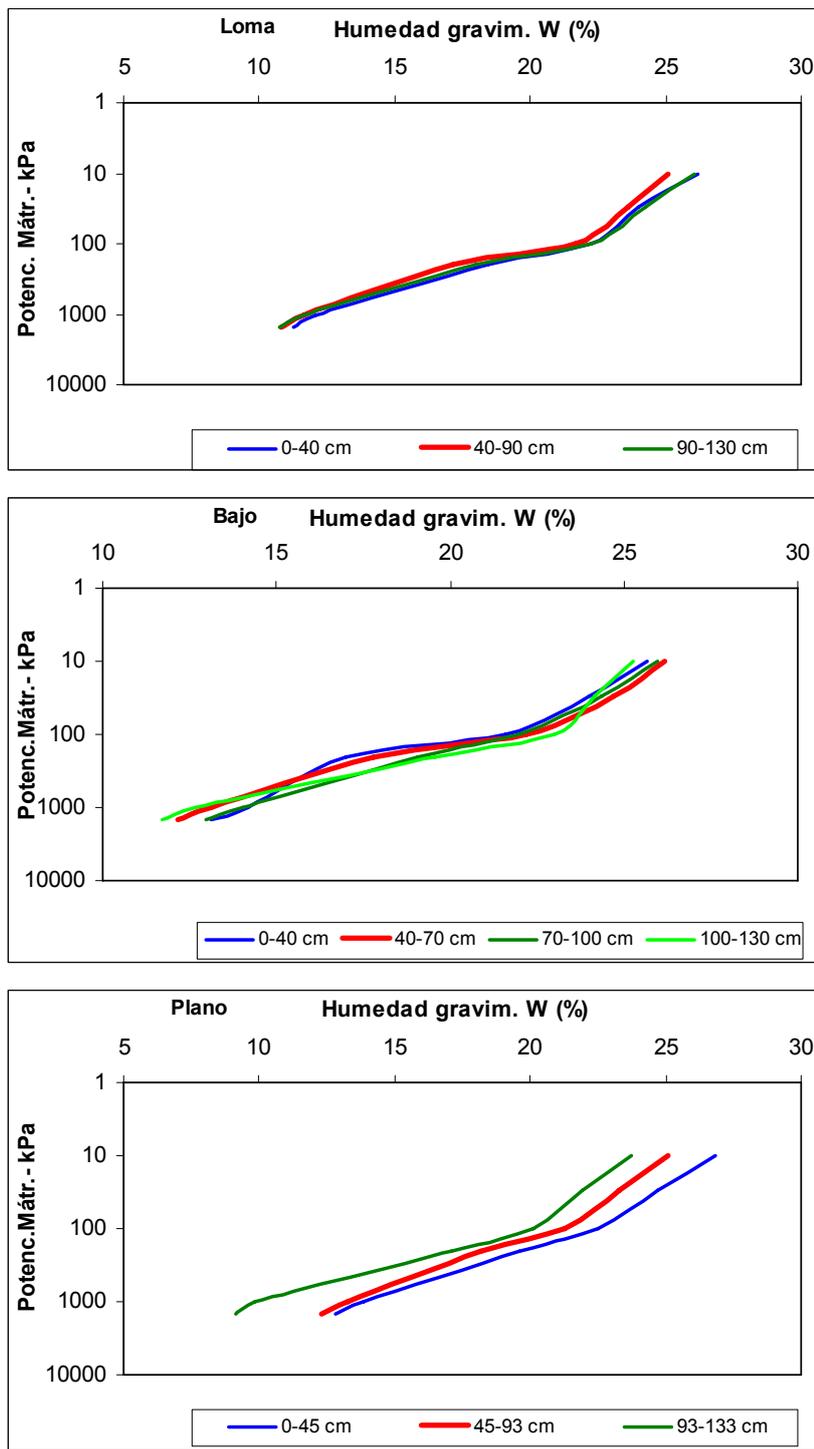
La capacidad de campo no se corresponde con una tensión definida de agua mencionándose para suelos bien drenados valores de retención de humedad a capacidad de campo de 0,03 MPa, y para suelos con drenaje restringido de 0,01 MPa (Pla, 1983), existiendo opiniones diferentes sobre que valor adoptar.

Los valores obtenidos de capacidad de campo no presentaron diferencias entre los sitios, y fueron disminuyendo con la profundidad del perfil a medida que bajaba el contenido de arcilla. En superficie, los valores variaron entre 0,22 a 0,23 (g g^{-1}) (Tabla 4). Este parámetro presentó poca variación y los desvíos estándares fueron de 0,01 a 0,03 para muestras superficiales y de 0,01 a 0,04 para el resto de las profundidades.

El agua en condiciones de saturación en laboratorio fue mayor que la retenida en placas de presión a 0,01 MPa. Los resultados obtenidos en los cilindros de 100 cm^3 con la mesa de tensión, superaron a la capacidad de campo en algunos horizontes subsuperficiales de L, de B, de P y en el superficial de B con diferencias significativas ($t: 2,94; P < 0,0165$). Debido a que en condiciones naturales se mantienen las características estructurales y de porosidad real del suelo, la mejor alternativa para medir capacidad de campo es in situ, en concordancia con lo expresado por Cassel & Nielsen, (1986).

4.4.2 Curvas de retención de humedad

En la Fig. 14 se encuentran representados los valores de retención de humedad en la fracción fina del suelo, a diferentes potenciales mátricos en las cámaras de Richards. La determinación de la curva de retención hídrica es factible realizar usando muestras tamizadas por malla de 2 mm (Pla, 1983). Cresswell et al. (2008) hallaron buenos resultados usando muestras disturbadas con platos de presión, por un mejor el contacto de las placas de cerámica con las películas de agua y un buen drenaje de las muestras de suelo.



W: Humedad gravimétrica; MPa: - Potencial mátrico (presión aplicada)

Fig. 14. Curvas de retención de hídrica de la fracción fina del suelo ($\leq 2\text{ mm}$) de los viñedos en las posiciones de Loma, Bajo y Plano de cada espesor de suelo muestreado en cada calicata de Raimat (Catalunya).

En las tres situaciones el agua retenida a $-0,01$ MPa en las placas de presión fueron superiores a 25% (g agua 100 g^{-1} suelo) y el agua retenida a $-0,03$ MPa, varió entre el 22 y los 25,7% (g agua 100 g^{-1} suelo). Las diferencias entre $-0,01$ MPa y $-0,03$ MPa fueron inferiores al 5% (g agua 100 g^{-1} suelo), indicando generalmente una excesiva humedad y una reducida aireación, aún cuando no hayan otras limitaciones en el drenaje interno del perfil de suelo, como fue citado por Pla (1983). Las posibilidades de dichas restricciones disminuyeron debido a que en el presente ensayo se podían controlar los aportes de agua por riego.

Las curvas de retención hídrica presentaron un comportamiento similar entre sí, guardando una mayor relación con las características texturales (Fig. 14). Entre los suelos de los diferentes sitios y entre muestras por profundidades, no se presentaron muchas diferencias. En la posición de L y de B las curvas de las tres profundidades presentaron resultados similares como puede verse en la Fig. 14.

En el P la curva de retención hídrica de 0-40 cm con mayor contenido de arcilla (20%) y de materia orgánica (1,71%) influyeron en su porosidad presentando los mayores contenidos de agua. La menor retención hídrica correspondió a la curva de 93-133 cm, con menor contenido de arcilla (15%) y materia orgánica (0,4%) y elevados valores de retención de humedad a 0,01 MPa (Tablas 1 y 2, y Fig. 14).

4.4.3 Punto de marchitez permanente

El punto de marchitez permanente ha sido definido como el contenido de agua del suelo, cuando una planta indicadora creciendo en condiciones de marchitez, no se recupera al ser llevada en una cámara húmeda (Soil Sci. Soc. Am., 1984), estableciéndose el potencial mátrico del agua del suelo aproximadamente en $-1,5$ MPa. Las determinaciones a presión superior a dicho valor sirven principalmente para darnos puntos intermedios en la curva de retención hídrica y es ampliamente utilizado como una apreciación del punto de marchitez permanente. Esta constante de humedad puede variar según los suelos, climas y plantas involucradas. Una variación en la apreciación del potencial, no se manifiestan en el contenido de humedad ya que hay pocos cambios en esa zona de la curva.

Algunos autores (Campbell, 1988; Gee et al., 2002; Cresswell et al., 2008) usaron métodos como el psicrómetro, basados en mediciones de humedad relativa en una cámara cerrada, como métodos de referencia para evaluar el potencial de agua del suelo. Leong et al. (2003) hallaron que la mayor limitación de este método es la menor certeza en valores de potenciales agua poco negativos.

Al comparar el método de las placas de Richards con el higrómetro, el agua retenida a -1,5 MPa con las placas, fluctuó entre 12,8 y 18,3% ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), con los valores más elevados en los horizontes superficiales de mayor contenido de arcilla y con el WP4-T (Tabla 5) variaron de 16,9 hasta 29,2%. En los tres primeros horizontes de B los resultados de punto de marchitez permanente fueron similares. La mayor diferencia entre ambos métodos fue la obtenida en los últimos horizontes de L de 40 hasta 130 cm con 15,1% ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) con las placas Richards y 29,2% ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) con el WP4-T (Tabla 5).

El agua se halla ligada al suelo, principalmente a través de fuerzas matriciales, aunque en suelos afectados por sales puede existir un significativo componente osmótico. Las mayores discrepancias halladas en los dos últimos horizontes del perfil de L y el último de B se debieron al incremento de la conductividad eléctrica del suelo de dichos horizontes que varió de 4 hasta 4,36 dS m^{-1} , en relación 1:1 para L y 2,2 dS m^{-1} para B (Tabla 1) causando el aumento del contenido de agua. El WP4-T mide el efecto de dos de los componentes del potencial agua: el potencial mátrico y el potencial osmótico, en cambio los platos de presión solo miden el efecto del potencial mátrico y explicaría el mayor contenido hídrico en los horizontes en profundidad. Esto demuestra la importancia y utilidad del higrómetro para estas determinaciones donde los suelos se encuentran dentro de un intervalo salino.

Bittelli y Flury (2009) usaron el WP4T como método de referencia para comparaciones con la técnica del plato de presión y hallaron un error substancial con los platos de cerámica a potenciales menores de -0,1 MPa (-10 m H_2O). Los errores en la determinación de la curva de retención hídrica pueden afectar las simulaciones de flujo de agua y transportes de solutos, como las estimaciones de requerimientos de agua disponible para las plantas.

Al comparar los valores de agua aprovechable medidos solamente con los platos de presión calculados con el contenido de agua retenida a 0,03_{pp} y el PMP_{pp} se obtuvo una sobreestimación de la capacidad de retención del agua del suelo como puede verse en la Tabla 5 (t: 2,84; $P < 0,02$). Ello se debió a las diferencias encontradas con el método del higrómetro, ya que las diferencias entre CC y el agua retenida a 0,03 MPa no fueron significativas.

Las diferencias usando las placas de presión o el WP4T pueden ser de importancia, cuando se emplea el valor del agua aprovechable como una entrada en estudios de balance hídrico y modelización, por lo que sería conveniente evaluaciones posteriores en suelos de diferentes clases texturales y contenidos de sales, a efectos de dilucidar y explicar las razones de estos comportamientos.

Si se emplearan únicamente las placas de Richards para determinar el agua aprovechable, podríamos arribar a errores como los señalados anteriormente. A fin evitarlos, se debería tener cuidado al considerar suelos con cierto grado de halomorfismo en los que el potencial osmótico cobra relevancia y al considerar

los valores de referencia de -0,03 MPa usándolos como retención a capacidad de campo. Sería recomendable para evaluar los contenidos de agua en capacidad de campo y en saturación usar el método de campo y para determinar el punto de marchitez permanente usar el método del higrómetro (Ferrer et al., 2008).

Tabla 5. Determinaciones físicas en diferentes profundidades evaluadas, y en posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat. Contenido de humedad en condiciones de saturación y de capacidad de campo, porcentaje de agua retenida en punto de marchitez permanente por el método de Richards y por el método de WP4-T (aproximadamente a -1,5 MPa) y agua aprovechable.

Sitios	Prof. (cm)	Determinaciones en campo.		Determinaciones en laboratorio			Agua aprovechable	
		Saturac	Capac. de campo (CC)	Platos de presión ¹		Higrómetro WP4-T	AA _{pp} ²	AA _{comb} ³
				0,03 _(pp)	PMP _(pp)			
Θ (m ³ m ³)								
Loma (L)	0-40	41,0	33,3	33,6	15,7	17,2	17,9	16,1
	40-90	37,7	35,4	35,4	16,2	26,5	19,2	9,0
	90-130	49,1	37,3	33,9	15,1	29,2	18,8	8,1
Bajo (B)	0-40	41,6	35,6	31,2	17,1	17,3	14,1	18,4
	40-70	42,6	35,9	37,1	18,3	19,8	18,8	16,0
	70-100	38,0	31,9	34,1	18,2	17,3	15,9	14,6
	100-130	41,9	35,0	33,8	16,4	20,1	17,4	14,8
Plano (P)	0-45	50,8	40,7	30,3	16,0	20,6	14,3	20,1
	45-93	36,5	33,3	33,4	16,7	18,9	16,8	14,4
	93-133	35,0	26,7	30,7	12,8	16,9	17,9	9,8

Θ (%): humedad volumétrica (m³ m⁻³).

(¹) Valores obtenidos con platos de presión a -0,03 MPa y a -1,5 MPa (Punto de marchitez permanente). (²) Agua disponible (AA_{pp}) calculada de los datos hallados con los platos de presión (0,03_{pp}-PMP_{pp}). (³) Agua disponible (AA_{comb}) calculada de los datos hallados en el campo (CC) y de los obtenidos con el higrómetro de espejo WP4-T.

Cuando se requiera el PMP para estudios del agua del suelo y diseños de riego, en suelos con salinidad, sería recomendable evaluar la conductividad eléctrica a efectos de evitar una subestimación de los resultados obtenidos con las placas Richards.

En el uso de las placas Richards para determinar presiones de -1,5 MPa, podemos mencionar la dificultad en lograr un buen contacto entre la muestra de suelo y la placa de cerámica y la gran cantidad de tiempo necesario para lograr su equilibrio. Klute (1986) para lograr el equilibrio en muestras de suelo de 2 a 3 cm de espesor, necesitó un mínimo de 72 horas. Cresswell et al (2008) informaron que las principales causas de errores en las determinaciones con las placas de

platos de presión es la pérdida de contacto hidráulico de la muestra con el plato debida a la contracción del suelo al perder humedad y la dispersión del mismo provocando el bloqueo de los poros en el plato de cerámica. Otros errores que se pueden presentar con placas de presión a -1,5 MPa, podría deberse a la imposibilidad de alcanzar dicho equilibrio como fuera sugerido por Gee et al. 2002b.

El WP4-T tiene la ventaja de que la determinación es mucho más rápida y sencilla respecto a las placas, ya que las muestras de suelo se deben humedecer, dejando que se estabilicen, y las lecturas se efectúan a una determinada presión en poco tiempo (aproximadamente -1,5 MPa). McIntyre (1974) halló que el cambio de contenido de agua entre presiones de 0,8 y 3,0 MPa en la mayoría de los suelos era despreciable, salvo en casos en que la textura era más fina. Por ello, los datos obtenidos con el método del higrómetro, se realizaron con contenidos de humedad del suelo comprendidos entre tensiones de -1,3 y -1,5 MPa. En suelos con texturas franco limosas a francas, no se justificarían la pérdida de tiempo y trabajo para alcanzar el equilibrio de las muestras exactamente en -1,5 MPa.

Como el WP4-T es muy sensible a los cambios de la temperatura, se debería controlar y mantener el laboratorio a una temperatura constante para evitar variaciones.

Este equipo tiene una precisión de $\pm 0,1$ MPa para el intervalo de 0,2 MPa hasta 300 MPa, y está diseñado para tensiones altas, o sea para bajos contenidos de humedad, incluido el punto de marchitez permanente no pudiéndose realizar mediciones a contenidos elevados de humedad.

Como ventaja podríamos señalar que las lecturas de este aparato corresponden a la suma de los potenciales mátrico y osmótico (potencial estrés), estando más relacionadas al agua que es aprovechable por el cultivo. Por ello las diferencias entre los resultados de los métodos aquí comparados fueron más notorias en los horizontes salinos ya que con las placas de Richards obviamos el efecto del potencial osmótico.

En la tabla 6 se muestran los diferentes valores de humedad del suelo a saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente por horizontes, presentándose la capacidad de retención de humedad de las tres posiciones evaluadas. En base a la discusión realizada previamente, se aceptó y empleó como humedad aprovechable por las plantas la estimada por la diferencia entre la humedad retenida a capacidad de campo y el contenido de humedad a aproximadamente -1,5 MPa determinado por el WP4T, expresándose en lámina (mm) y teniendo en cuenta la profundidad radical efectiva de cada perfil de suelo. La humedad en condición de saturación determinada en campo, varió en un intervalo de 0,37 a 0,51 (fracción de volumen).

Tabla 6. Retención de humedad del suelo, profundidad efectiva de raíces en cada uno de los sitios de viña en la loma, en el bajo y en el plano de la localidad de Raimat (Catalunya - España).

Sitios	Prof. (cm)	Prof. radical efectiva (mm)	Saturación		Capacidad de campo (CC)		Punto de marchitez permanente (PMP)		Agua aprov. (AA)
			Θ	mm	Θ	mm	Θ_{wp4t}	mm	mm
Loma	0-40	800	0,41	164	0,33	132	0,17	69	63
	40-90		0,38	190	0,35	175	0,27	135	40
	90-130		0,49	196	0,37	148	0,29	117	31
Bajo	0-40	700	0,42	168	0,36	144	0,17	69	75
	40-70		0,43	129	0,36	108	0,20	59	49
	70-100		0,38	114	0,32	96	0,17	52	44
	100-130		0,42	126	0,35	105	0,20	60	45
Plano	0-45	900	0,51	230	0,41	185	0,21	93	92
	45-93		0,37	168	0,33	150	0,19	86	64
	93-133		0,35	140	0,27	108	0,17	68	40

CC: Humedad determinada en campo y retenida en el suelo después de 48 horas de drenaje; PMP: Humedad retenida en el suelo a un potencial de -1,5 MPa determinada en el laboratorio con el método del higrómetro (WP4T); Agua aprov.: Agua aprovechable expresada en lámina; Θ : Humedad volumétrica; Profundidad radical efectiva: milímetros.

Los valores de CC estuvieron en el intervalo de 0,27 a 0,41 en fracción de volumen (θ). Se detectó presencia de raíces en los perfiles, hasta la profundidad de 100 a 130 cm, considerándose la profundidad efectiva de raíces al alcanzar aproximadamente el 90% de su total, lo cual estuvo condicionado por alguna de las siguientes características: movimiento de agua, densificación de suelo, o salinidad que influyeron en el crecimiento y la presencia de raíces en cada espesor de suelo. En L se tomó como la profundidad radical los 80 cm, en B: 70 cm y en P: 90 cm.

El menor contenido de agua aprovechable (AA) se halló en L que alcanzó 95 mm, de los cuales 63 mm fueron del primer horizonte (Tabla 6), más 32 mm de agua aprovechable del espesor de 40-80 cm. El AA disminuyó mucho en dicho horizonte comparativamente con el anterior, debido a la mayor salinidad que aumentó la retención de agua en el PMP. En B con 70 cm se calculó una lámina de 124 mm y en P fue de 156 mm. Debido a que la profundidad radical efectiva en L fue de 80 cm, 8 mm de AA del espesor de 40-90 cm, más los 31 mm de AA de los 90 a 130 cm, quedaron disponibles para el 10% de raíces de la viña. Igualmente sucedió para los 89 mm de AA de B correspondientes al espesor de suelo de 70 a 130 cm y los 40 mm de AA del último horizonte de P.

4.5. Propiedades hidráulicas

4.5.1. Infiltración

Los datos de infiltración por el método del cilindro de 30 cm de diámetro (C30) se presentan en la Tabla 7. Los valores promedio de las tres posiciones en el relieve que indicaron mayor entrada de agua en el suelo, fueron superiores en gran medida para P que para el resto de los suelos, seguido por la situación de L que también presentó una infiltración elevada. La mayor infiltración registrada en el suelo calcáreo de la parcela, se debería a que presentó mayores contenidos de MO y al carbonato equivalente medido (37%) los que contribuyeron a una buena estructuración y drenaje interno (Gladstone, 1992).

La entrada del agua en B fue de $4,6 \text{ mm h}^{-1}$ ($1,27 \cdot 10^{-6} \text{ m seg}^{-1}$). Por su posición en el relieve, presentó mejores condiciones de humedad, debido a que recibía el agua de escorrentía superficial de las zonas más elevadas, permitiendo tener más vegetación natural entre las líneas. Esta cobertura contribuyó a evitar el sellado del suelo, ya que solamente se cortaba con desbrozadora contribuyendo a minimizar las malas características del suelo con elevado contenido de limo, baja estabilidad estructural y tendencia a formar estructura laminar en el horizonte superficial en las áreas desnudas y en las huellas del tractor (Fig. 15).



Fig. 15. Estructura laminar en la situación B, donde además se observaron eflorescencias salinas.

Si bien en L la infiltración en promedio era 8 mm h^{-1} ($2,22 \cdot 10^{-7} \text{ m seg}^{-1}$) en el centro de las calles del cultivo, la infiltración fue de 18 mm h^{-1} ($4,99 \cdot 10^{-6} \text{ m seg}^{-1}$). La baja cobertura en algunos sectores de L, contribuyó de modo negativo en la

entrada del agua al perfil, observándose en la línea del cultivo y en la huella del tractor (de mayor compactación) valores de infiltración básica de 3 a 4 mm h⁻¹ (9,69 10⁻⁷ m seg⁻¹). Dicha tasa, representa la penetración mínima y estable del agua de lluvia o riego en el suelo cuando ha transcurrido un tiempo determinado.

Tabla 7 Infiltración del agua por el método del doble cilindro con el cilindro interno de 30 cm de diámetro en la línea, en la huella del tractor y en el centro de las entrelíneas del cultivo de la vid en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.

Sitios	Loma	Bajo	Plano
	(mm h ⁻¹)		
Línea del cultivo	4	3,2	49
Huella del tractor	3	2,3	15
Centro de las entrelíneas o calles	18	8,4	45
Promedios	8,2	4,6	36,4
Desvío estándar	8,5	3,3	18,6

Se encontraron diferencias en las determinaciones de infiltración realizadas con el cilindro de 30 cm (Tabla 7), según fueran en las líneas de plantación de vides, en las huellas del tractor, próximas a las líneas de plantación de las viñas, o en el centro de las entrelíneas o calles con una menor compactación, sin tránsito de maquinarias. En las tres situaciones (L, B y P) la menor infiltración correspondió a la zona de la huella del tractor. Estas diferencias existentes dentro de cada parcela fueron debidas al tránsito de maquinarias de gran peso que aumentaron la compactación del suelo y con ello la escorrentía superficial del agua de lluvia y de riego que se localizaban en esas áreas deprimidas con baja infiltración de agua, generando un microrelieve característico con zonas deprimidas (huella del tractor) y otras sobreelevadas similares a caballones (coincidentes con las líneas de vides plantadas), contribuyendo a un aumento más acentuado de los desvíos estándares. Los mayores coeficientes de variación (superiores al 70%) fueron los encontrados en L y en B, evidenciándose un mayor efecto de surcos de escorrentía.

Dentro de la toposecuencia estudiada, desde la loma al bajo, se instalaron parcelas de 1 m² (2 m de largo por 0,5 m de ancho) y al finalizar dichas parcelas canaletas tipo Guerlach. Las parcelas se emplazaron en tres posiciones, en L, en ML (en posición de media loma) y en B. En la parcela de L, con precipitaciones bajas de 5 mm e intensidad de 3 mm h⁻¹, se recolectaron: 27 g m⁻², en ML: 5,4 g m⁻² y en la parcela del B: 4,7 g m⁻². Al incrementarse la cantidad de la lluvia a 8 mm y la intensidad a 6 mm h⁻¹, se recogieron en las canaletas de dichas posiciones, desde la loma hasta el bajo: 75 g m⁻², 32 g m⁻² y 25 g m⁻² respectivamente.

Al producirse precipitaciones de mayor cuantía de 18 mm con una intensidad máxima de 12 mm h^{-1} , se alcanzó una erosión y pérdida de suelo registradas en las canaletas en L, de $1,1 \text{ kg m}^{-2}$, en ML de $0,6 \text{ kg m}^{-2}$ y en la parcela B, con cobertura vegetal, $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ de sedimentos.

Al producirse precipitaciones de 32,3 mm, e intensidades máximas de 19 mm h^{-1} , se registraron las siguientes cantidades de sedimentos en las canaletas: en L una pérdida de $1,5 \text{ kg m}^{-2}$ de suelo, en ML de 1 kg m^{-2} y en la parcela B, con cubierta vegetal, $0,3 \text{ kg m}^{-2}$. Cabe mencionar que en la zona se han alcanzado precipitaciones con intensidades mayores, llegando a 34 mm h^{-1} , en un evento de 54 mm el día 7 de mayo de 1999 para un período de retorno de 21 años.

La presencia de cobertura vegetal en B, disminuyó de 3 a 5 veces la pérdida de suelo con respecto a L. Resultados favorables también fueron encontrados con el empleo de cubiertas verdes en vides, por Uson *et al.* (1998) registrándose menor erosión en parcelas de 1 m^2 ante precipitaciones primaverales en la zona de Anoia - Penedés (Cataluña - España).

El sitio de menor cobertura vegetal fue L y los de mayor cobertura, fueron P (por la mayor humedad debida al riego por aspersión) y B (que recibía por escorrentía superficial la mayor parte del agua de lluvia y riegos aplicados en la viña). Sin embargo a pesar de dichas características generales, en los tres sitios hubieron áreas con cobertura vegetal y sin ella, en las que se midió el movimiento de agua del suelo.

En la Tabla 8 se presentan los datos de infiltración por el método de los cilindros de 20 cm de diámetro (C20), realizados en áreas localizadas previamente con cobertura natural y sin ella. En B y en L la infiltración aumentó con cubierta vegetal casi al doble. En P sin cobertura fue de 9 mm h^{-1} ($2,58 \cdot 10^{-6} \text{ m seg}^{-1}$). Con cobertura la infiltración aumentó más de 6 veces (59 mm h^{-1} o sea $1,63 \cdot 10^{-5} \text{ m seg}^{-1}$) lo cual resalta la importancia de las cubiertas vegetales sobre la infiltración, especialmente en riego por aspersión donde hubo mayor impacto de las gotas de agua sobre el suelo (Tabla 8). Ello se debió a que la vegetación protegió a los agregados superficiales del suelo del impacto de las gotas de lluvia o riegos, evitando la formación de sello y aportando restos orgánicos que favorecieron la estructuración (Baver, 1991). El riego por aspersión además mantuvo la humedad necesaria entre las líneas de la vid, para lograr una buena densidad de la cubierta de vegetal.

Los desvíos estándares y los coeficientes de variación de la infiltración fueron mayores con el método de cilindros de 20 cm (Tabla 7 y 8) que con los cilindros de 30 cm indicando mayor variabilidad.

Tabla 8. Infiltración en cilindros de 20 cm de diámetro (C20), en sectores de las parcelas con y sin presencia de cobertura vegetal en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.

Sitios sin o con cobertura vegetal	Infiltración (cilindros de 20 cm de diámetro)		
	L	B	P
	Infiltración mm h ⁻¹		
Media de los sitios sin cobertura	6,6	3,4	9,3
Desvío estándar (sitios sin cobertura)	6,1	2,8	8,1
Media de los sitios con cobertura	9,6	6,3	58,9
Desvío estándar (sitios con cobertura)	9,0	4,9	42,9

En la tabla 9 se presenta una evaluación de la variabilidad de la infiltración del agua en el suelo medida con cilindros de 30 cm de diámetro y cilindros de 20 cm (con n: 8). Para B con C30 dio una media de 6,3 mm h⁻¹ ($1,75 \cdot 10^{-6}$ m seg⁻¹) y con los C20 cm 9 mm h⁻¹ ($2,49 \cdot 10^{-6}$ m seg⁻¹).

En los cilindros dobles, el empleo de un cilindro externo permite que la evaluación del ingreso del agua del suelo en el cilindro interno, sea debida exclusivamente al flujo vertical, haciéndose despreciable el flujo lateral. Debido a ello se obtuvieron medias inferiores que en los cilindros simples, pues en estos últimos, la tasa de flujo total de entrada de agua en suelo es una combinación de ambos tipos de movimientos, el vertical y el horizontal, aumentando la entrada del agua como consecuencia del aporte del flujo lateral, como señalaron otros autores (Tricker, 1978; Reynolds & Elrick, 1990).

Tabla 9. Infiltración del agua por el método del doble cilindro con el cilindro interno de 30 cm de diámetro y con cilindros de 20 cm de diámetro evitando la alteración del suelo y con la formación de sello superficial, en el cultivo de la vid del bajo (B) de Raimat.

Evaluación de 8 parcelas de B	Cilindros de 30 cm (C30)	Cilindros de 20 cm (C20)	Cilindros de 20 cm con sello (C20 cs)
	mm h ⁻¹		
Promedio	6,3	9,0	6,1
Máximos	13,9	24,0	11,1
Mínimos	2,1	1,0	2,2
Desvío estándar	4,4	8,5	3,0
Coef. de variación	70,3	95,1	48,8

En los C20 cm hubo proporcionalmente mayor flujo lateral y por lo tanto mayor infiltración debido a que existe una menor relación entre el área que cubren, respecto al borde de éstos en comparación con los C30 cm. A mayor dimensión de los cilindros habría un menor efecto de flujo lateral. Así Bagarello y Sgroi (2004, citado por Chowdary et al., 2006) cuando usaron infiltrómetros de

cilindros de mayor diámetro, redujeron el efecto del componente de infiltración lateral.

Al provocar la formación de sello superficial dentro de los cilindros pequeños de 20 cm con una regadera, la infiltración de agua en los cilindros pequeños (C20 cs) disminuyó acercándose a los valores de entrada de agua de los cilindros grandes de 30 cm de diámetro. Debido a la gran diferencia entre los máximos y mínimos en cada caso, tenemos elevados coeficientes de variación y desvíos estándares. En el caso de los C20 cs, la formación del sello provocado fue el factor determinante en dificultar el ingreso del agua que enmascaró la variabilidad del suelo, reduciéndose el coeficiente de variación del 95% (Tabla 9) a prácticamente la mitad (49%).

Al aumentar el área evaluada se pudo observar claramente que disminuyeron el desvío estándar y el coeficiente de variación, resultando datos más fiables los obtenidos con cilindros mayores. Los desvíos estándares de la infiltración fueron elevados (Tablas 8, 9 y 10) indicando una elevada variabilidad, concordando con lo expresado por varios autores (Hillel, 1998; Sharma *et al.*, 1980; Bower, 1986).

4.5.2. Infiltración a través del sello superficial

Al evaluar el grado de restricción del sello superficial a la infiltración del agua al suelo, las medias totales de las tres posiciones en el relieve dieron los mismos resultados, sin diferencias entre ellas. Sin embargo al considerar cada sitio en particular, cuando provenía de un suelo desnudo o que tuvo cobertura vegetal y se la cortó para provocar el sellado con regadera a efectos de hacer la determinación de infiltración, el sello redujo la velocidad de infiltración del agua a prácticamente la mitad en los puntos medidos que provenían de una condición sin cubierta vegetal. En L bajó de 6 mm h^{-1} a 3 mm h^{-1} , en B de $5,6 \text{ mm h}^{-1}$ disminuyó a $2,5 \text{ mm h}^{-1}$ y en P de $5,2 \text{ mm h}^{-1}$ a $3,7 \text{ mm h}^{-1}$. El desvío estándar hallado no fue elevado y no hubo mucha variabilidad (coeficientes de variación menores del 49%). Las tres situaciones presentaron el mismo comportamiento ante la entrada de agua del sello.

En las tres situaciones la estabilidad de los agregados, hallada por tamizado en húmedo fue muy baja, en B se obtuvo 21,4% de estabilidad de agregados en agua con diámetros mayores de 0,5 mm (% EA), en L fue de 25,8% EA y en P 33,8% EA, por lo cual las posibilidades de formación de sello fueron altas. En consecuencia, en los suelos provenientes de áreas sin cobertura vegetal, al disminuir a la mitad la entrada de agua al suelo, aumentaría la escorrentía superficial. Wild (1992) mencionó que la cobertura vegetal cumple un efecto favorable de protección de los agregados del suelo ante el golpe de las gotas de lluvia, y por el aporte de la materia orgánica proveniente de restos vegetales en superficie y raíces muertas, necesarios para la estructuración y estabilidad de los

agregados. Para suelos similares del Penedés, Pla (2006) sugirió el uso de gramíneas que concentran sus raíces en los primeros cm del suelo, eliminando prácticamente la escorrentía. A pesar del consumo de agua por las coberturas, si en los años secos se cortan o controlan con herbicidas se puede incrementar las reservas hídricas para las etapas de mayor demanda en suelos con buena capacidad de retención. Lo cual no fue un inconveniente en el presente caso en que se usó riego en las viñas.

La disminución de infiltración con y sin cobertura vegetal, indicaría la importancia de ella sobre dicha propiedad física, especialmente en las condiciones de trabajo, por tratarse de parcelas con pendiente, con baja infiltración de agua, baja estabilidad de los agregados y tendencia a formación de sello, acentuado por la textura con elevados contenidos de limo (mayores de 48% en superficie) que proporcionaron malas condiciones de estructuración (con menos de 34% de agregados > de 0,5 mm, estables en agua).

La falta de cobertura vegetal contribuyó al aumento de la escorrentía superficial y la erosión de suelo. Las características climáticas del lugar (semiárido) no favorecieron al crecimiento de la vegetación natural entre las líneas del cultivo. Aunque el riego por goteo es más eficiente en el uso del agua, ya que se consume menos, que en el caso de riego por aspersión, debe tenerse en cuenta que el tratamiento de riego por aspersión en P, permitió tener el establecimiento permanente durante todo el año de cobertura vegetal con sus efectos de protección al suelo, frente al impacto de las gotas de lluvia, evitando la ruptura de los agregados. Varios autores (Tisdal & Oades, 1982; Oades, 1984, Elliot, 1986, Beare et al., 1994) han manifestado el rol de la materia orgánica como factor de agregación en las muestras superficiales siendo vinculada como el principal agente de estabilización de agregados. Los materiales orgánicos procesados biológicamente y humificados, fueron relacionados en la unión de partículas de limo y paquetes de arcilla menores de 20 μm , en agregados progresivamente mayores, hasta alcanzar el tamaño de macroagregados.

En las parcelas de la pendiente, el riego por goteo en forma localizada en las líneas del cultivo, mantuvo a la zona del centro de las entrelineas con muy baja humedad, insuficiente en los meses de mayor evapotranspiración para lograr una buena cobertura. Dicho inconveniente se observó en manchones con sectores sin vegetación, más afectados en L y más expuestos a la escorrentía superficial del agua y pérdida de suelo ante la falta de un adecuado establecimiento de la vegetación. Si bien en B también hubo riego por goteo, resultó con mayor humedad en el suelo por recibir el aporte de la escorrentía superficial del agua de lluvia y de riego proveniente de L que mantuvo la vegetación natural en mejores condiciones cubriendo la mayor parte de la parcela.

4.5.3. Simulación de lluvias

Las simulaciones de lluvias se hicieron en sectores donde hubo cobertura vegetal, y donde se encontraba el suelo desnudo. Estos resultados corresponden a suelos que fueron labrados, para lo cual, una vez instalado el simulador en el campo se procedió cuando había vegetación a cortarla al ras del suelo y a romper un espesor de unos 3-5 cm de suelo aproximadamente, para destruir el sello superficial si lo tenía.

Las medias totales de las simulaciones de lluvias realizadas dieron mayor infiltración de agua al suelo en las posiciones de $L > P > B$, con una variabilidad esperable en dicha propiedad e inferior que con el método de los cilindros (Tabla 10). Al determinar las simulaciones de lluvias en suelos donde previamente estaban sin cubierta vegetal, la entrada de agua se redujo casi a la mitad en todos los sitios, comparativamente a los casos en que el suelo contó con cubierta vegetal previa a las determinaciones y en las cuales se la cortó para hacer la simulación. Estos resultados resaltaron la importancia de la cobertura vegetal que aportó al suelo, raíces y restos orgánicos que influyeron favorablemente en la estructuración dando agregados más estables para soportar el impacto de las gotas de la simulación de lluvia.

En las simulaciones se intentó reproducir la situación de un suelo trabajado por el agricultor, y los resultados de infiltración fueron superiores a los obtenidos con los cilindros, donde por el contrario, se protegió la superficie del suelo al colocar el agua, para realizar las mediciones, a fin de conservar la situación tal cual se halló en el campo.

Tabla 10. Simulaciones de lluvia en suelos que estaban previamente a la determinación con cobertura vegetal o sin ella, en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.

Sitios sin cobertura vegetal, o con cobertura, previa a las determinaciones.	Simulaciones de lluvia		
	Loma	Bajo	Plano
	Infiltración mm h ⁻¹		
Media sin cobertura	24,0	18,0	15,5
Media con cobertura	53,8	32,5	51,5
Media total de las muestras	38,9	28,9	33,5
Desvío estándar	20,5	7,7	26,6
Coefficiente de variación	52,7	26,7	79,3

En las simulaciones realizadas en bandejas de erosión en laboratorio, se hallaron menores valores que en el campo, L resultó con 27 mm h⁻¹, (7,48 10⁻⁶ mm seg⁻¹) P con similares resultados 28 mm h⁻¹ (7,76 10⁻⁶ m seg⁻¹) y los más bajos para B (20 mm h⁻¹ o sea 5,54 10⁻⁶ m seg⁻¹). Los valores de velocidad de infiltración mínima obtenidos con lluvias simuladas en campo y en bandejas o cajas de erosión en laboratorio, sirven como referencia a la forma en que

evolucionaría la infiltración del agua de lluvia cuando caen en un suelo con pendiente, seco, labrado, y desnudo, una vez que se ha formado el sello.

El tiempo que tardó en iniciarse la escorrentía superficial en el campo fue bastante similar, para B: de 1 a 2 minutos; para L de 2 a 3 minutos; y para P varió entre 2 y 5 minutos que fue el caso que presentó mayor estabilidad de agregados en húmedo (33,8%) de los tres sitios. En el laboratorio, las bandejas empezaron la formación del sello en superficie presentando escorrentía, en B entre 1 y 3 minutos, mejorando ligeramente en P (4 a 5 minutos) y L (5 a 6 minutos). El coeficiente de variación de las simulaciones en bandejas en el laboratorio fueron menores que en el campo variando entre 39,3 y 28,2%.

4.5.4. Conductividad hidráulica saturada

Este valor refleja la permeabilidad del suelo en forma integral, correspondiendo aproximadamente a la conductividad hidráulica en condiciones de saturación del estrato del suelo con más baja permeabilidad (Pla, 1983).

El valor promedio de la conductividad hidráulica para L fue 8 mm h^{-1} ($2,22 \cdot 10^{-6} \text{ m seg}^{-1}$) similar al compararse con los hallados en el laboratorio, de la tabla 11, con poca diferencia en muestras superficiales ($10,9 \text{ mm h}^{-1}$ o sea $3,02 \cdot 10^{-6} \text{ m seg}^{-1}$).

Tabla 11. Conductividad hidráulica saturada determinada en campo en cilindros de 30 cm de diámetro (C30) en los peldaños excavados en las calicatas y con el método de laboratorio de carga constante en cilindros de 5 cm de diámetro (volumen de 100 cm^3) con muestras inalteradas en las posiciones de: loma (L), bajo (B) y plano (P) de Raimat.

Sitios	Conductividad hidráulica saturada	
	Campo	Laboratorio
	mm h ⁻¹	
Loma (0-40)	8,2	10,9
Loma (40-90)	1,0	7,0
Loma (90 – 130)	1,25	77,2
Bajo (0-40)	4,6	2,5
Bajo (40-70)	1,7	6,0
Bajo (70-100)	0,9	71,5
Bajo (100-130)	0,9	4,2
Plano (0-45)	36,4	71,8
Plano (45-93)	70,0	76,7
Plano (93-133)	7,8	5,76

A mayor profundidad (40-90 cm y de 90-130 cm) los valores de conductividad hidráulica en L fueron de 1 y 1,25 mm h⁻¹ (3,46 10⁻⁷ m seg⁻¹) inferiores a los hallados en el laboratorio por el método de flujo saturado a carga constante en cilindros de 5 cm de diámetro (Tabla 11). El último horizonte tuvo los valores más altos de conductividad hidráulica en laboratorio y presentaron los mayores contenidos de fragmentos gruesos en las muestras de los cilindros (gravas finas, medias y algo de gruesas) que dificultaron el manipuleo de las mismas, pudiendo generar más alteración de la esperada al emparejar las superficies superior e inferior del cilindro.

El coeficiente de variación fue elevado (81%) puesto que presentó alta variabilidad, similar a lo que sucede con la infiltración como fuera citado por varios autores (Brejda et al., 2000; Lal & Shukla, 2004) por lo que se lo podría usar como guía de variabilidad de la tasa de infiltración (Bower, 1986).

En la posición de B el promedio de la conductividad hidráulica medida en el campo con los cilindros de 30 cm de diámetro (C30) en la línea, la huella y el centro de las viñas fue mayor (4,6 mm h⁻¹ o 1,27 10⁻⁶ m seg⁻¹) que la medida en el laboratorio (2,5 mm h⁻¹ o 6,93 10⁻⁷ m seg⁻¹). En los siguientes horizontes a mayor profundidad se observaron mayores valores en laboratorio y con elevados desvíos entre las repeticiones (Tabla 11).

En P se obtuvo superficialmente en el campo un promedio de 36 mm h⁻¹ y en laboratorio de 72 mm h⁻¹ y con menores diferencias a mayores profundidades, igualándose prácticamente sus resultados para el último espesor. En esta calicata se halló el menor contenido de material grueso, inferior al 10% (Tabla 2). Las diferencias más notables, con valores más altos en laboratorio, fueron en las muestras de los cilindros 100 cm³ del primer horizonte, donde los fragmentos gruesos dificultaron la tarea de emparejarlos perturbando las condiciones originales del suelo en los cilindros.

Los datos de conductividad hidráulica obtenidos en campo concordaron con otras propiedades físicas aquí evaluadas. Ello se debería a que en el campo los resultados involucraron mayores áreas (707 cm²) y volúmenes de suelo (>10.000 cm³) pues los cilindros (C30) se clavaban a unos 20 cm de profundidad, siendo más representativos que los cilindros de muestras inalteradas (19,6 cm² y 100 cm³) donde el valor responde a una reducida área y a un volumen muy restringido del suelo.

Debido a que los cilindros requieren para el trabajo en el laboratorio hacer cortes de las caras superior e inferior, quedarían más expuestos a errores por manipulación de las muestras. En consecuencia, por el área y volumen de suelo que se evalúa con el método considerado más representativo (el de los C30), la conductividad hidráulica determinada en campo brindaría una información más fiable.

Cuando la superficie del suelo se encuentra removida por las labranzas, los agregados si son muy inestables como el caso de los presentes suelos que variaron de 21,4% de estabilidad de agregados en agua con diámetros mayores de 0,5 mm (% EA), a 33,8% EA, se destruyen rápidamente con el impacto de las gotas de agua, formándose un sello con valores bajos de conductividad hidráulica saturada (Ks). Así se obtuvo para L 1,8; para B 1,2 y para P 2,3 mm h⁻¹. En cambio al mantener protegida la superficie del suelo los valores se mantuvieron más elevados: 15, para L; 9 para B y 24 mm h⁻¹ para P. Esto indica la baja estabilidad estructural de éstos suelos y la fácil destrucción de los agregados ante el impacto de las gotas de lluvia y la posterior formación de sello superficial.

4.6. Contenido de humedad del suelo:

4.6.1 Reflectometría en dominio de tiempo (TDR)

Para evaluar la evolución del contenido de humedad del suelo con el TDR se realizó una calibración de las lecturas con los datos de humedad determinados por gravimetría de muestreos con barrena cercanos a los tubos, por profundidades (0-20; 20-40; 40-60 y 60-80 cm). Las lecturas del TDR se hicieron entre 15 a 21 días desde la campaña del 2006-2007 hasta la del 2007-2008. Paralelamente se realizaron controles con barrena de 21 a 30 días para su calibración. Dicha humedad se usó como método convencional y básico para control efectuándose regresiones por sitio y profundidad, hallándose una relación lineal entre ambas variables, con buenos coeficientes de determinación por profundidad (Fig. 16, 17 y 18).

En B, se obtuvo mejor ajuste de las lecturas del TDR, con r² que variaron de 0,81 a 0,70 (Fig. 16). En P hubo una situación similar, con r² de 0,78 y de 0,67 (0-20 y de 20-40 cm), salvo para la profundidad de 40-60 cm, que coincidió con la presencia del horizonte cálcico donde sólo el 54% de las variaciones de las lecturas del TDR fueron explicadas por la variación de la humedad volumétrica. Al superar dicha profundidad se incrementaron los r² a 0,67 (Fig 17).

En L se halló, una buena explicación de la variación de las lecturas del TDR con la variación del contenido de humedad, obteniéndose valores de r²: 0,75 de 0-20 cm de profundidad y r²: 0,64 de 20-40 cm de profundidad. A mayor profundidad, de 40-60 y 60-80 cm, bajaron los coeficientes de determinación a 0,49 y 0,59 respectivamente (Fig. 18), aunque mantuvieron elevada significación estadística en ambos casos (P > 0,0001). Las correlaciones halladas entre ambas variables de 40-60 cm fueron r: 0,697 (P > 0,0001) y de 60-80 cm un r: 0,737 (P > 0,0001) respectivamente.

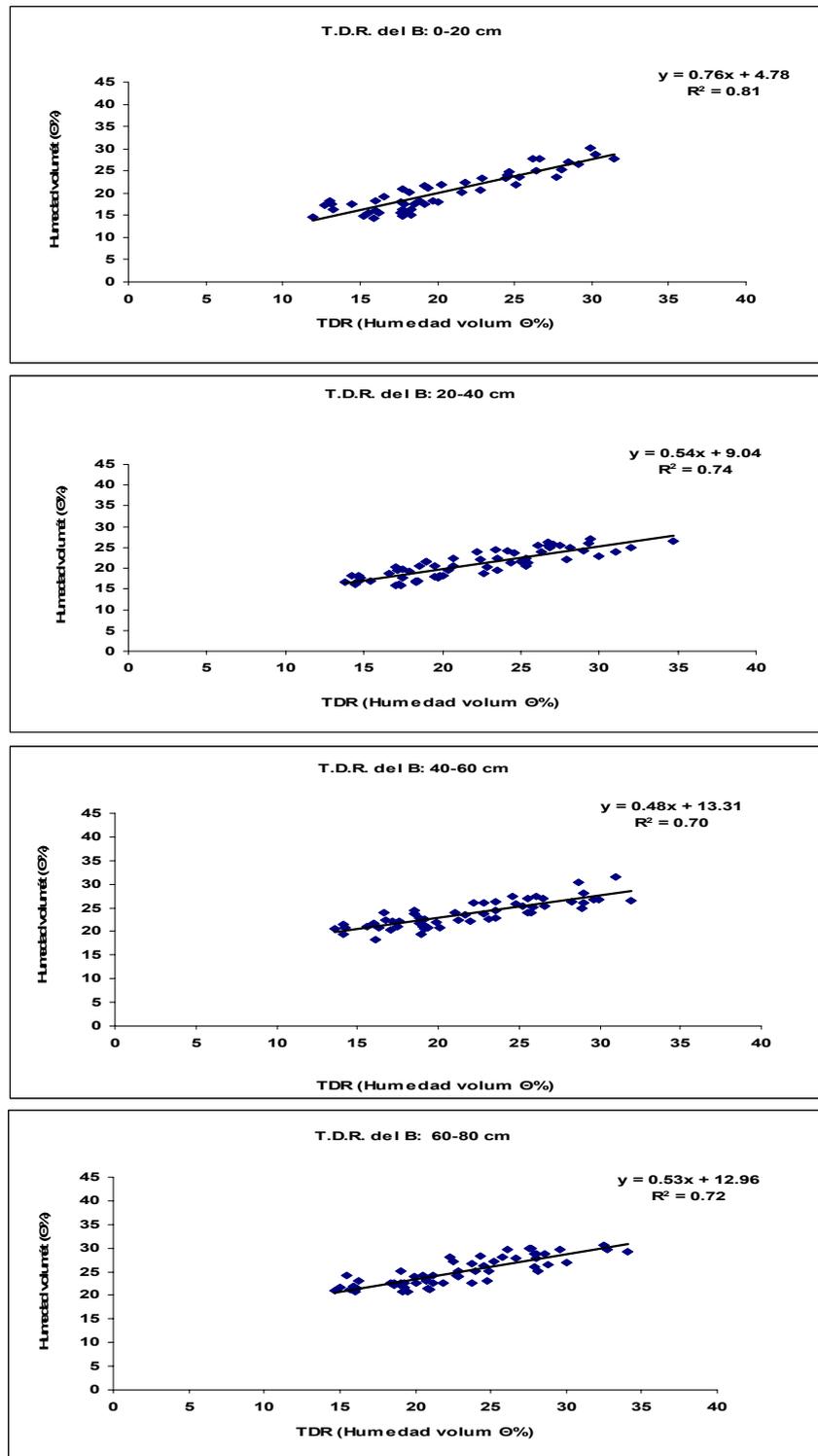


Fig. 16: Relación entre las lecturas el TDR expresadas volumétricamente y el contenido de humedad volumétrica del suelo (cm^3 de agua 100 cm^3 de suelo), obtenida de valores de humedad gravimétrica de las muestras barrenadas y de la densidad aparente medida con el método de excavación en el bajo (B) de Raimat.

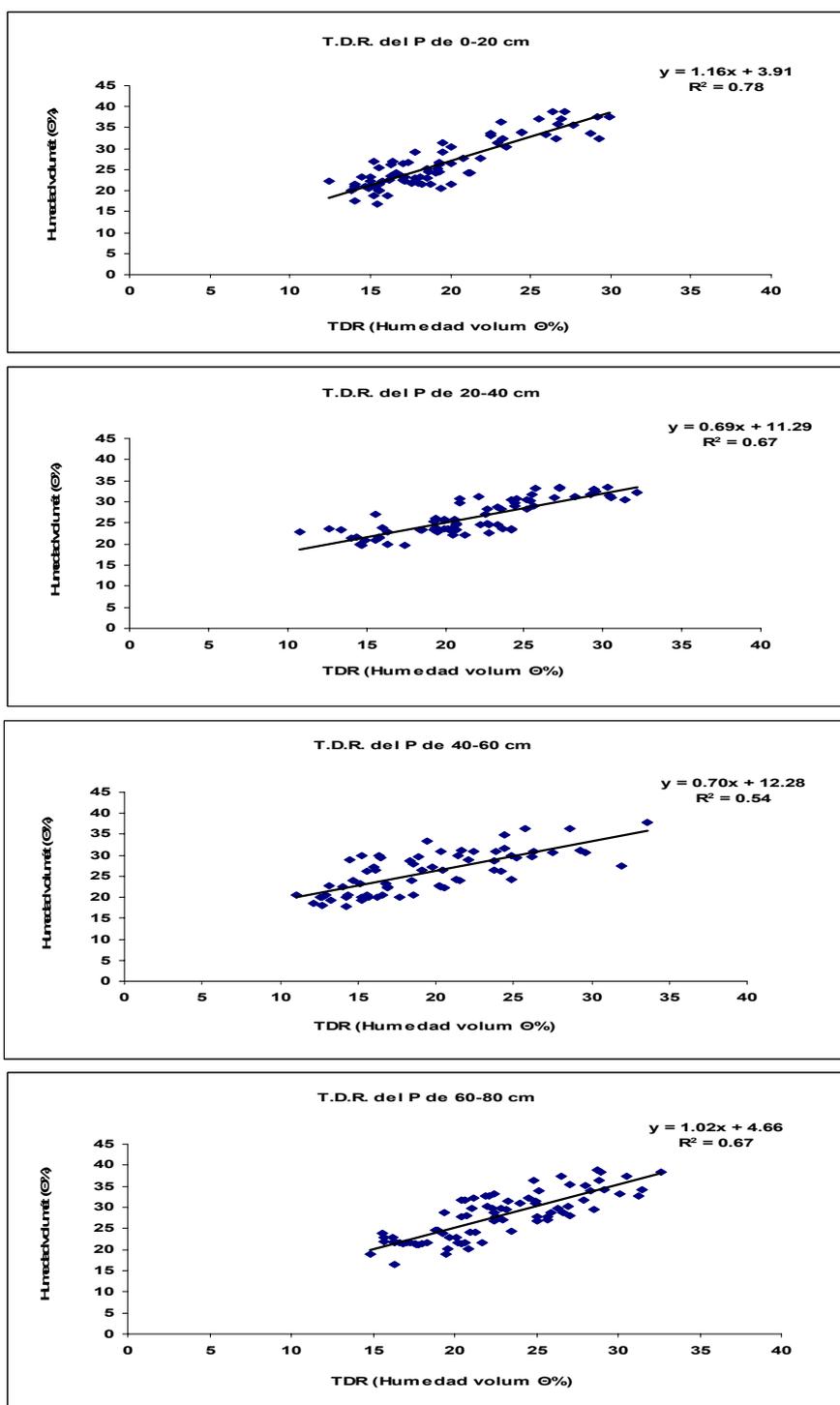


Fig. 17: Relación entre las lecturas el TDR expresadas volumétricamente y el contenido de humedad volumétrica del suelo (cm^3 de agua 100 cm^3 de suelo), obtenida de valores de humedad gravimétrica de las muestras barrenadas y de la densidad aparente medida con el método de excavación en el plano (P) de Raimat.

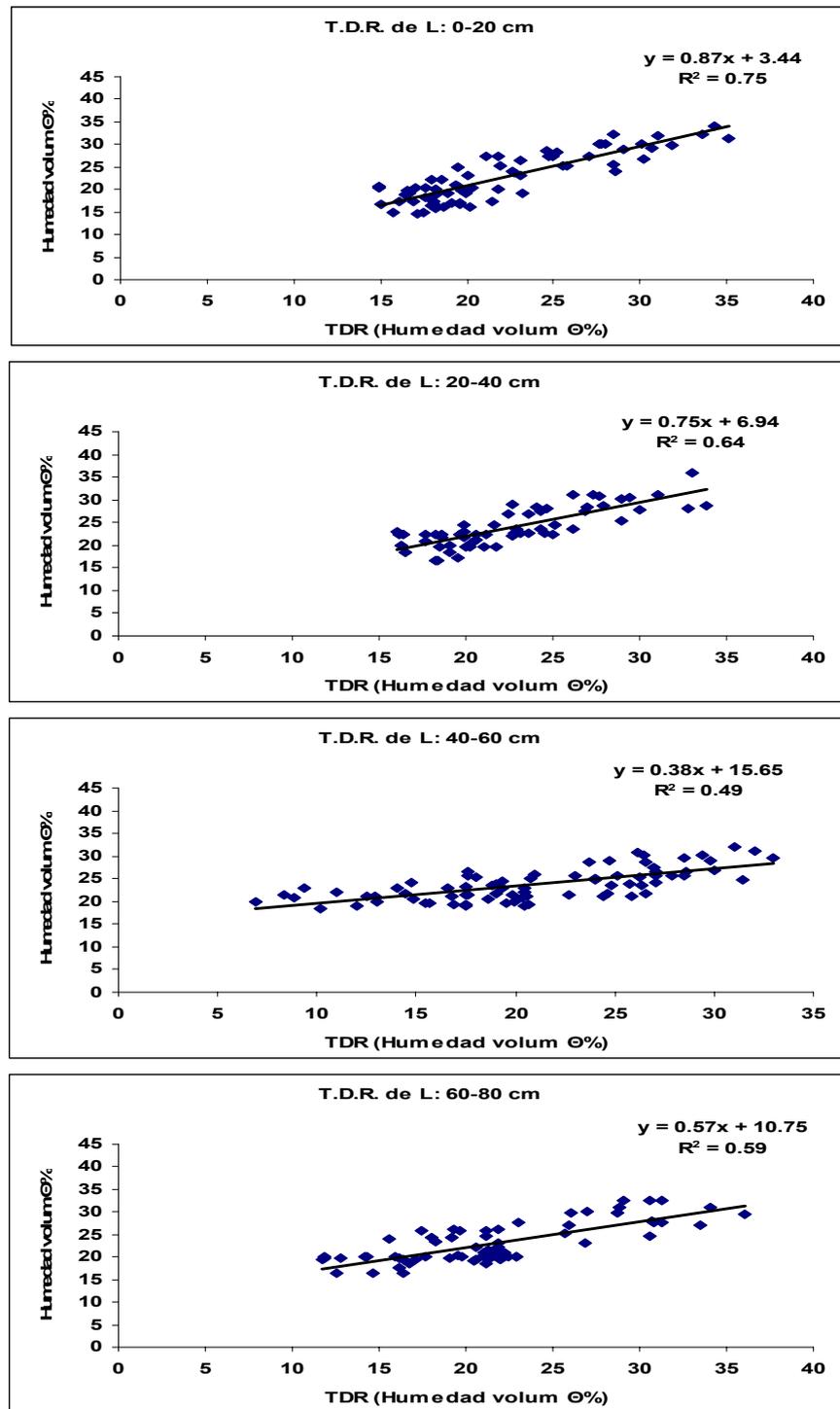


Fig. 18: Relación entre las lecturas el TDR expresadas volumétricamente y el contenido de humedad volumétrica del suelo (cm^3 de agua 100 cm^3 de suelo), obtenida de valores de humedad gravimétrica de las muestras barrenadas y de la densidad aparente medida con el método de excavación en la loma (L) de Raimat.

Esto fue coincidente con mayores contenidos de fragmentos gruesos de margas abigarradas y limonitas que dificultaron el uso de la barrena en áreas próximas a dichos tubos. Rosny et al. (2001) citaron que las mediciones de contenidos de agua por medio de técnicas dieléctricas en suelos con fracción gruesa, presentaron algunas dificultades como la instalación de los tubos de acceso de la sonda del TDR para las medidas en el perfil del suelo y cuando los fragmentos gruesos fueron abundantes junto a las paredes del tubo, la formación de cavidades generaron errores por los huecos artificiales llenos de aire creados al instalarlos y la producción de zonas de flujo preferencial. La mejor explicación de la variación de las lecturas del TDR con el contenido de humedad del suelo, se obtuvo en las muestras superficiales de menores porcentajes de fragmentos gruesos y salinidad que pudieran interferir las lecturas.

Las lecturas del TDR y los contenidos de humedad volumétrica del suelo también se evaluaron por tubos, hallando mejores correlaciones, y regresiones con r^2 de 0,79 a 0,87 con los datos superficiales de 0-20 y de 20-40 cm, salvo a mayores profundidades (40-80 cm) con algunos tubos. Ello se debió a la mayor conductividad eléctrica de L, en profundidad, de 4 dS m^{-1} a $4,4 \text{ dS m}^{-1}$, en relación 1:1, que habría afectado a las lecturas de dichos tubos (Fig. 18), como fue hallado por Sánchez Pérez et al. (1999), quienes mencionaron que en suelos con valores de conductividades eléctricas dentro de intervalos salinos, afectaron las medidas de TDR por atenuarse la señal reflejada en el extremo de la línea de transmisión.

En la Fig. 19 se presenta la evolución del contenido de humedad de los suelos medidos con el TDR por sitio y por profundidad, desde marzo de 2007 hasta el septiembre de 2007, que correspondió al período en el cual fueron colocados los tubos en las parcelas. En la Fig. 20 se presenta la campaña agrícola siguiente completa, desde octubre de 2007 a septiembre de 2008. En los tres sitios se observó una tendencia a presentar los niveles más altos de humedad en los perfiles de suelos durante la primavera y menores contenidos de humedad en verano, coincidiendo con el inicio de riegos en marzo – abril, en período de brotación y época de las mayores precipitaciones. Los mayores contenidos de humedad de la campaña del 2006-2007 fueron de 40-60 y de 60-80 cm, salvo cuando por riegos o lluvias, aumentó el contenido de humedad de los espesores más superficiales, de 0 hasta 40 cm (Fig. 19).

En agosto y septiembre de 2007, en el período comprendido dentro de “envero” a “caída de hojas”, cuando la vid posee un elevado consumo hídrico (45%) con elevadas temperaturas, evapotranspiración y bajas precipitaciones, se hallaron bajos contenidos de humedad del suelo, ya que fueron reduciendo las dosis de riego para favorecer la calidad de la vid. Matthews & Anderson, (1988) y Salazar, (2002) informaron que un ligero estrés hídrico por restricción de riegos entre el “envero” y la vendimia favoreció la proporción de elementos nobles, los polifenoles, antocianos y taninos sin reducir el peso de los racimos.

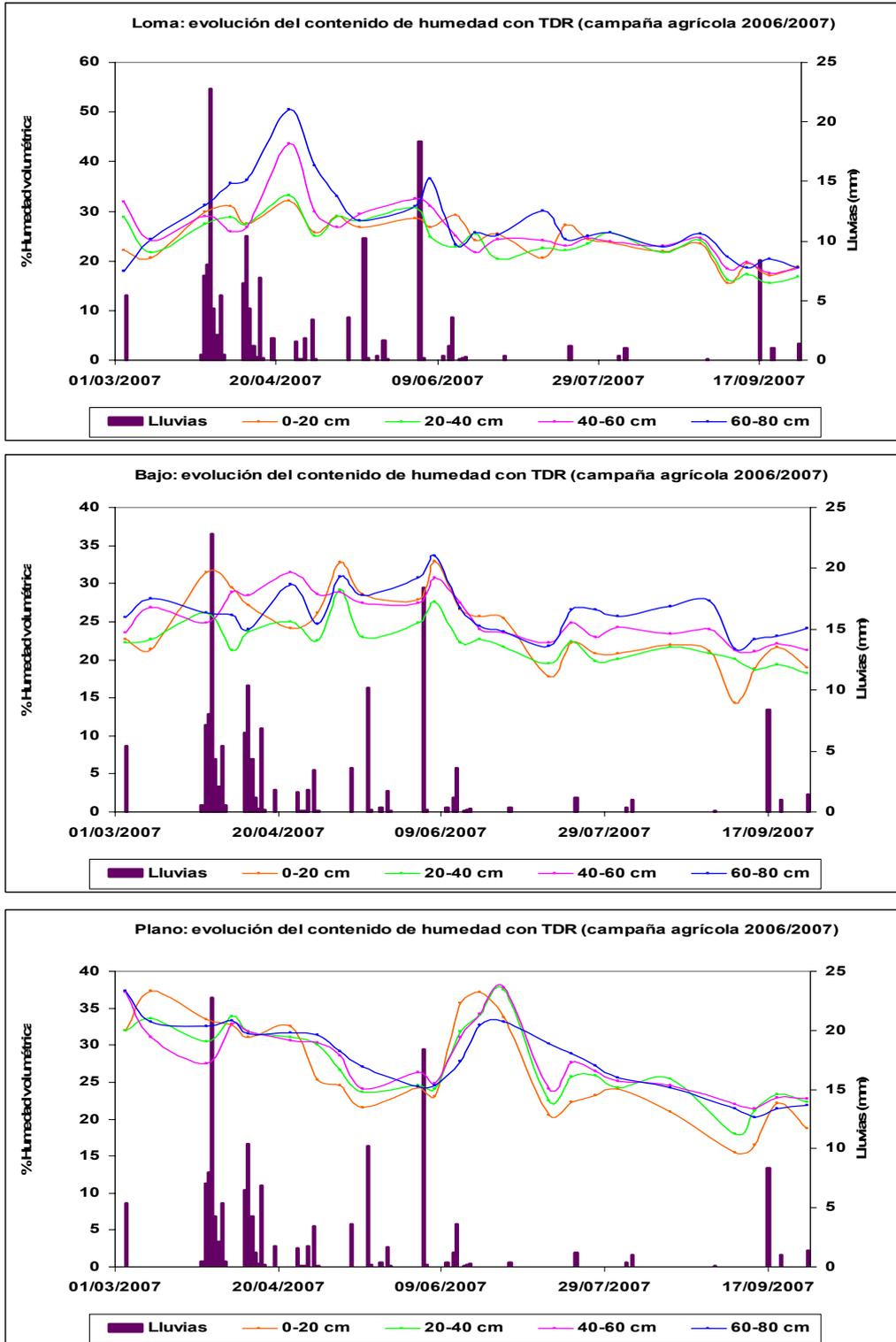


Fig. 19. Evolución del contenido de humedad volumétrica del suelo medidos con el TDR a partir del 1/03/2007, momento en el cual se instalaron los tubos en el suelo y se éste se estabilizó para realizar las lecturas, hasta la fecha de finalización de la campaña agrícola de las viñas el 30/09/2007 en la loma, del bajo y del plano en Raimat.

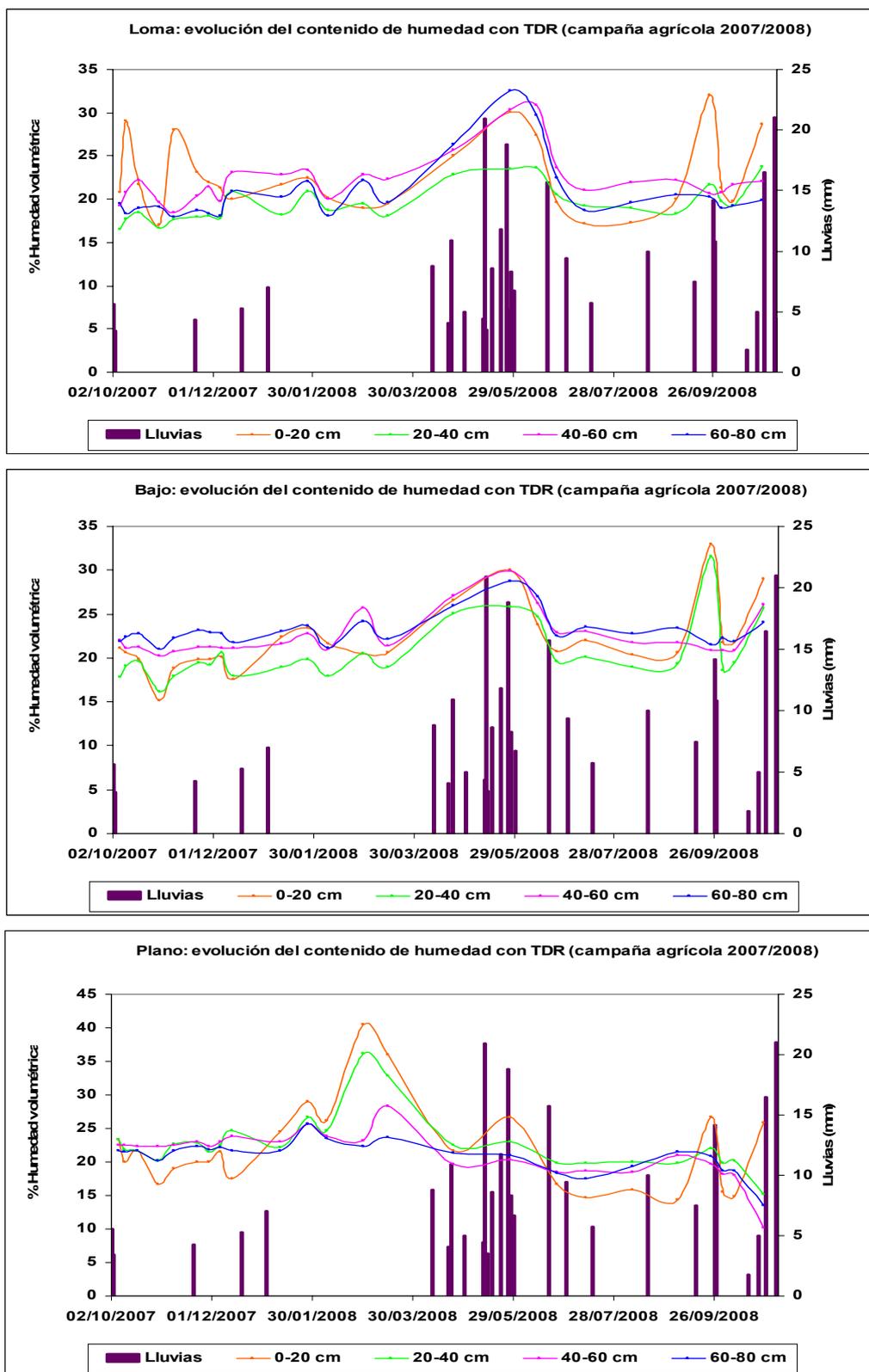


Fig. 20. Evolución del contenido de humedad volumétrica del suelo con las lecturas del TDR desde el 2/10/2007 al 30/10/2008 de las viñas de la loma, del bajo y del plano en Raimat.

Durante el período de otoño, con disminución de riegos y hasta que éstos finalizaron en post cosecha, (Fig. 20) hubo más agua acumulada en las capas de mayor profundidad del perfil, coincidente con el periodo de octubre a marzo, en que se redujo el consumo del agua por el cultivo y la planta perdió su follaje entrando en un período de latencia. En el estadio de caída de hojas se aplicaron puntualmente algunos riegos para acumulación de agua en el suelo para la próxima campaña, observándose un máximo en dicho período, donde se halló mayor contenido de humedad en muestras superficiales de L que en las de profundidad.

Desde julio, hasta agosto e inicios de septiembre el año 2008, de igual modo que en la campaña anterior, se halló una disminución y menor contenidos de humedad en el espesor de los 20 cm superficiales, por la mayor demanda hídrica del cultivo y temperaturas más elevadas que incrementaron las pérdidas por evapotranspiración (Fig. 20).

A fines de septiembre y octubre de 2008, luego de la cosecha, las viñas recibieron riegos. Éstos demoran el inicio de la defoliación, favoreciendo la actividad fotosintética de las viñas y la producción de reservas de carbohidratos necesarios para el próximo ciclo del cultivo, como citaron Williams et al. (1994). Dichos riegos provocaron los últimos incrementos de humedad, hallados con mayores contenidos de 0-20 cm de espesor para las tres situaciones. Una restricción inmediata de la disponibilidad de agua en el suelo después de la vendimia, no es adecuada pues evita la acumulación de reservas y reduce la fase de crecimiento de raíces que se da en este período del ciclo de las cepas, recomendándose el riego después de la vendimia, cuando las necesidades de las cepas no son cubiertas con las lluvias otoñales (Salazar & Hernández, 2005).

4.6.2. Reflectometría en Dominio de Frecuencia (FDR)

Se realizaron los registros de humedad del suelo con FDR en continuo (con datos horarios) de los tres sitios evaluados y en cada caso, se verificó la relación de éstos con la humedad volumétrica de cada profundidad del suelo. Para ello, se inundaron los sitios donde se instalaron las sondas para comprobar si existía coincidencia de los valores máximos en condiciones de saturación, capacidad de campo y mínima humedad del suelo alcanzada.

En L hubo una buena concordancia entre los datos obtenidos de humedad del suelo con el FDR, por lo cual no fue necesario calibrarlos. En B y en P en cambio se observó que al encontrarse el suelo en condiciones de saturación o capacidad de campo, los datos obtenidos con el FDR no reflejaron dichas situaciones, por lo que se corrigieron y calibraron los resultados en ambos sitios.

Para ello, durante el período de noviembre de 2007, coincidente con períodos de baja evapotranspiración de la viña y con el suelo en condiciones de baja humedad, se lo llevó a saturación en campo. Luego de 48 horas de drenaje libre del agua del suelo y evitando pérdidas por evaporación, se obtuvo la CC. Se compararon los registros obtenidos de la unidad de memoria (datalogger) y los de humedad del suelo muestreados con la barrena, con ambos pares de valores (n: 28) la correlación obtenida fue de $r: 0,9975$ ($P < 0,0001$). Con estos nuevos datos se aplicó una regresión con un ajuste lineal de $y = 0,001x - 0,314$, ver figura 21, obteniéndose un $r^2: 0,994$ ($P < 0,0001$).

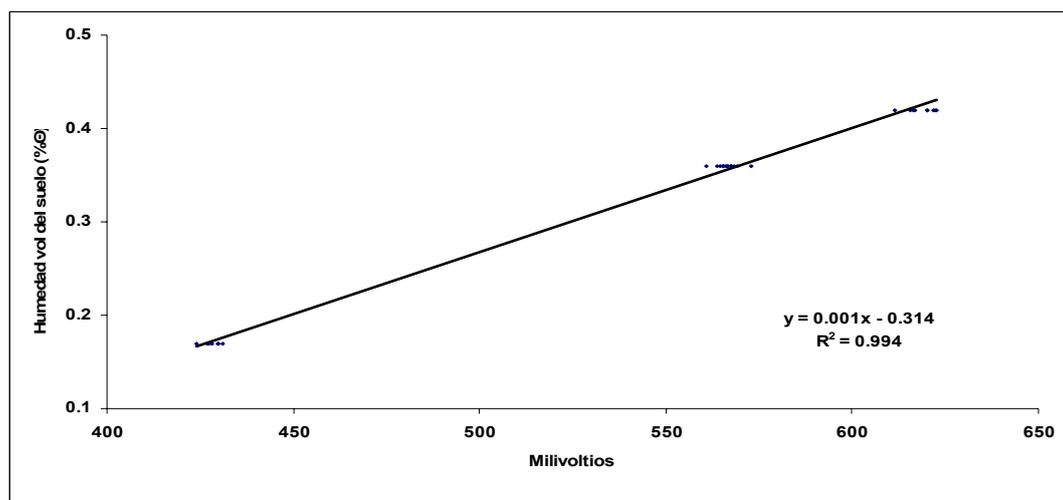


Fig. 21. Ecuación de regresión obtenida con las lecturas del FDR (milivoltios) y los contenidos de humedad volumétrica del suelo, obtenidas de datos de humedad gravimétricos y de densidad aparente por el método de excavación en las viñas del bajo en Raimat.

Con esta nueva ecuación, se corrigieron los valores de humedad del FDR, ajustándose a los registros de humedad volumétrica del suelo, determinados en el campo oportunamente (Fig. 22). Como puede verse en dicha figura, se inicia con el FDR sin calibrar con valores inferiores al punto de marchitez (cerca de $0,10 \theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) con un cultivo de viña supuestamente seco. El 8 de noviembre los valores de la curva sin calibrar alcanzaron la condición de marchitez (PM) cercana al PMP y el 10 de noviembre no se llegó a CC. Sin embargo, en ese momento el suelo barrenado, se encontraba en condiciones de saturación con contenidos de $0,41 \theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Al aplicar la corrección obtenida con la ecuación de regresión antes mencionada, se inició con datos similares a los de condición marchitez ($0,17 \theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) luego de humedecer el suelo buscando provocar la condición de saturación (obtenida el día 10 de noviembre) la curva del FDR corregida, se aproximó al dato de suelo saturado ($0,40 \theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) arribando posteriormente a humedad a CC ($0,36 \theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

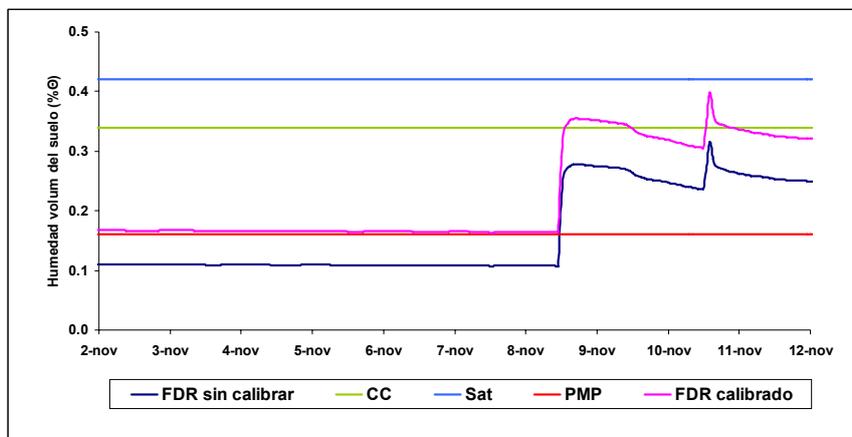


Fig. 22. Resultados obtenidos con el FDR sin calibrar en el bajo de Raimat, y luego de su calibración en campaña.

Con los datos de las sondas de FDR, de cada sitio en las tres profundidades evaluadas: 30, 50 y 70 cm de profundidad, y para una profundidad efectiva de raíces de 80 cm en L, se obtuvo la evolución del contenido de humedad del suelo de la campaña de la viña 2006 al 2007 (Fig. 23.a). Los datos de dicha figura se inician en marzo de 2007, fecha en que se estabilizó el suelo luego de instaladas las sondas y en la que se iniciaron los registros de humedad. Desde el 8/5/2007 hasta 15/8/2007 se aplicaron 363 mm ha⁻¹ de riegos. Los valores se iniciaron con 210 mm y las lluvias elevaron los contenidos de humedad (a más de 250 mm) manteniéndose dentro del intervalo de agua aprovechable para las plantas. Los valores fluctuaron entre marchitez y CC, alcanzando en los máximos o “picos” de la curva el intervalo de saturación. Luego del estadio de “granos de guisante” (15/6/07), se arribó a unos 200 mm nuevamente. El último pico de contenido de humedad fue en “envero” (04/08/07), llegando el suelo a saturación, con 63 mm ha⁻¹ aplicados desde el 31/7/07 al 5/8/07, perdiendo humedad posteriormente a medida que transcurrió el tiempo, retornando nuevamente a la condición previa, pero siempre por encima de marchitez. En la Fig. 23.b se presenta la evolución del contenido de humedad del suelo, por cada profundidad en que se instalaron las sondas FDR. En este caso el agua que ingresó al perfil no fue suficiente para que se detecte drenaje interno.

En B (Fig. 24.a) se iniciaron los registros a finales de marzo de 2007 con 188 mm en un perfil de suelo de 70 cm de profundidad superando la CC con lluvias y riegos aplicados. Con riegos posteriores y sucesivos, se llegó en “inflorescencia separada” a saturación (25/4/2007). Luego del último pico del 05/06/2007 en la etapa de “cuajado o granos de arroz”, los mayores contenidos de agua del suelo fueron detectados por Cuevas et al. (1998) en el estado que comprende desde la etapa de “floración” a “envero” (de mediados de Mayo a Julio) cuando las necesidades hídricas de los viñedos alcanza aproximadamente el

48% del total y que Allen et al. (1998) lo calcularon en un 30%. Al aumentar la viña el consumo de agua, y por la falta de lluvias en verano, el suelo llegó a valores de 157 mm de agua en el periodo de la vendimia. En la Fig. 24.b se presenta la evolución del contenido de humedad del suelo por profundidades y los cinco eventos de drenaje interno del suelo detectados con el lisímetro. Por fallas en sistema de medición no se obtuvo la cantidad drenada con exactitud pero se detectaron con precisión las oportunidades en que hubo drenaje interno del perfil, coincidentes con los mayores contenidos de humedad del suelo.

En P (Fig. 25.a) con riego por aspersión, en un suelo de mayor profundidad efectiva de raíces (90 cm), los registros se iniciaron el 31/03/07, con un contenido de humedad de 230 mm, manteniéndose cerca de los 290 mm desde mediados de mayo a mediados de junio. El contenido óptimo de humedad, CC (334 mm) se logró el 16/06/07, fecha posterior a los estados de “floración” y “cuajado”, y hasta principios de julio fluctuó entre CC y saturación. El descenso del contenido de humedad más notorio empezó a partir de agosto, con menores contenidos de humedad de 0 a 30 cm de profundidad (Fig. 26.b), por la disminución de los riegos en la parcela (Tabla IV del Anexo). Los contenidos de humedad disminuyeron aproximándose a valores de deficiencia hídrica del suelo (Fig. 26.a) y solo hubo un registro de drenaje interno del perfil el 2 de julio de 2007 (Fig. 25.b).

En L los registros de valores de humedad del suelo de la campaña 2007-2008 se iniciaron el 1/10/2007 (Fig. 26.a) con 210 mm manteniéndose en contenidos bajos de humedad hasta el inicio de los riegos de fines de marzo y llegando a saturación en la época de brotación. Riegos posteriores de 133 mm ha⁻¹ aplicados desde 23/4/2007 hasta el 11/7/2008 (Tabla V del Anexo) conservaron valores elevados de humedad de la parcela que presentó varios valores máximos que llegaron a CC (272 mm) durante floración, cuajado y granos de guisante. Luego 159 mm ha⁻¹ de riegos que continuaron aplicándose hasta fines de agosto, en “envero” llevaron al suelo a CC. Al restringir progresivamente la disponibilidad de agua desde envero a madurez, Ojeda et al (2004) hallaron que no se afectó el tamaño de las bayas, ni la fotosíntesis y se favoreció la acumulación de azúcares, generando vinos de mesa. El último incremento de la curva (Fig. 26.a) correspondió a dos lluvias (que totalizaron 25 mm) más 11 mm de riego en el período de maduración. En la Fig. 26.b se presenta la evolución del contenido de humedad de las sondas FDR por profundidades donde el suelo no presentó drenaje interno.

En B los registros de humedad se iniciaron el 1/10/2007 (Fig. 27.a) con contenidos bajos de humedad (150 mm). Los riegos se iniciaron el 19/3/2008 aproximándose a CC (252 mm). Desde el 24/4/2008 al 28/5/2008 se aplicaron 19 mm ha⁻¹ y no se regó hasta la época de madurez. El suelo llegó en dos oportunidades a saturación (el 28/06/2008 y el 13/7/2008), como consecuencia de lluvias y riegos aplicados en L que llegaron por escorrentía superficial en la etapa

de “racimo cerrado” y en inicio de “envero” (Fig. 27.a). De este modo quedó cubierto el aporte en el estado más crítico de necesidades hídricas de la vid que se extiende desde “floración” a “envero”, como expresaron Fimbres-Fontes & Lagarda-Murrieta (1985). A pesar del reducido aporte total por riego en B (69 mm ha⁻¹) se contó con un contenido de humedad suficiente para registrarse cuatro eventos de drenaje interno en la parcela (Fig. 27.b).

En P el 1/10/2007 el suelo tuvo 217 mm de agua. Por riego recibió 464 mm ha⁻¹ y los mayores contenidos de humedad del suelo fueron coincidentes con las lluvias de otoño. Desde “floración” a “cuajado” el suelo llegó a CC (fluctuando entre 334-347 mm) logrando óptimas condiciones de humedad un mes antes que en la campaña anterior en dichos estados fenológicos. Luego el suelo se mantuvo con contenidos dentro del intervalo de agua aprovechable durante el verano (Fig. 28.a), aumentando hasta saturación a mediados de agosto, momento en que el suelo presentó el único drenaje interno en dicha campaña agrícola (Fig. 28.b). Estas condiciones son adecuadas para una buena calidad de la producción. Ferreyra, et al. (2002) hallaron que si el aporte de riego es cubierto entre floración y envero, con ligeras deficiencias de agua posteriores al envero, no se ve afectada la calidad del mosto, hallándose mayor acidez total, polifenoles, antocianos y atributos de calidad global del vino.

Para la campaña 2008-2009 se arrancó parte de la viña del plano para la construcción de una carretera y se continuó evaluando los otros sitios. En L (Fig. 29.a) se disminuyeron los riegos a 228 mm ha⁻¹ y se presentan los datos desde el 1/10/2008 con 200 mm. Los riegos a fines de marzo acercaron los contenidos a CC, con buenos contenidos de humedad hasta mediados de junio en la etapa de “racimo cerrado”. Con los últimos riegos, y lluvias de otoño se finalizó con una humedad de 225 mm. Al igual que en las tres campañas anteriores en L no hubo pérdidas por drenaje interno del suelo (Fig. 29.b).

En B también se redujeron los riegos aplicándose 58 mm ha⁻¹ en toda la campaña 2008-2009 (Tabla V del Anexo). En la Fig. 30.a el perfil se inició el 1/10/2008 con 181 mm de agua. Luego fluctuó entre CC y saturación, manteniéndose el suelo en esta situación hasta los primeros días de noviembre en 7 ocasiones con 28 mm ha⁻¹ de riegos aplicados desde el 8 al 25 de octubre y cinco eventos de lluvias. Los 31 mm ha⁻¹ de riegos siguientes, se aplicaron 14 mm ha⁻¹ hasta el 21/5/2009 y el resto hasta el 4/9/2009 (Tabla V del Anexo).

Durante el período de “dormancia o reposo invernal” de la vid no se regó, pero los 115 mm de lluvias, desde octubre a marzo y los riegos aplicados en la loma que alcanzaron el bajo por la escorrentía superficial, mantuvieron el suelo en buenos contenidos de humedad cubriendo las necesidades hídricas, estimadas por Cuevas et al. (1998) como inferiores al 2% del total.

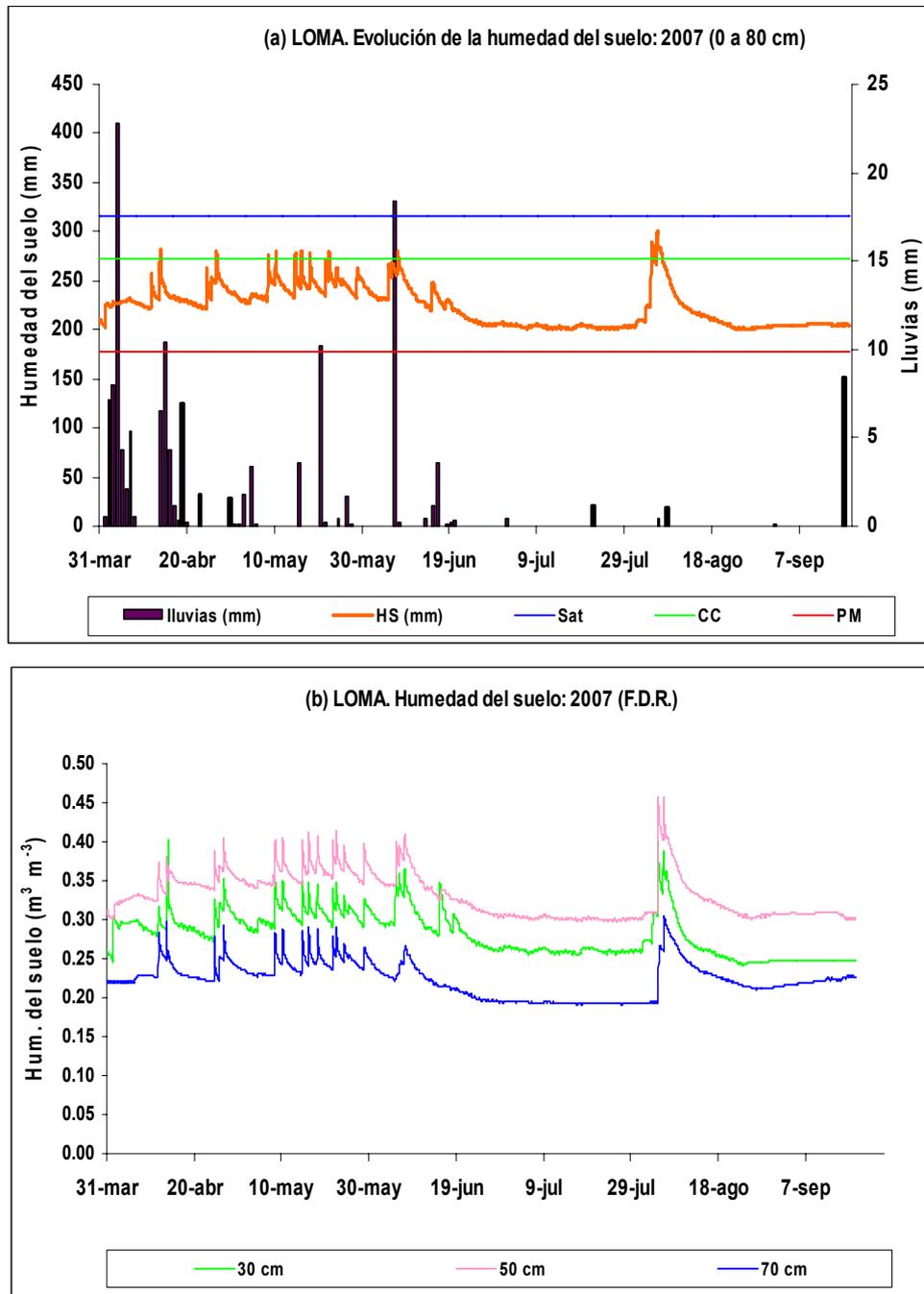


Fig. 23. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 80 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas en la Loma de Raimat de la campaña agrícola 2006/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades durante el período de 31/03/2007 al 28/09/2007.

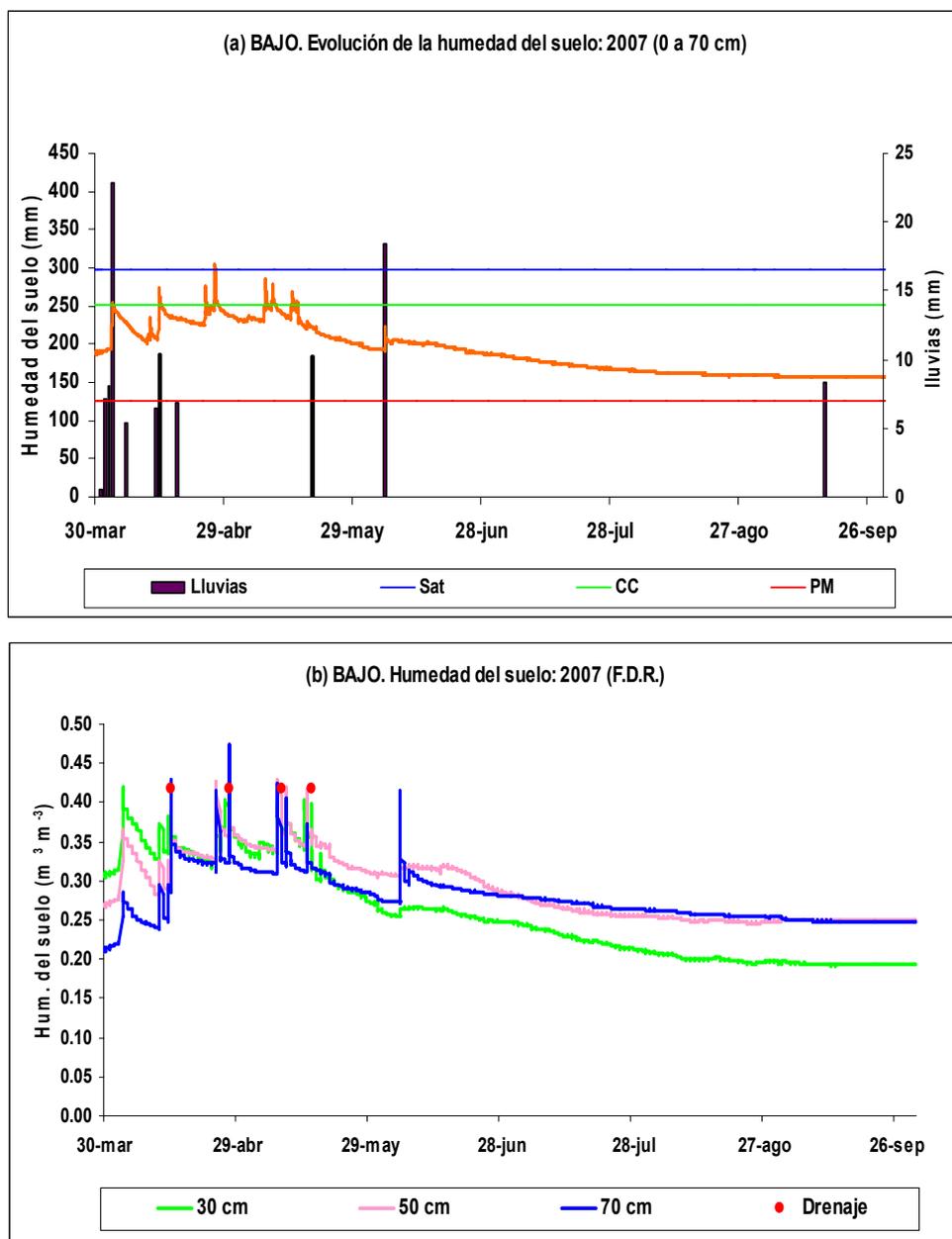


Fig. 24. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 70 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Bajo de Raimat de la campaña agrícola 2006/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y los momentos que se detectaron pérdidas de agua por drenaje interno durante el período de 30/03/2007 al 30/09/2007.

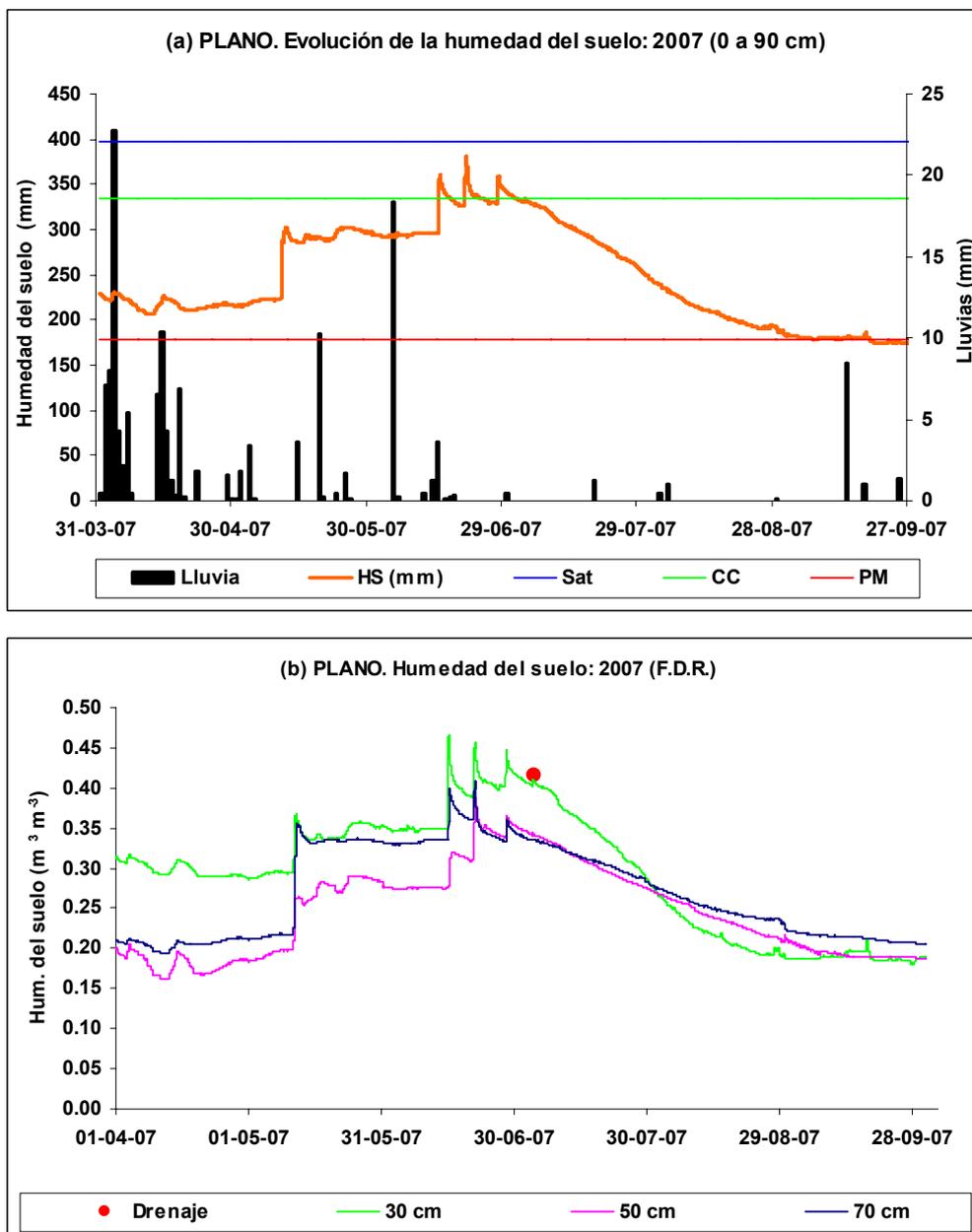


Fig. 25. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 90 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Plano de Raimat de la campaña agrícola 2006/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y el momento en que se detectó pérdida de agua por drenaje interno dentro del período de 31/03/2007 al 27/09/2007.

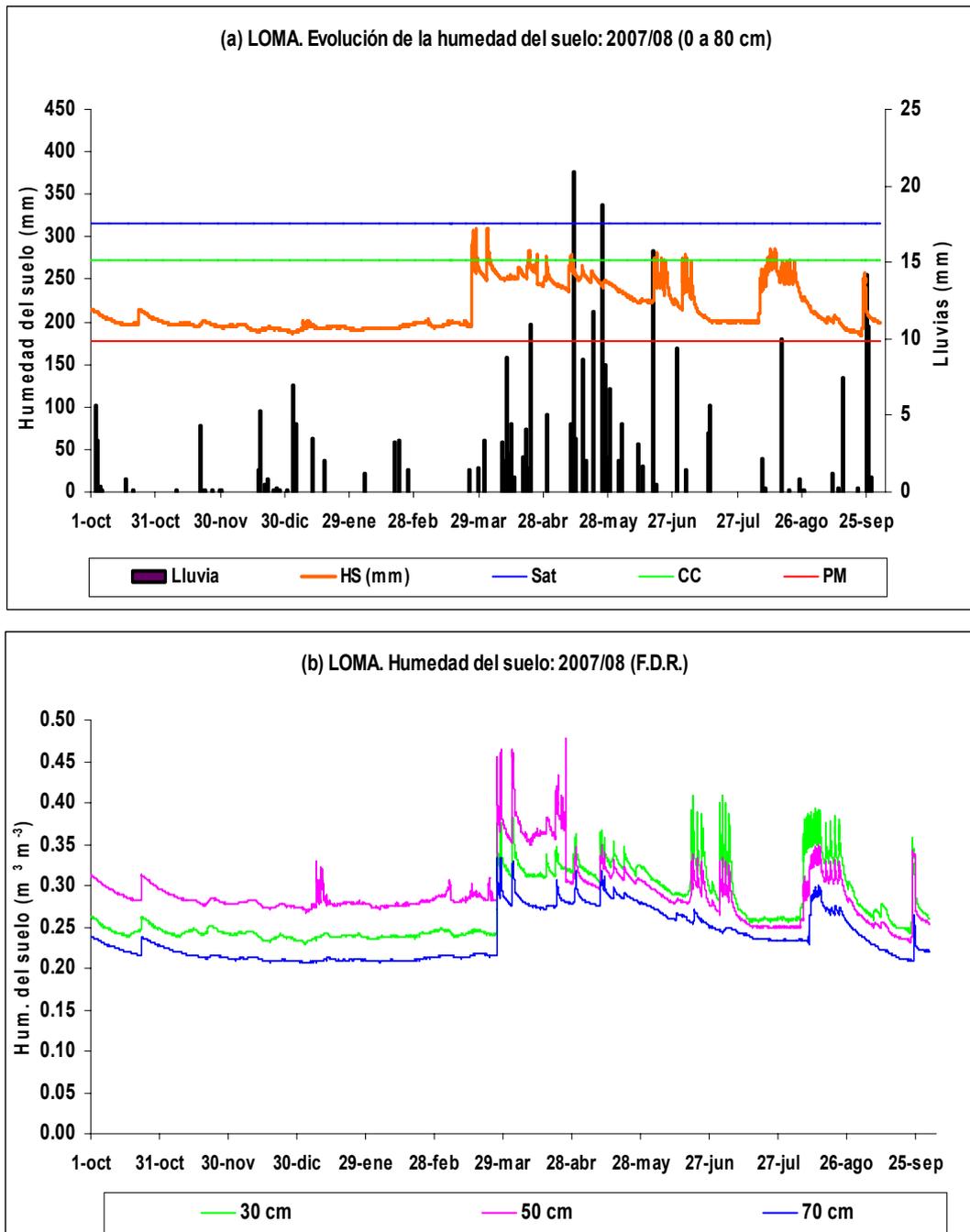


Fig. 26. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 80 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas en la Loma de Raimat de la campaña agrícola 2007/2008. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades durante el período de 1/10/2007 al 30/09/2008.

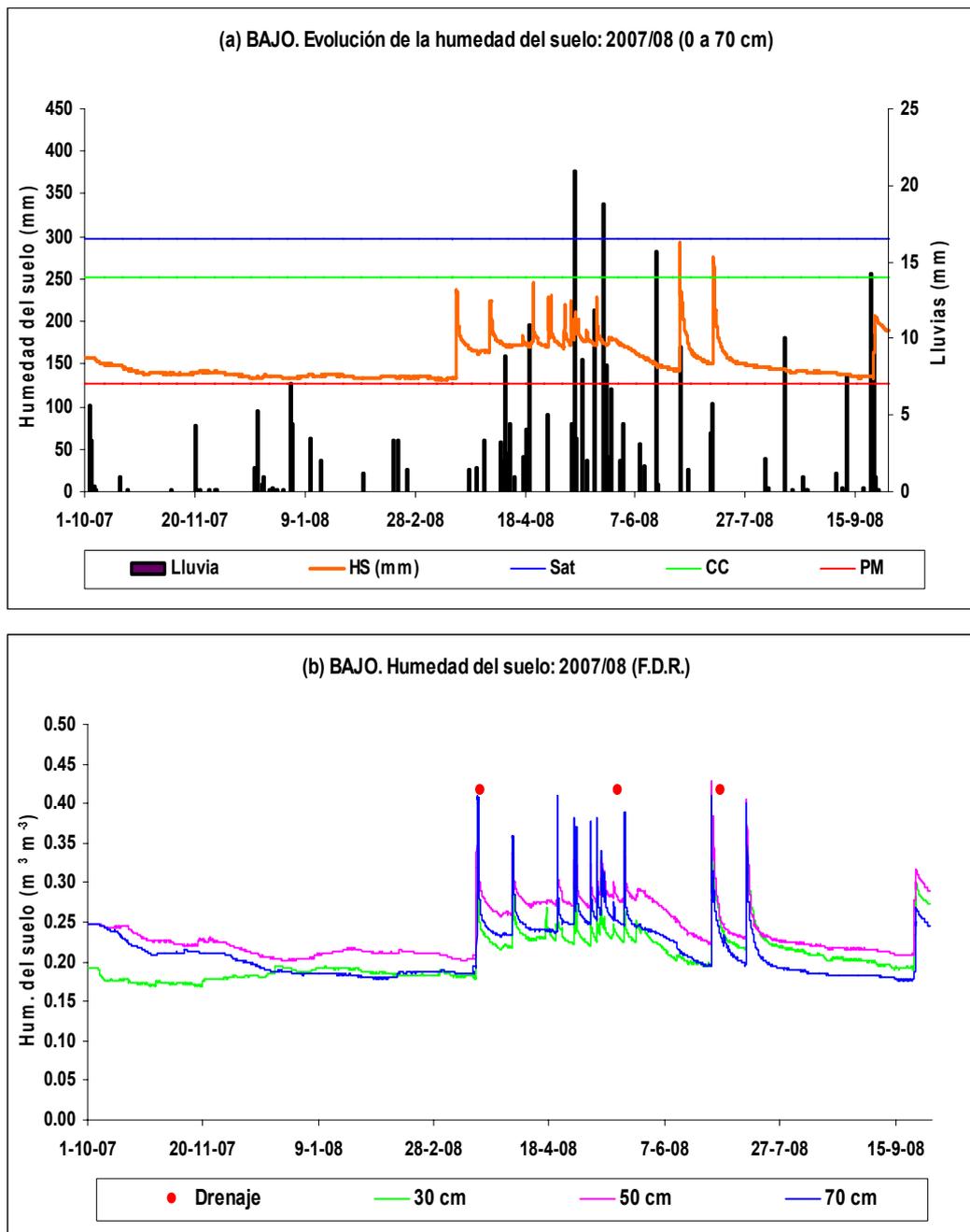


Fig. 27. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 70 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Bajo de Raimat de la campaña agrícola 2007/2008. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y los eventos con pérdidas de agua por drenaje interno durante el período de 1/10/2007 al 30/09/2008.

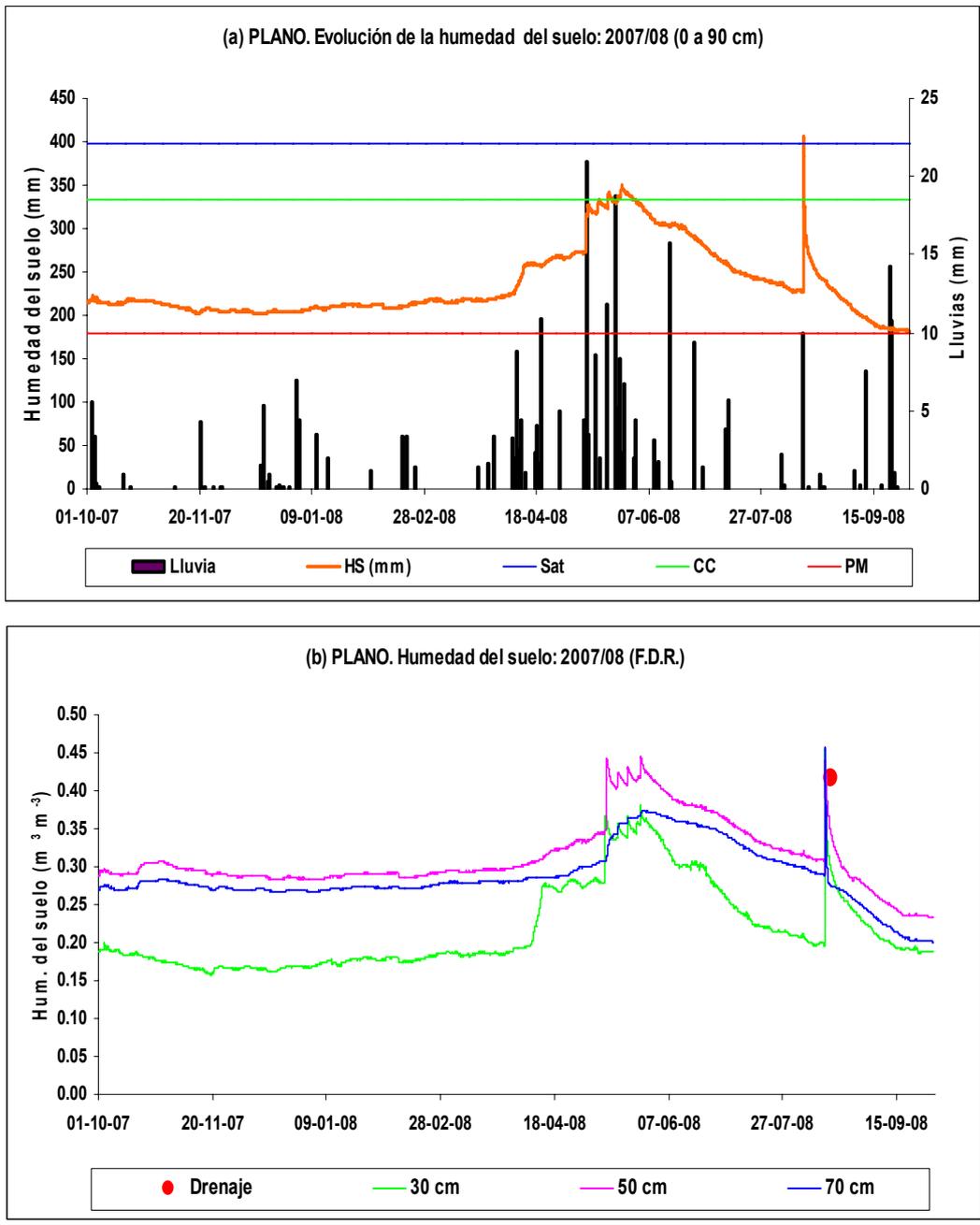


Fig. 28. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 90 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Plano de Raimat de la campaña agrícola 2007/2008. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y el momento en que se detectó pérdida de agua por drenaje interno. Período de 1/10/2007 al 30/09/2008.

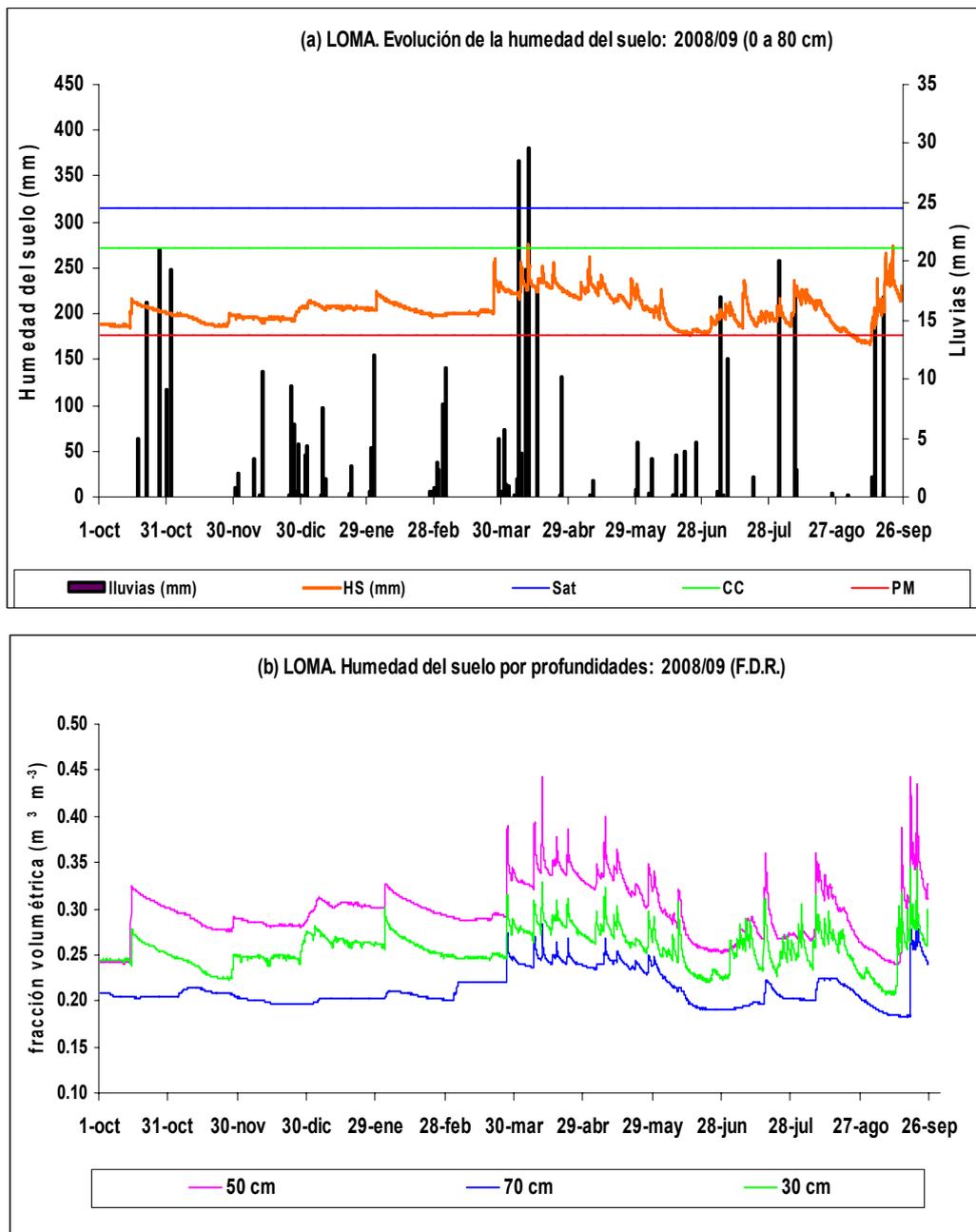


Fig. 29. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 80 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas de la Loma de Raimat de la campaña agrícola 2008/2009. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades durante el período de 1/10/2008 al 28/09/2009.

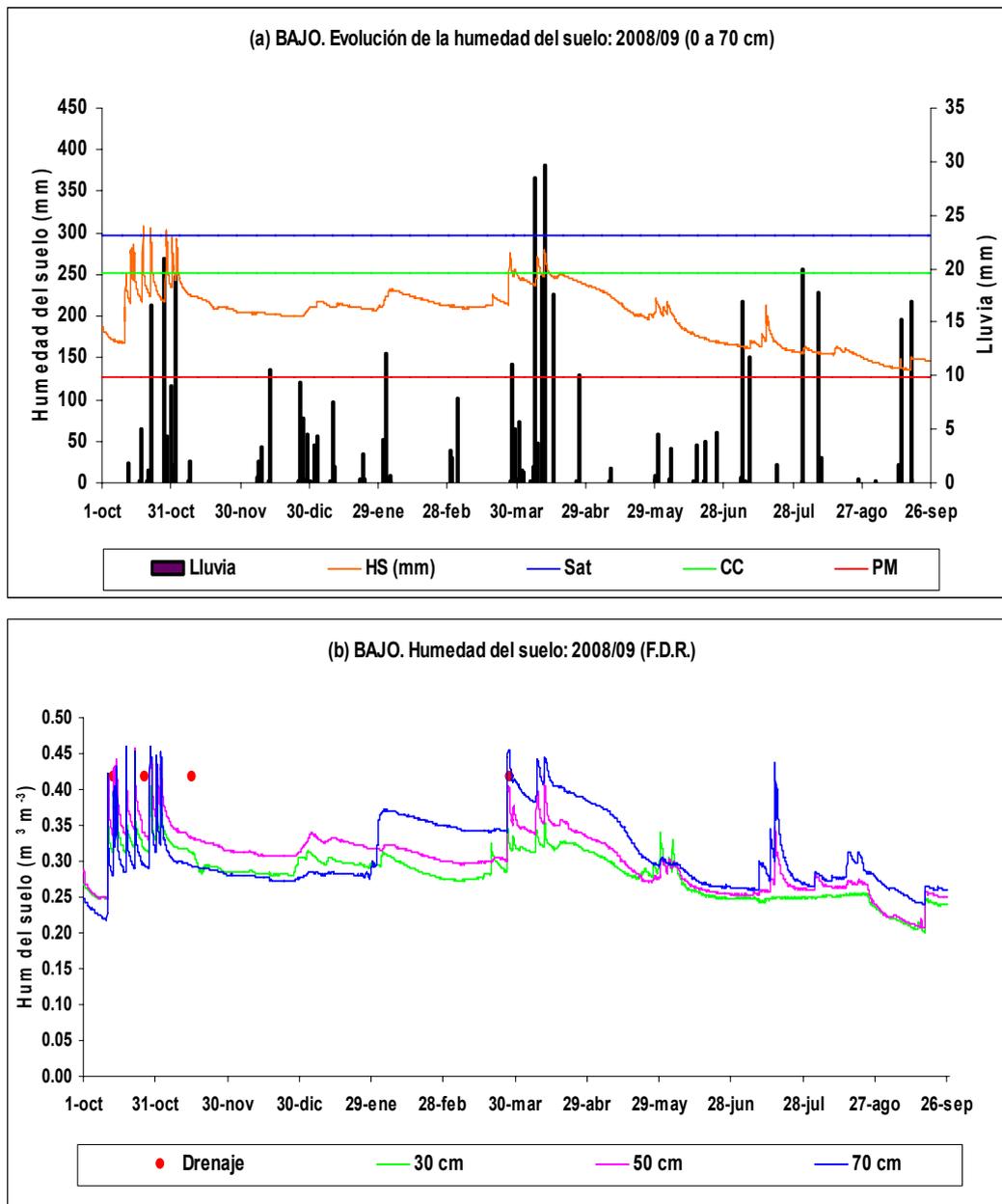


Fig. 30. Evolución del contenido de humedad del suelo (a) humedad ponderada de 0 a 70 cm, expresado en lámina (mm) determinada con sondas FDR ubicadas a 30, 50 y 70 cm de profundidad en el sitio de viñas del Bajo de Raimat de la campaña agrícola 20086/2007. HS: humedad del suelo; Sat: saturación; CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez. En la figura inferior (b) se encuentra el contenido de humedad del suelo por profundidades y los cuatro momentos con pérdidas de agua por eventos de drenaje interno durante el período de 1/10/2008 al 26/09/2009.

En todo el ciclo del cultivo se detectaron 4 eventos de pérdidas por drenaje interno, tres hasta mediados de noviembre y una en marzo (Fig. 30.b). El contenido del agua existente en el suelo durante otoño - invierno fue mayor al 60% del agua aprovechable, finalizando la campaña agrícola con 147 mm.

En general, se podría sugerir para viñas en suelos mediterráneos con diferentes contenidos de piedra y mucha variabilidad espacial en sus propiedades hidráulicas, o donde los horizontes posean propiedades contrastantes emplear métodos de riego basados en el monitoreo con sensores de humedad instalados a diferentes profundidades (como los empleados en el presente caso hasta los 80 cm o más, en la zona de riego). Ya que este cultivo es capaz de seguir consumiendo agua a mayor profundidad, al secarse la porción superficial del suelo superando condiciones de baja humedad del suelo y a que los datos obtenidos pueden ser procesados con rapidez adoptando cambios oportunos en la toma de decisiones de riego a fin de mejorar la producción cualitativa y cuantitativamente.

4.7. Régimen hídrico del suelo

El régimen hídrico del suelo fue simulado empleando el modelo SOMORE (Pla, 1997) basado en una descripción de los procesos hidrológicos más relevantes, con el cual se hace un cálculo diario del balance de agua. Dicho modelo se empleó para predecir el efecto de condiciones extremas del clima, de manejo del suelo y sistemas de riego para obtener el régimen de humedad durante el período de crecimiento y desarrollo de las viñas, comprendido desde octubre de un año determinado, hasta septiembre del siguiente. Las condiciones estudiadas fueron: plano (P) con la variedad Chardonnay bajo riego por aspersión y una pendiente menor del 1%; loma (L) con variedad Tempranillo bajo riego por goteo, con una pendiente del 14 al 16% y bajo (B) con la misma variedad y tipo de riego, y una pendiente del 2%.

Las profundidades radicales efectivas usadas fueron: 90 cm para el plano (P), 80 cm para la loma (L), y 70 cm para el bajo (B). Dichas situaciones fueron simuladas en las condiciones de suelo desnudo o con cobertura vegetal, usando datos de lluvias, evapotranspiración potencial, infiltración, conductividad hidráulica saturada, retención de humedad del suelo, y profundidad de enraizamiento efectivo.

La mayoría de la información fue obtenida de mediciones realizadas en campo y en laboratorio con metodologías y equipamientos sencillos que permitieron emplear información fiable y de bajo coste (Nacci & Pla, 1993).

Las precipitaciones de Raimat se caracterizan por presentar una distribución con dos períodos de máximas, una en los meses de primavera y otra en otoño, con el período más seco en verano. Debido a la gran variabilidad de las

lluvias en clima Mediterráneo se generan grandes diferencias en la humedad del suelo entre años. El ciclo más seco del cultivo de la vid en la zona (campaña agrícola) fue en los años 1988-1989 con 156 mm para un período de retorno de 21 años. Dado que es importante además del valor total de lluvia su distribución a lo largo del ciclo del cultivo, el 99% de las lluvias más importantes se registraron hasta el 29 de mayo de 1989, sin eventos en verano (1 mm). Del total, el 27% ocurrieron en el otoño (43 mm), el 19% en invierno (30 mm) y el 53% en primavera (82 mm). Solamente 4 eventos fueron mayores de 10 mm y la mayor parte de las lluvias totales el 67% (104,6 mm) ocurrieron entre el 23 de febrero y el 29 de mayo de 1989.

Los años más húmedos considerados correspondieron a la campaña agrícola 1996-1997 con 656 mm anuales, con una buena distribución de precipitaciones a lo largo de dicho período. El 33% de las precipitaciones (215,7 mm) se presentaron en otoño, el 19% en invierno (123 mm), el 23% en primavera (148 mm) y el 26% en verano (169 mm), con 21 días de lluvias mayores a 10 mm. La máxima lluvia de la campaña agrícola de 57,8 mm, ocurrió al inicio de ésta, el 14 de octubre de 1996.

La campaña agrícola con precipitaciones que correspondieron al promedio de lluvias de la zona fue la 1997/1998 con 379 mm, en las campañas 2007-2008 las precipitaciones fueron de 306 mm y la del 2008-2009 de 458 mm. Con el fin de validar el modelo SOMORE (Pla, 1997) se simuló el año 2007-2008 con valores más cercanos al promedio del período de retorno de 21 años, obteniendo el régimen de humedad del suelo simulado y comparándose con los datos monitoreados en campo, hallándose una buena correspondencia entre ambos.

El consumo hídrico de la vid es variable a lo largo de su ciclo de crecimiento y desarrollo (Hidalgo, 1999), y la tasa de evapotranspiración depende la superficie foliar entre otros parámetros. En las simulaciones se usaron coeficientes de consumo (kc) propuestos para viñas bajo riego citadas por Pascual (1994) quien sugirió coeficientes variables según la época del año y acordes a la variación de la humedad del suelo, empleando valores de 0,2 para el período de “reposo o dormancia”. En el estado de “cuajado” se usó de 0,4 a 0,45, de 0,6 desde “cuajado” a “envero”, y de 0,3 después de “envero” (Pascual, 1994; Fregoni, 1998; Brown & Slugget, 2001; Segura & Llanos, 2002). En P con riego por aspersión, se usó para el período de mayor consumo, de junio a agosto, un kc de 1 debido a la cobertura vegetal del lugar compuesta predominantemente por gramíneas.

En las figuras 31, 32 y 33 se presentan el régimen de humedad medido en campo y los resultados de las simulaciones. En éstas, se pudo observar un buen ajuste, con ligeras diferencias en las épocas de riegos.

En la loma se consideró una profundidad efectiva de raíces de 80 cm y una infiltración de $8,2 \text{ mm h}^{-1}$ (Tabla 9) y se presenta con el desarrollo del régimen de humedad en la Fig. 31. Con los riegos y lluvias de fines de marzo y abril aumentaron los contenidos de humedad del suelo acercándose a capacidad de campo (272 mm), entrando en el intervalo entre saturación y CC para mediados de abril, asemejándose a la evolución de los contenidos de humedad del suelo medidos con el FDR.

Al comparar el régimen de humedad del suelo simulado con el medido hubo un buen ajuste hasta fines de mayo. Luego del 18 de mayo de 2008 hubo períodos donde se observaron mayores valores simulados con respecto a los medidos, correspondientes a los máximos de la curva, o “picos” debidas a las aplicaciones de riego. Ello se pudo deber a una mayor escorrentía superficial de riegos y lluvias que la previstas, que se perdieron y no infiltraron al suelo.

Algunos valores máximos hallados en el régimen de humedad medido fueron superiores al simulado, ello pudo deberse a que los sensores de humedad del FDR estaban ubicados en las líneas de los goteros, en cambio, el régimen de humedad simulado por el modelo SOMORE corresponde a un promedio de la humedad del total de la parcela, donde la zona de los bulbos bajo los goteros estaba más húmeda con respecto a las calles. El drenaje interno simulado con el modelo fue de 36 mm y la escorrentía superficial de 7 mm.

Al correlacionar los valores observados con los simulados se obtuvo un $r: 0,939$ ($P > 0,0001$) con un $n = 365$. Al realizar un análisis de regresión entre ambas variables, se obtuvo un $r^2: 0,882$ indicando un buen ajuste del modelo al comparar valores observados con los simulados, donde el 88% de la variación de valores simulados quedó explicada.

En la figura 32 se presenta el régimen de humedad simulado en el bajo con riego por goteo para la campaña 2007-2008, con la más baja infiltración de los tres sitios evaluados ($4,6 \text{ mm h}^{-1}$). El régimen de humedad simulado presentó un comportamiento semejante al medido en el terreno. Desde octubre hasta marzo mostró bajos contenidos de humedad y los comportamientos de ambas curvas fueron idénticos. Con el inicio de los riegos se presentaron valores elevados. A partir del 12 de abril hasta el 27 de junio de 2008, los valores simulados fueron ligeramente mayores que los medidos en el período más húmedo, con las mayores precipitaciones de la campaña y fueron un poco más bajos en el período en que se fue secando el suelo. La condición de saturación no se alcanzó y no se obtuvo drenaje interno de suelo. El 15% de las lluvias se perdieron por escorrentía superficial (45 mm), la mayor parte de ellas entre mayo y junio.

En un análisis de correlación entre los valores del bajo observados y simulados con el modelo SOMORE se halló un $r: 0,919$ ($P > 0,0001$) con $n = 365$. Al aplicar un análisis de regresión el 85% de la variación de los valores simulados

fueron explicados por la variación de los observados, encontrándose un buen ajuste del modelo (r^2 : 0,846).

En el sitio del plano (P) se hizo la simulación para la campaña 2007-2008 de la viña variedad Chardonnay, con una cobertura vegetal que protegía el 80% de la superficie del suelo y bajo riego por aspersión. La infiltración usada fue de 36,4 mm h⁻¹. En la Fig. 33 se presentan la curva de humedad del suelo medida en campo y el régimen de humedad simulado, con las precipitaciones, drenaje interno y anegamiento simulados con el modelo SOMORE. Se observan contenidos de humedad bajos desde el 1 de octubre al 25 de marzo en ambas curvas de evolución de humedad del suelo. Con los riegos y lluvias el régimen de humedad calculado llega a capacidad de campo (334 mm) el 11 de mayo, al igual que las mediciones de humedad, e ingresa en condiciones de saturación entre el 23 y el 27 de mayo cuando se registraría drenaje interno del perfil. Luego hubo un descenso de la humedad simulada en forma progresiva, hasta llegar a mediados de agosto prácticamente a condiciones de capacidad de campo, decreciendo sus contenidos posteriormente y presentando una similitud a los datos medidos en el campo. Al finalizar la campaña hubo un incremento en la humedad simulada como consecuencia de dos eventos de lluvias que totalizaron 25 mm que no alcanzaron la profundidad de los sensores del FDR que se encontraban a partir de los 30 cm de profundidad no obstante, salvo ligeras diferencias se obtuvo un comportamiento semejante entre los valores medidos y calculados por el modelo SOMORE.

Desde el 14 de abril al 16 de julio se observó en el régimen de humedad medido, que la curva presentó leves cambios ante la presencia de lluvias o riegos. En el régimen de humedad simulado, los cambios fueron más abruptos. Esto pudo deberse a que la lluvia puede ser interceptada por la vegetación y parte de ella devuelta a la atmósfera por evaporación. La cantidad de humedad retenida en la vegetación durante las precipitaciones varía de acuerdo a las características de las lluvias, de las especies de plantas y de la densidad foliar, resultando una intercepción de la lluvia del 20 al 30% por pasturas o vegetación baja, según Smithson y colaboradores (2008).

Los cambios de la curva medida fueron más progresivos y “suavizados” que en la curva simulada, por que la cobertura vegetal entre las líneas de la vid interceptó la lluvia y los riegos por aspersión y debido al tiempo necesario para que el agua atravesara los 30 cm de profundidad a la cual se hallaban los sensores de humedad.

En el plano con cobertura vegetal no hubo pérdidas por escorrentía superficial en toda la campaña agrícola, a causa a la elevada infiltración y se simularon pérdidas por drenaje interno 4 mm en mayo de 2008.

En P hubo una estrecha correlación de los valores observados con los simulados ($r: 0,968$; $P > 0,0001$). Para comparar las predicciones del modelo con las observaciones provenientes del campo se aplicó un análisis de regresión hallando un $r^2: 0,937$ indicando una buena validación del modelo.

En los tres sitios analizados se obtuvo una estrecha relación entre los datos simulados con los observados y con ello un buen ajuste del modelo. Con dichas comparaciones, sería posible determinar las tendencias de los regímenes de humedad del suelo a fines de usar en suplencia de agua de riego en momentos críticos para la vid, evaluando consecuencias de manejo del agua de riego y pronosticando riesgos por erosión debidas, en este caso, a la elevada escorrentía superficial, factibles de ser modificadas con prácticas de manejo de suelos.

A efectos de predecir el comportamiento de los sitios ante posibles cambios de la cobertura del suelo, o de las precipitaciones en un año muy húmedo (656 mm), y un año muy seco (156 mm), con y sin presencia de cobertura vegetal, se simularon los regímenes de humedad del suelo que se muestran en las figuras 34 a la 48. En ellas, se observan: la evolución de la humedad del suelo simulado a lo largo de las campañas de la vid, la saturación, la capacidad de campo, el punto de marchitez, las lluvias, las pérdidas simuladas por escorrentía superficial y pérdidas por drenaje interno del perfil.

Loma:

El régimen de humedad del suelo simulado para el ciclo 2007-2008, bajo riego por goteo, con las mismas condiciones de L (Fig. 31) se presenta en la figura 34, pero con el suelo labrado y sin cobertura vegetal. Al recibir el impacto de las gotas de lluvia, el suelo sufriría un proceso de sellado superficial reduciéndose la velocidad de infiltración a $1,8 \text{ mm h}^{-1}$, lo cual provocaría un aumento de escorrentía superficial de las lluvias de la primavera. Por efecto del sellado superficial del suelo, se incrementaría la escorrentía superficial, de 7 mm sin sello a 140 mm, perdiendo de este modo el 46% de las lluvias. Al disminuir la infiltración del agua de lluvia y de los riegos, los contenidos alcanzados de humedad serían bajos y nunca se alcanzaría la capacidad de campo y por ello no habría drenaje interno. La elevada escorrentía superficial y por ende una probable erosión de dicho suelo con 14,6% de pendiente, implica una situación de baja sustentabilidad del agroecosistema, con sedimentación del suelo erodado en las áreas del bajo.

El régimen de humedad del suelo simulado sin aplicaciones de riegos y presencia de cobertura para la campaña agrícola más húmeda con lluvias totales de 656 mm (1996-1997) se presenta en la Fig. 35. A mediados de noviembre se superaría la capacidad de campo (272 mm), y se mantendrían dichos contenidos hasta mediados de febrero. Durante ese período, del 5 de diciembre al 25 de enero, sin consumo prácticamente por la viña se simularon 127 mm de drenaje

interno. Para mediados de abril nuevamente se superaría la CC, bajando progresivamente los contenidos de humedad a través de toda la campaña, terminando el ciclo del cultivo con el 28% del agua disponible y sin deficiencias hídricas ni necesidades de riego. Las principales pérdidas simuladas alcanzaron el 24% por escorrentía superficial (155 mm). Éstas se iniciarían en las condiciones de dicho año con lluvias mayores de 29 mm, como son las de octubre: 58 mm, noviembre 35 mm y diciembre 29 mm y el resto de las escorrentías se concentrarían durante el verano, en junio julio y mitad de agosto (Fig. 35).

En un año como el anteriormente simulado, es muy probable que no se presenten deficiencias hídricas y por lo tanto no se precisen riegos.

El régimen hídrico del suelo para la misma situación del año más húmedo, pero con la formación de sello superficial se presenta en la Fig. 36. En ella se llegaría a valores muy cercanos de capacidad de campo a fines de enero, reduciendo sus contenidos de humedad en forma progresiva y llegando a condiciones deficitarias en humedad para fines de junio y hasta la finalización del cultivo. La primer lluvia del ciclo del cultivo ocurrida el 14/10/1996 con 58 mm tuvo una intensidad de 30 mm h^{-1} , debido a la baja infiltración del sello la mayor parte se perdería por escorrentía superficial. A pesar de la gran cantidad de precipitaciones de dicha campaña dicho sello impediría la entrada del agua, a tal punto que las pérdidas simuladas por escorrentía superficial alcanzarían: 428 mm.

Prácticamente en el período de “desborre”, en la etapa de “floración” y de “cuajado” de la viña solo se tendrían contenidos intermedios del agua útil (inferiores a 220 mm) lo cual afectaría la producción del cultivo. En la situación evaluada, con empleo de riego, esta situación no sería tan grave debido a que se pueden solucionar las deficiencias con aportes de agua en los momentos más críticos pero de igual modo, no dejarían de perderse gran cantidad de agua por escorrentía superficial y suelo por erosión, resultando el sello un factor crítico para asegurar el almacenamiento y recarga del perfil. Con prácticas de manejo de suelo orientadas a reducir la escorrentía superficial y mantener una cubierta superficial se evitaría que la baja estabilidad de agregados (25,6% de agregados mayores de 0,5 mm estables en agua) encontrada en estos suelos con más de 51% de limo (Tabla 2) genere sellado superficial del suelo. El uso de subsoladores evitando el empleo de rodillos o rulos que compactan el suelo superficial contribuiría a una mejor entrada del agua en el perfil.

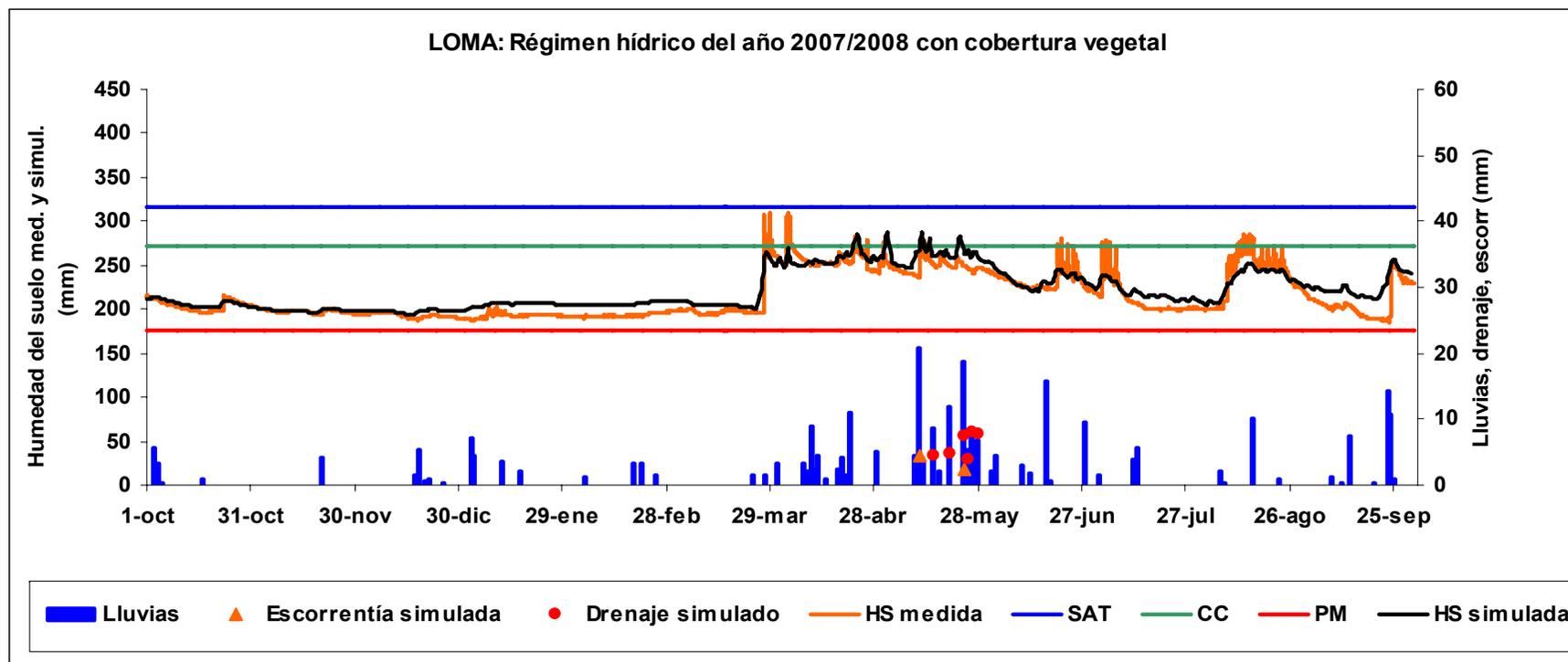


Fig. 31. Régimen hídrico del suelo basado en mediciones horarias con sensores FDR (HS medida: humedad del suelo medida) en la loma (L) de Raimat bajo riego por goteo, y humedad del suelo simulada (HS simulada) determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal y con una profundidad radical efectiva de 80 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 7 mm; Drenaje simulado: 36 mm.

SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

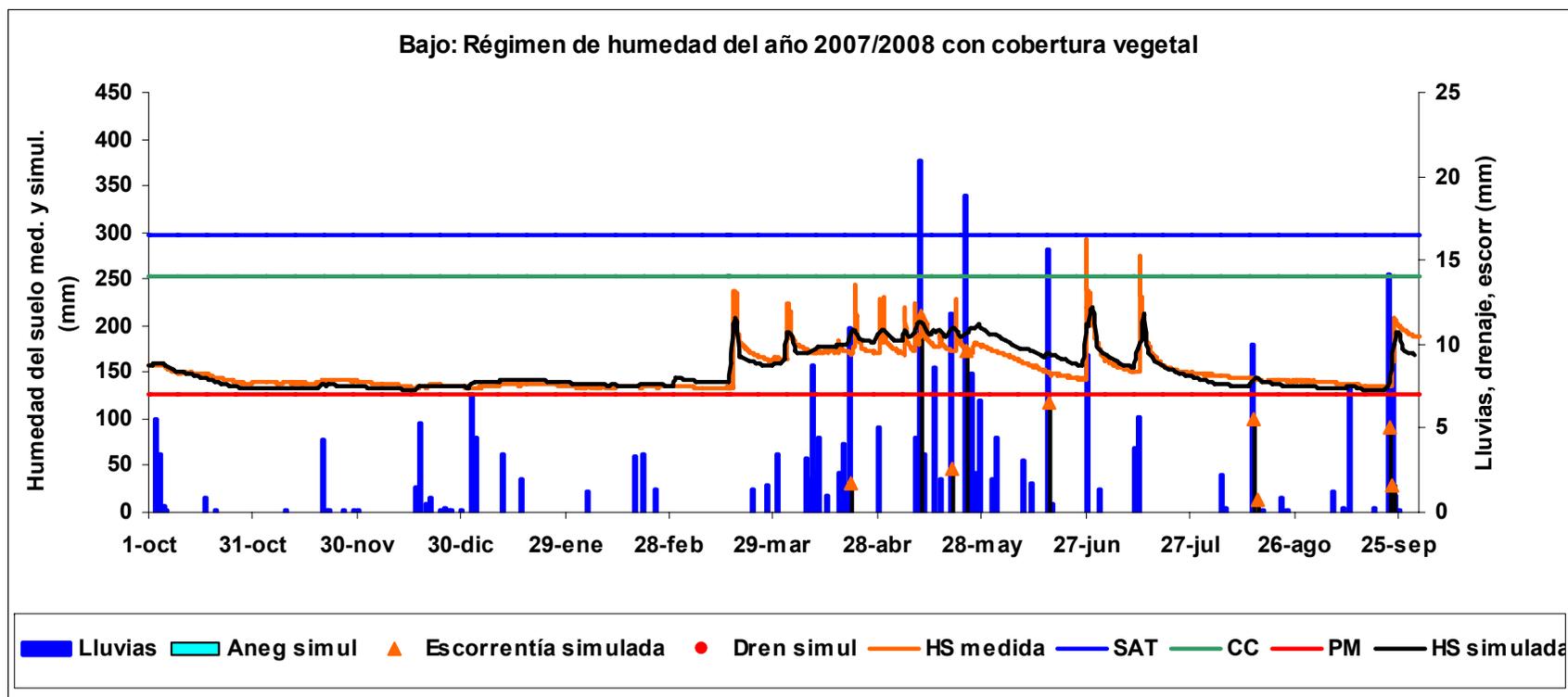


Fig. 32. Régimen hídrico del suelo basado en mediciones horarias con sensores FDR (HS medida: humedad del suelo medida) en el bajo (B) de Raimat con riego por goteo, y humedad del suelo simulada (HS simulada) realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio con cobertura vegetal y con una profundidad radical efectiva de 70 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 46 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

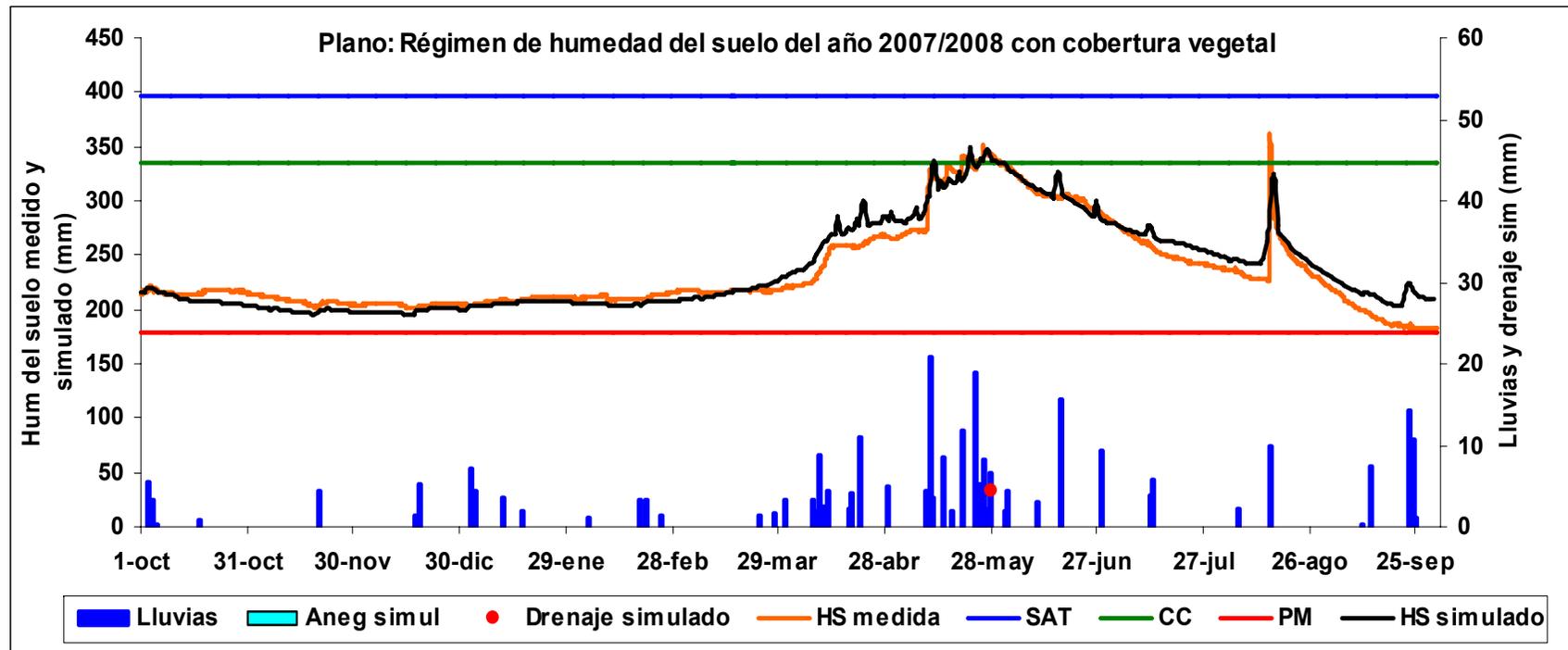


Fig. 33. Régimen hídrico del suelo basado en mediciones horarias con sensores FDR (HS medida: humedad del suelo medida) en el plano (P) de Raimat con riego por aspersión, y humedad del suelo simulada (HS simulada) determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal y con una profundidad radical efectiva de 90 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 0 mm; Drenaje simulado: 4,3 mm.

SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a $-1,5$ MPa); Aneq simul: Anegamiento simulado

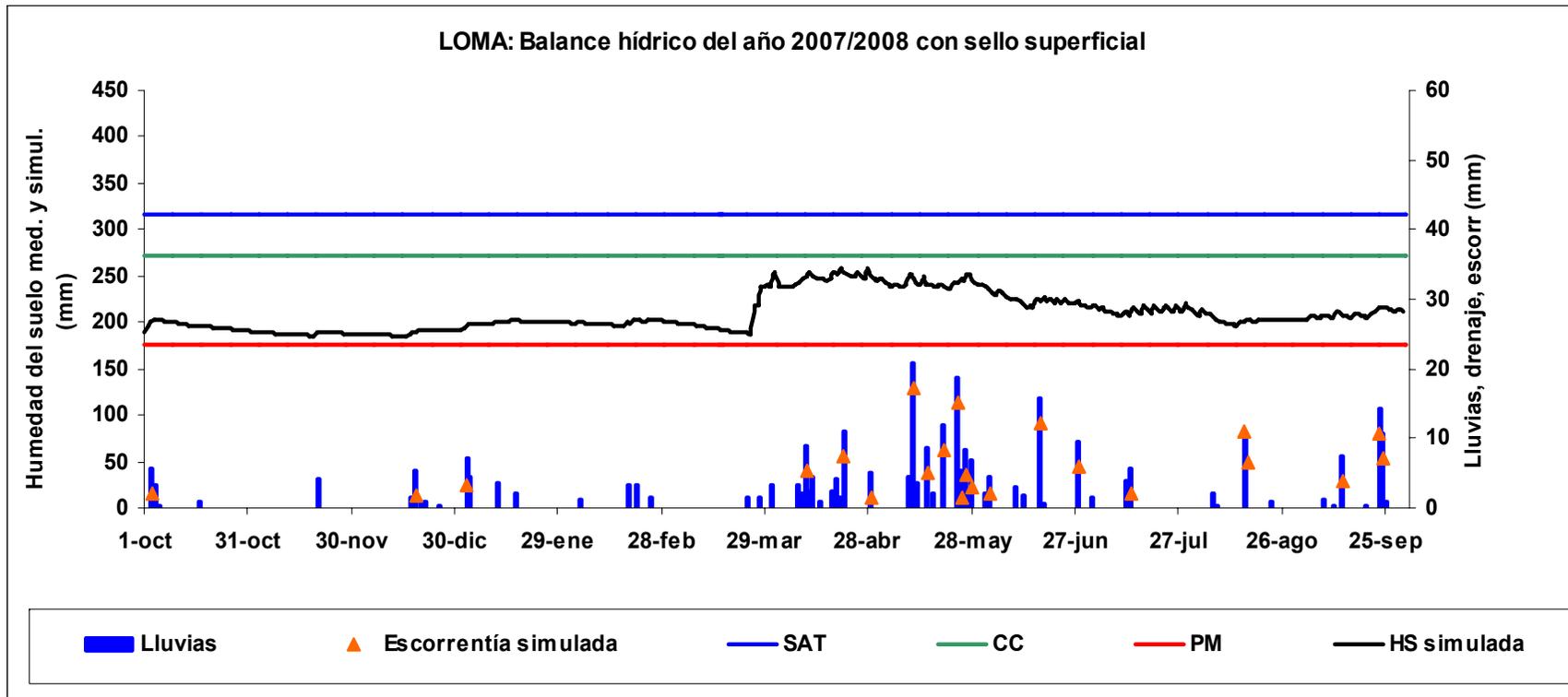


Fig. 34. Régimen hídrico del suelo en la loma (L) de Raimat. Humedad del suelo simulada (HS simulada) determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio y en las siguientes condiciones: con sello superficial, y con una profundidad radical efectiva de 80 cm durante la campaña agrícola 2007/2008. Escorrentía simulada: 140 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

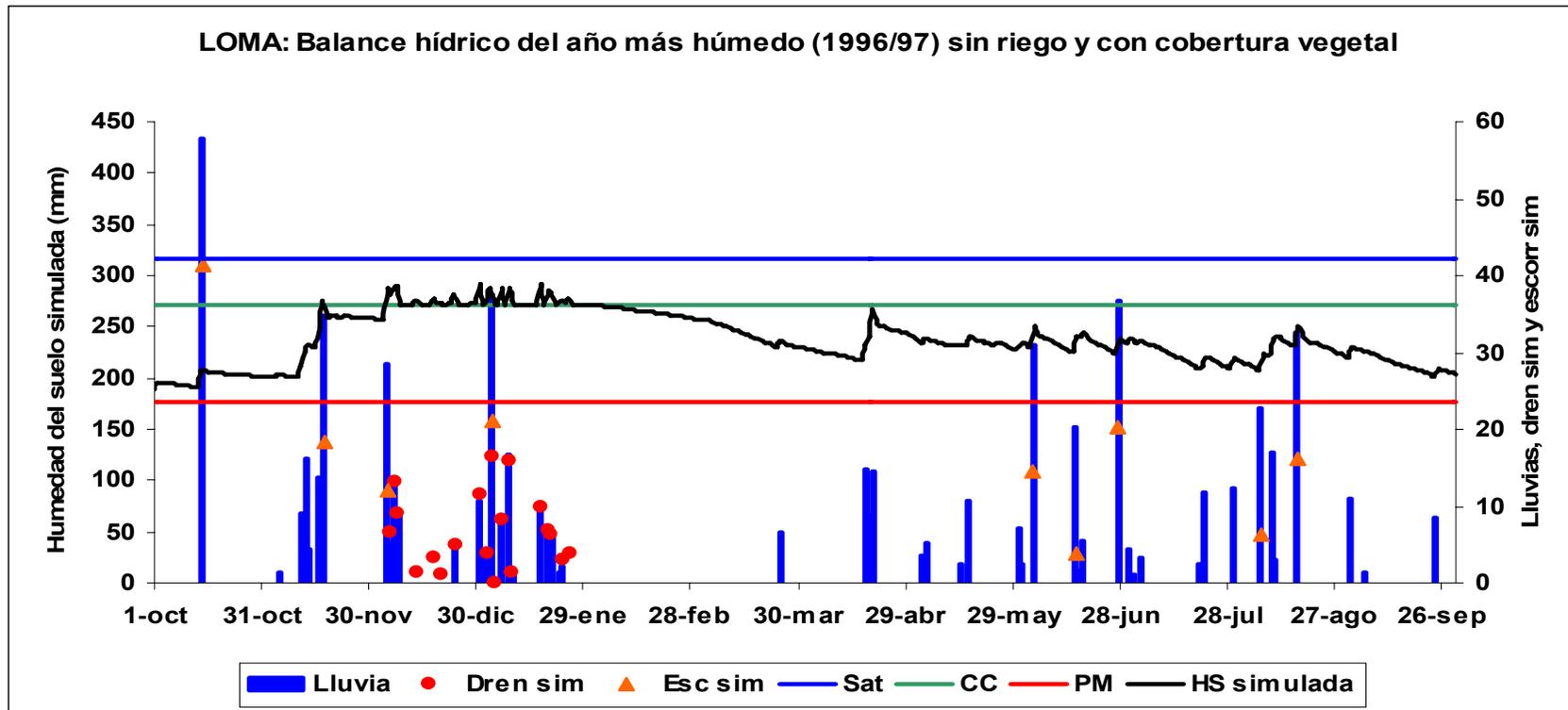


Fig. 35. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm en el año más húmedo (656 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 155 mm; Drenaje simulado: 127 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

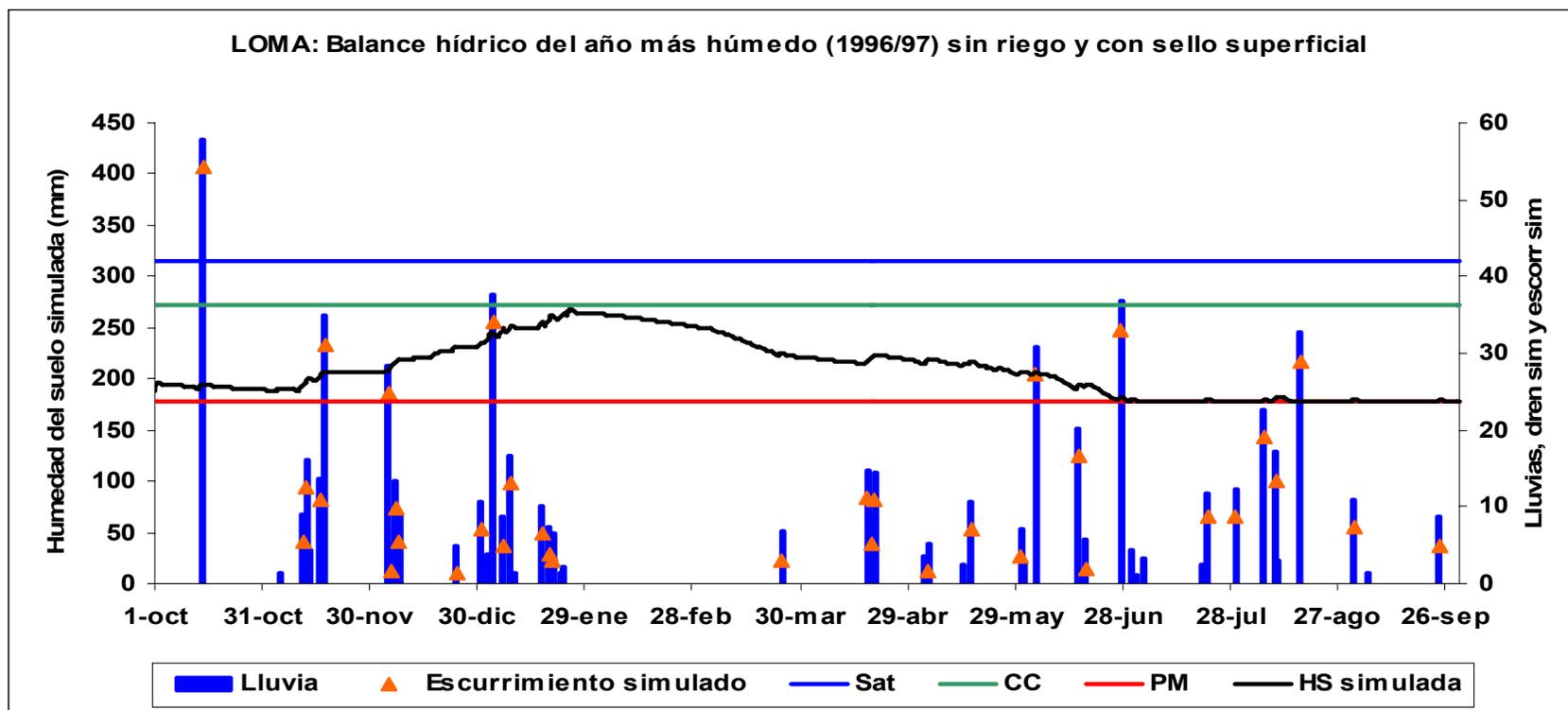


Fig. 36. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada determinada con parámetros del suelo medidos en el sitio y bajo las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm, en el año más húmedo (656 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 428 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

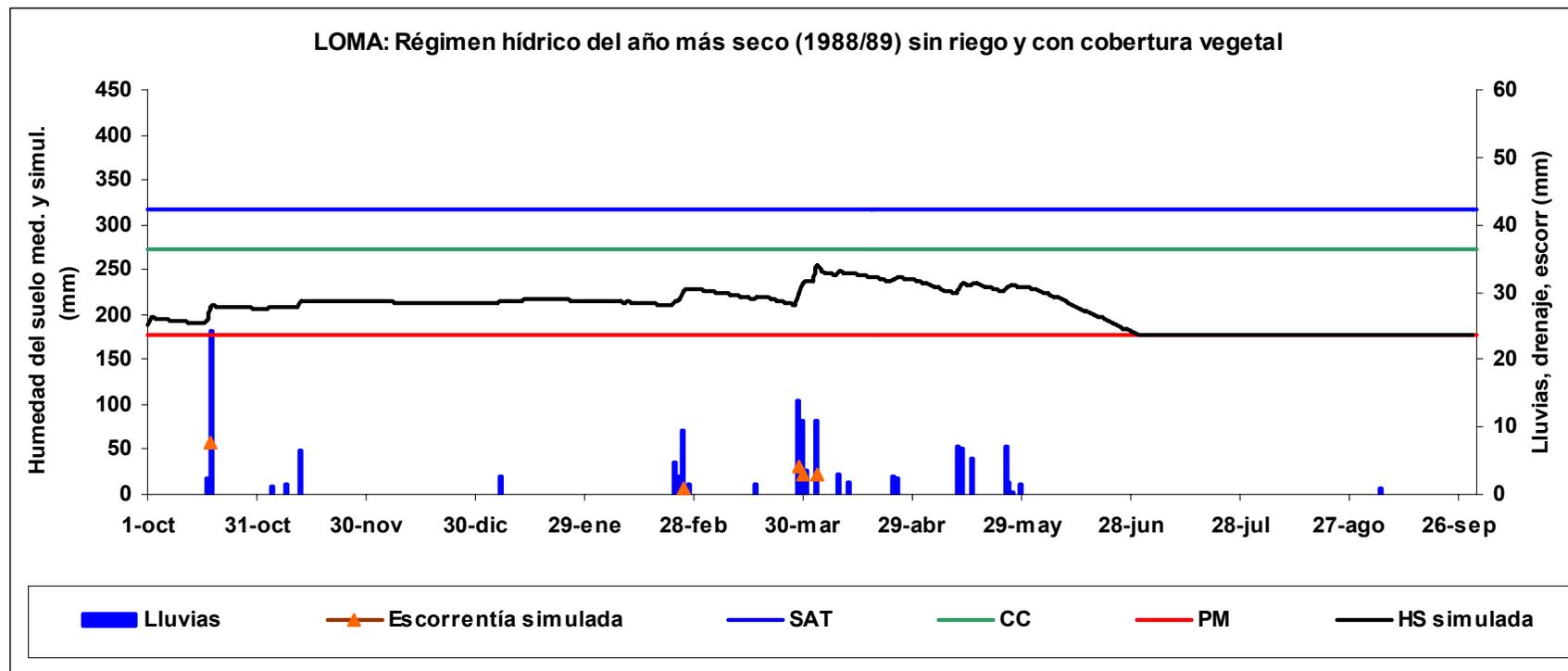


Fig. 37. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm en el año más seco (156 mm) en un período de retorno de 21 años. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa). Escorrentía simulada: 8 mm; Drenaje simulado: 0 mm.

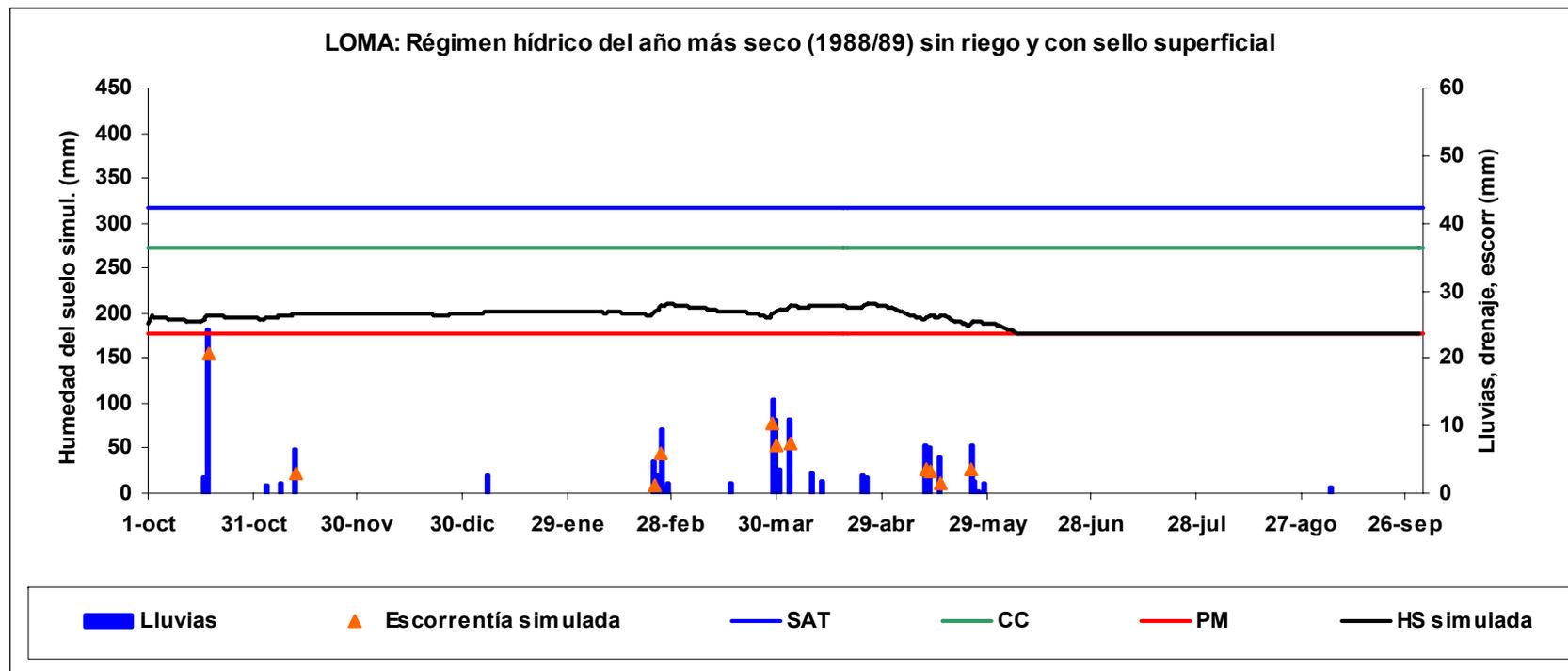


Fig. 38. Régimen hídrico del suelo de la loma (L) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 80 cm en el año más seco (156 mm) en un período de retorno de 21 años. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa). Escorrentía simulada: 67 mm; Drenaje simulado: 0 mm.

Para un año muy seco (156 mm), en L la simulación con cobertura vegetal y sin riego, resultaron con una pérdida por escorrentía superficial 8 mm. Los contenidos de humedad del suelo se mantendrían bajos, con un aporte efectivo de 148 mm, llegando a contenidos intermedios a partir de abril, cuando se coincide con el 67% de los eventos de lluvias (Fig. 37). Posteriormente al disminuir éstos, la humedad iría cayendo y llegaría a condiciones de deficiencias hídricas a partir de julio de 1989 con un verano sin lluvias. Desde el inicio de la brotación y en otros momentos críticos para la vid el suelo presentaría bajos contenidos de humedad.

En el mismo contexto, pero sin cobertura vegetal presentado en la Fig. 38, nunca se llegaría a condiciones de capacidad de campo, por lo que no habrían pérdidas por drenaje interno del perfil. Con la formación de sello se simuló 67 mm de pérdidas por escorrentía superficial, con lo que el 43% de las escasas precipitaciones de esa campaña no entrarían al suelo. En este caso, la humedad del suelo sería insuficiente y probablemente pondría en un grave riesgo a una producción sin aportes de riego, que alcanzaría condiciones de escasez de agua.

Bajo:

En el bajo (B) se presenta el régimen de humedad simulado para el 2007-2008, en el caso hipotético que el suelo no cuente con cobertura vegetal, sin aplicaciones de riegos y una menor infiltración por la formación de sello superficial ($1,2 \text{ mm h}^{-1}$), por lo que los contenidos de humedad en el perfil serían menores, sin manifestarse los valores máximos alcanzados con cobertura ante los eventos de lluvias o riegos (Fig. 39). Desde octubre a febrero, cayeron 50 mm de lluvias y se perderían por escorrentía superficial 19 mm. El máximo contenido de humedad ocurriría a fines de mayo con 177 mm, llegando posteriormente a valores bajos de humedad. Las mayores diferencias halladas serían la escorrentía superficial que aumentaría sin cobertura cuatro veces (181 mm), presentando el suelo muy baja humedad en dicha campaña agrícola bajo tales condiciones.

En años muy húmedos (656 mm para un período de retorno de 21 años) haciendo una simulación sin riegos, el perfil de B presentaría, con el aporte de las lluvias recibidas, una excelente retención de agua desde el 8 de diciembre, próximas a capacidad de campo (252 mm), para ser usadas en “brotación”, seguidas del período de intenso crecimiento vegetativo y desarrollo normal del cultivo (Fig. 40). Al aumentar los contenidos de humedad hasta saturación, a fines de diciembre, se originarían pérdidas por drenaje interno. Hasta febrero inclusive, habría prácticamente óptimas condiciones de almacenamiento de humedad bajando sus contenidos hasta mediados de julio cuando se llegaría a bajos valores de humedad. Lluvias posteriores mayores de 10 mm (de 10 a 32 mm), harían fluctuar levemente los niveles de humedad del suelo hasta llegar a la época de vendimia. Debido a la baja infiltración de este suelo se simularon pérdidas del

41% de las lluvias por escorrentía superficial (272 mm) y 59 mm por drenaje interno que contribuirían a lavar el perfil de excesos de sales.

En la misma situación anterior de B, pero con la formación de sello superficial y con una infiltración más restringida se originarían considerables pérdidas por escorrentía superficial que alcanzarían a 495 mm, resultando una baja efectividad en el almacenamiento del agua del perfil (Fig. 41). Las mayores diferencias entre ambas situaciones se deberían a que sin protección el suelo llegaría a valores de deficiencias hídricas para el 20 de junio, casi un mes antes (25 días) que con cobertura vegetal. En estas condiciones de baja infiltración de agua y grandes pérdidas por escorrentía, superarían al promedio de las precipitaciones de Raimat. Sólo un 25% de las lluvias infiltrarían realmente al suelo y contribuirían a la reserva de agua utilizable por las plantas. A pesar de tratarse del año más húmedo, debido a su sellado y a la gran escorrentía superficial del agua, no se alcanzaría la capacidad de campo, y presentaría elevada erosión y deficiencias hídricas anticipadas.

Para un año muy seco (156 mm), el suelo del B, sin riego y con cobertura vegetal, se presenta en la Fig. 42, iniciando la campaña agrícola con contenidos de humedad intermedios (185 mm). Las pocas lluvias, mayormente de baja cuantía, durante el estado fenológico de “dormancia”, con bajo consumo de agua, conservaría la misma humedad. La mayoría de las lluvias del año, concentradas de febrero a mayo (67%) elevarían ligeramente dichos contenidos, hasta que al aumentar las temperaturas y los consumos del cultivo en junio se irían perdiendo y llegarían a estados deficitarios de humedad a mediados del mismo mes. Por escorrentía superficial se perdería el 15% de las precipitaciones (23 mm), sin presentar drenaje interno.

Al emplear en el modelo la misma condición climática con la variante de la presencia de sello superficial y debido a que las lluvias fueron de escasa magnitud, infiltraron en el suelo manteniéndose la humedad. Como el consumo en el período de “dormancia o reposo invernal” de la vid es muy bajo, durante el invierno no habrían diferencias en el suelo simulado con y sin presencia de cobertura vegetal (Fig. 43). En brotación aumentaría el consumo de agua por la viña y disminuiría la humedad del suelo. Al aumentar la magnitud de las lluvias en primavera (en aproximadamente 10 mm cada una) empezarían a manifestarse pérdidas por escorrentía superficial (84 mm) generadas por el sello superficial que impediría la entrada de las pequeñas y escasas lluvias de ese año. Antes de finalizar la primavera (21/5/89) se llegaría a menores contenidos de humedad en el suelo con sello y sin éste. En ambas situaciones ante tan bajos aportes por lluvias, sería necesario el uso de riego en los momentos previos a brotación, floración y cuajado.

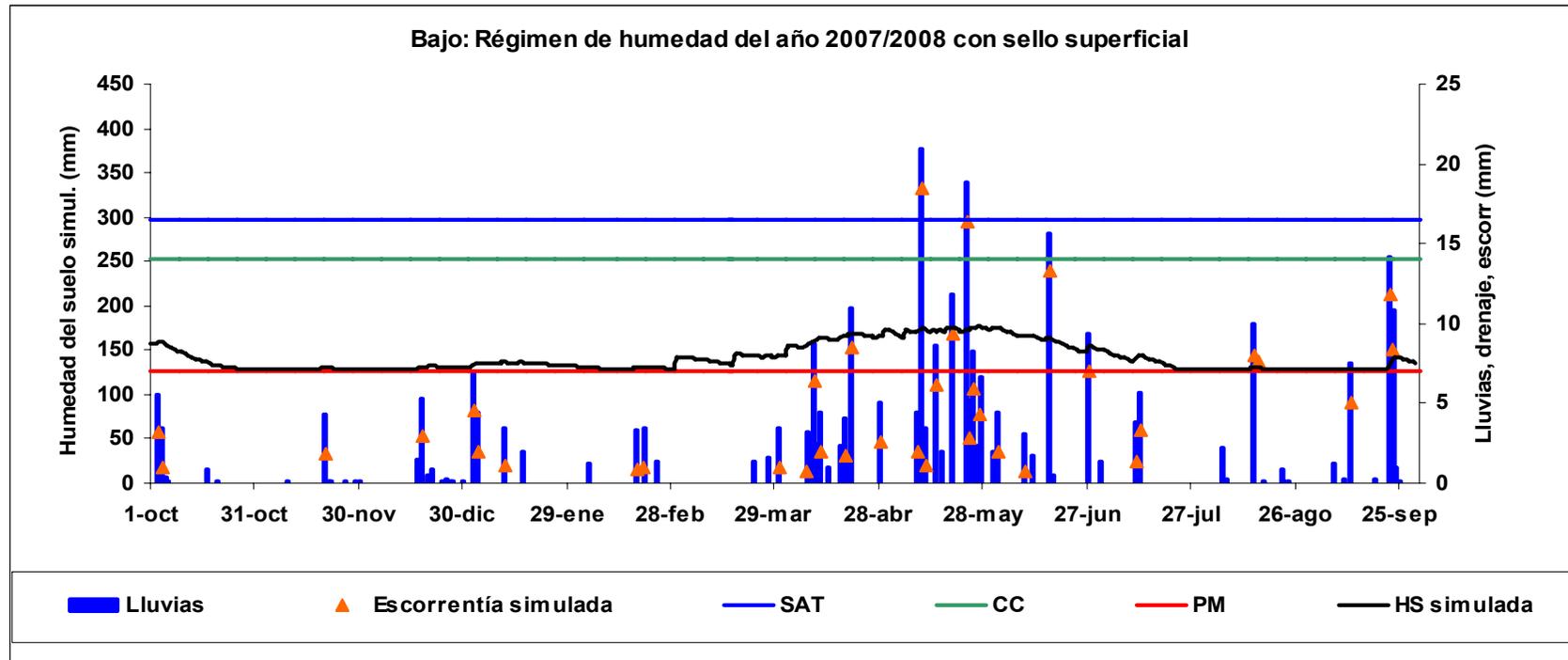


Fig. 39. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: sin cobertura vegetal, con riego por goteo y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año 2007/2008. Escorrentía simulada: 181 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

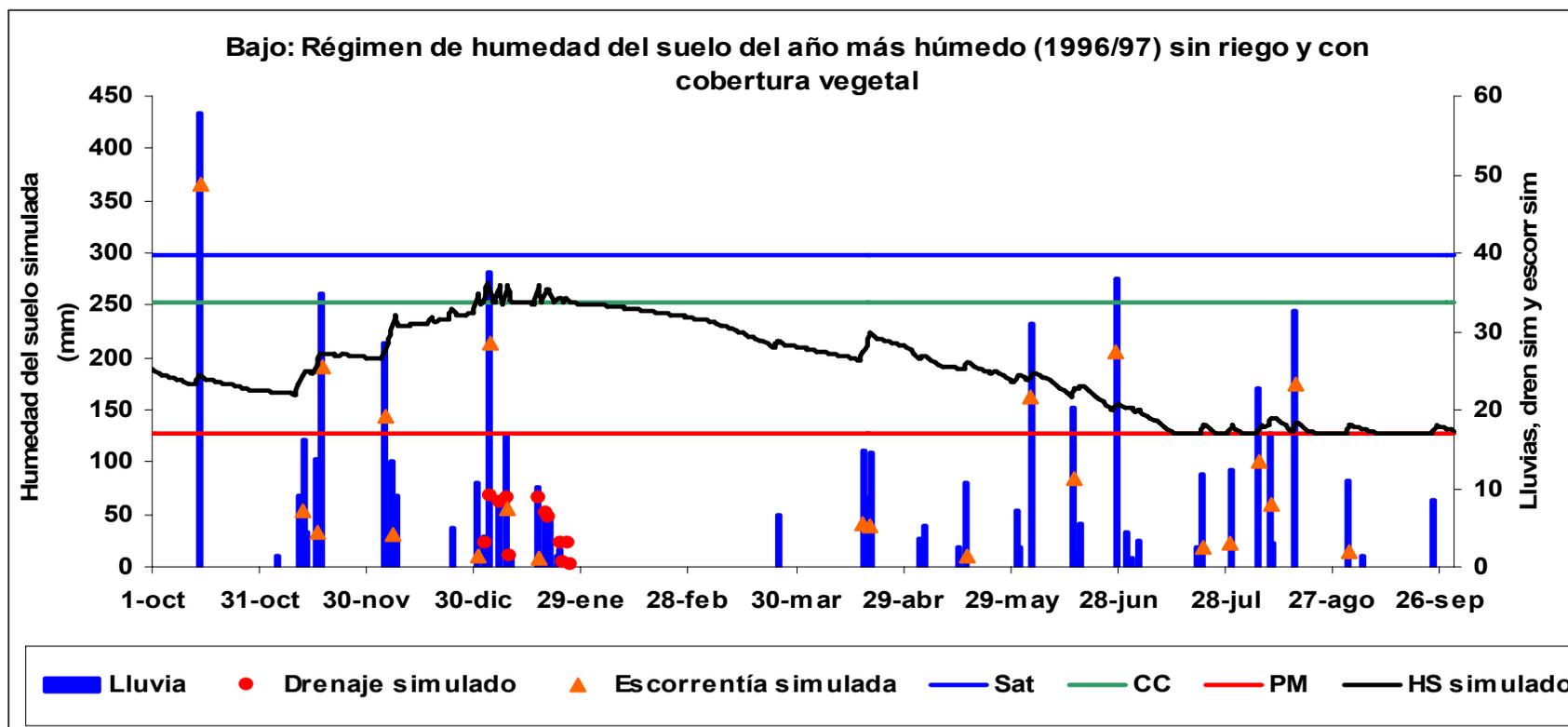


Fig. 40. Régimen hídrico del suelo del Bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más húmedo (656 mm) en un periodo de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 272 mm; Drenaje simulado: 59 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa).

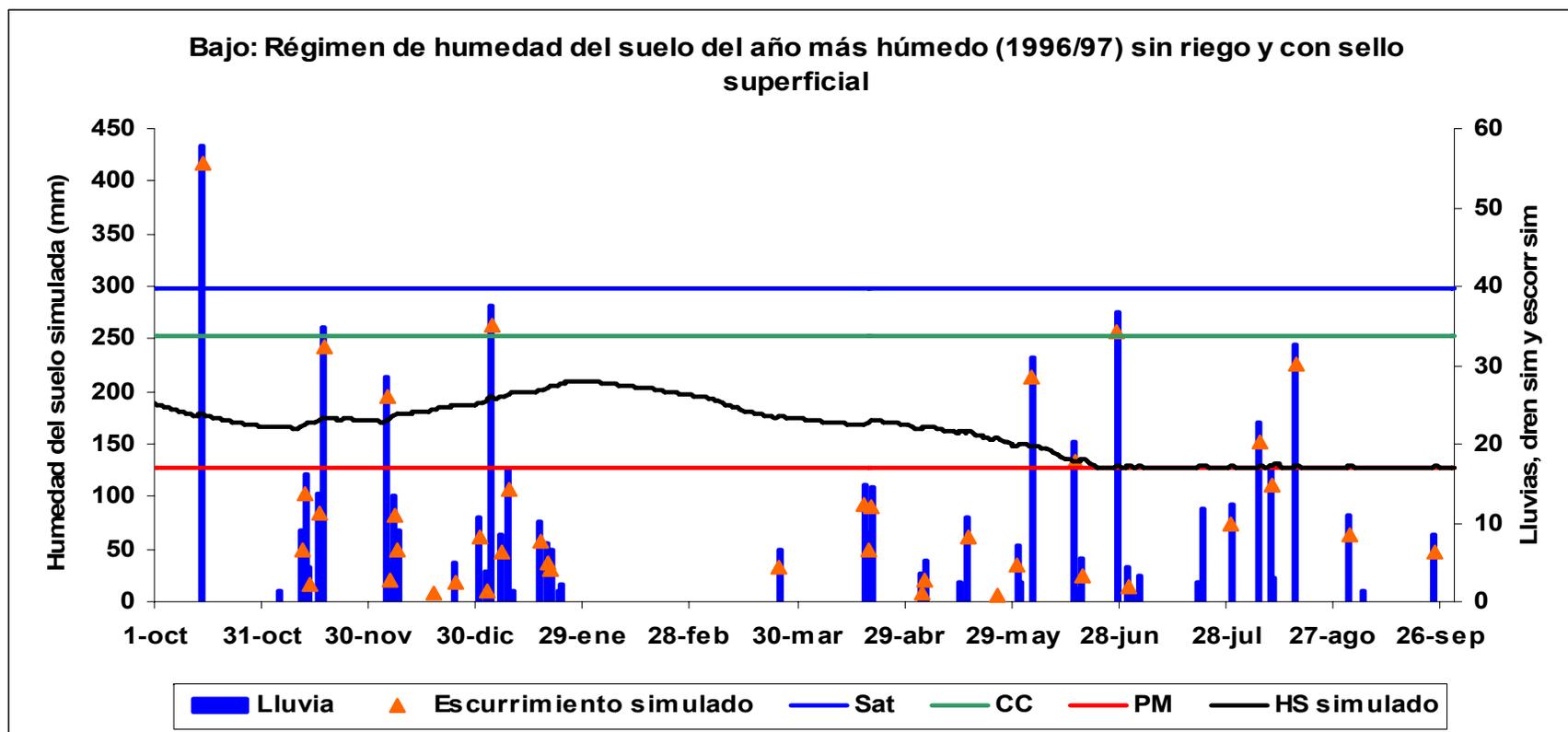


Fig. 41. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más húmedo (Período de retorno 21 años). Escorrentía simulada: 495 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

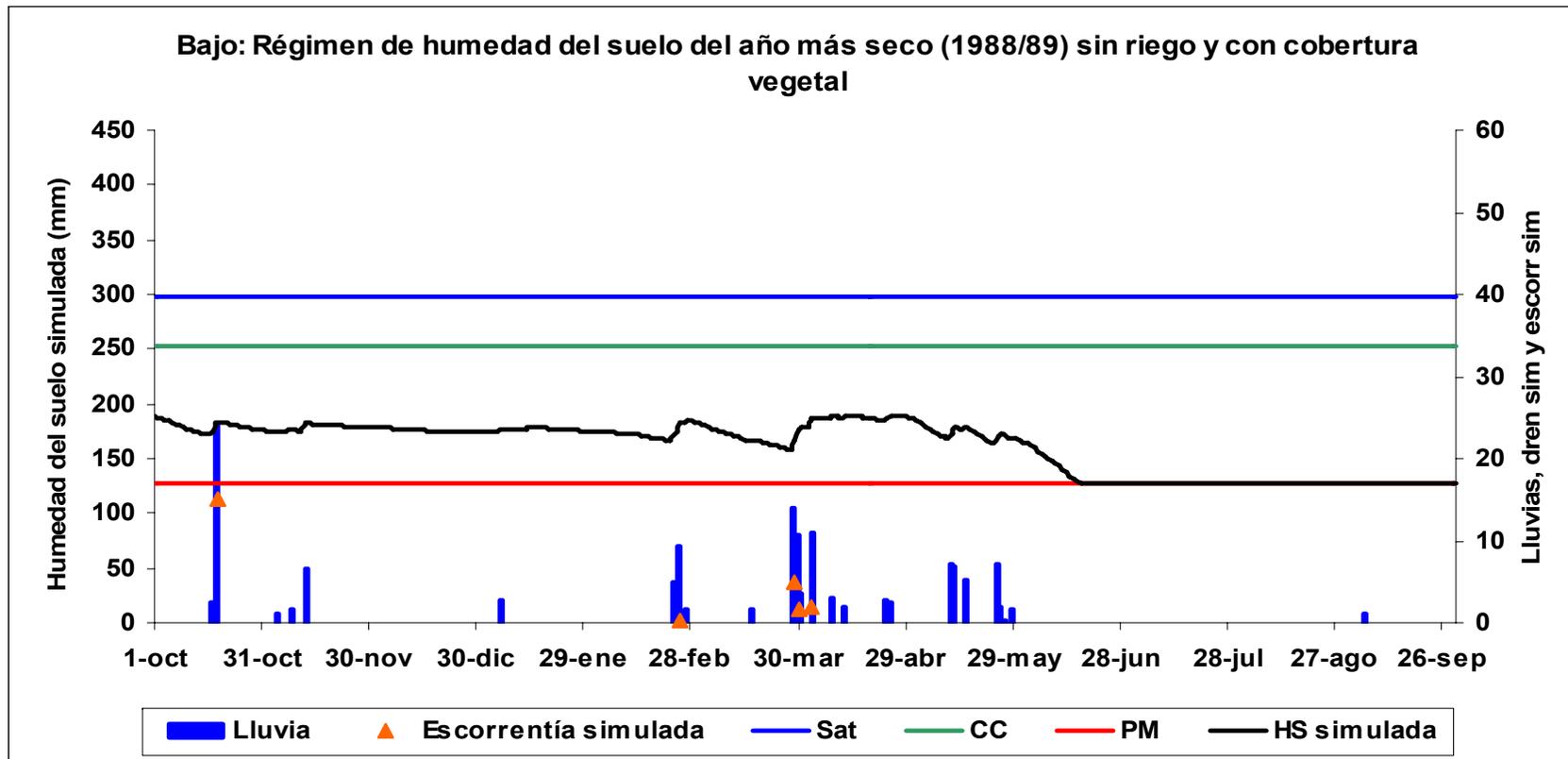


Fig. 42. Régimen de hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más seco (156 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 23 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

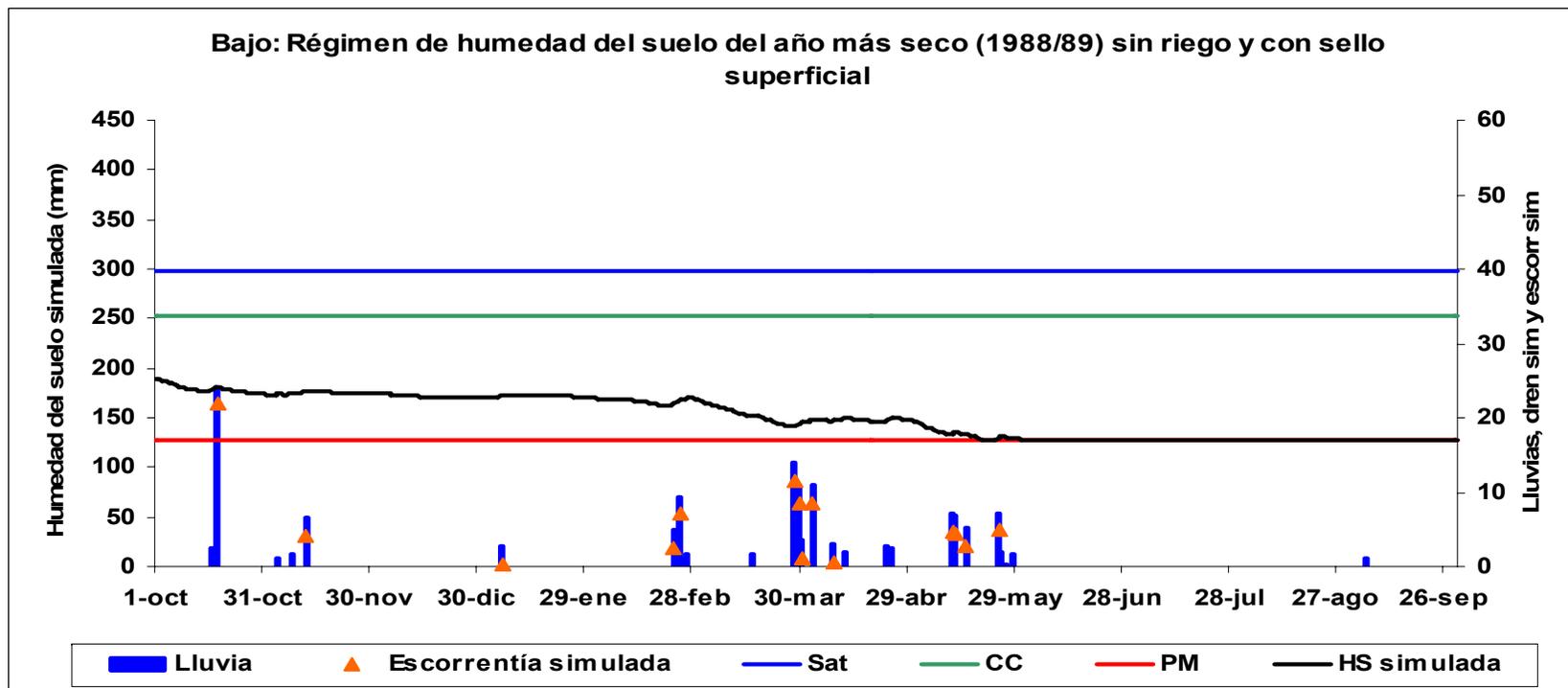


Fig. 43. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat, con la humedad del suelo simulada realizada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 70 cm en el año más seco en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 84 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

Plano:

En el plano se simuló la campaña 2007-2008 con las mismas condiciones expuestas precedentemente para P con cobertura vegetal en la figura 33, pero sin dicha protección y formación de sello superficial, con una infiltración de $2,3 \text{ mm h}^{-1}$, el régimen de humedad simulado sería mucho menor que el anterior, pero sin llegar a condiciones de capacidad de campo (334 mm). Al no alcanzar la máxima reserva de agua en el perfil no habría drenaje interno y debido a la baja pendiente del lugar, las lluvias y riegos provocarían anegamiento en lugar de escorrentía superficial como en las situaciones anteriores de L o B. Por anegamiento se simuló 114 mm, condición que provocaría anoxia, afectando a raíces y a la producción de vid. El agua que anegaría el suelo, solo se infiltraría muy lentamente (Fig. 44) y podría perderse por evaporación al aumentar las temperaturas en la primavera y verano. Según Smithson y colaboradores (2008) la citaron como una de las principales pérdidas de humedad del sistema hidrológico devolviendo el agua a la atmósfera.

La evolución del régimen de humedad del suelo para P en el año más lluvioso con 656 mm en toda la campaña, sin uso de riegos y protección superficial del suelo, se presenta en la Fig. 45. Se inicia con bajos contenidos de humedad y ante los 58 mm de lluvia a comienzos de octubre, debido a la elevada infiltración, se recargaría el perfil y continuaría aumentando la humedad con las lluvias posteriores. A mediados de noviembre se superaría la capacidad de campo y los contenidos de agua fluctuarían entre el intervalo de saturación y capacidad de campo desde diciembre a enero, donde se registrarían 143 mm perdidos por drenaje interno. Posteriormente la humedad del suelo disminuiría por consumo del cultivo, pero la buena distribución de lluvias durante la campaña agrícola iría reponiendo el agua del perfil aproximándose, por momentos, al 50% del agua aprovechable por la planta, terminando en la vendimia por encima de condiciones de deficiencia de humedad del suelo sin necesidades de riego. El ciclo del cultivo de la vid transcurriría con buenos contenidos de humedad en los períodos críticos de su desarrollo, que requieren disponer de agua suficiente en determinados estados fenológicos a fin de cubrir las necesidades productivas y la formación de las reservas y órganos necesarios para la próxima estación, o alcanzar el crecimiento vegetativo necesario para una buena producción.

En las mismas condiciones anteriores del año más húmedo, pero con presencia de sello superficial del suelo, y una infiltración de $2,3 \text{ mm h}^{-1}$, (Fig. 46) nunca se llegaría a capacidad de campo y el 62% de las lluvias al no poder infiltrar en el suelo generarían anegamiento, distribuidos a lo largo del ciclo de desarrollo del cultivo. El exceso de agua se acumularía en superficie hasta perderse por evaporación, lo cual afectaría a la producción de vid.

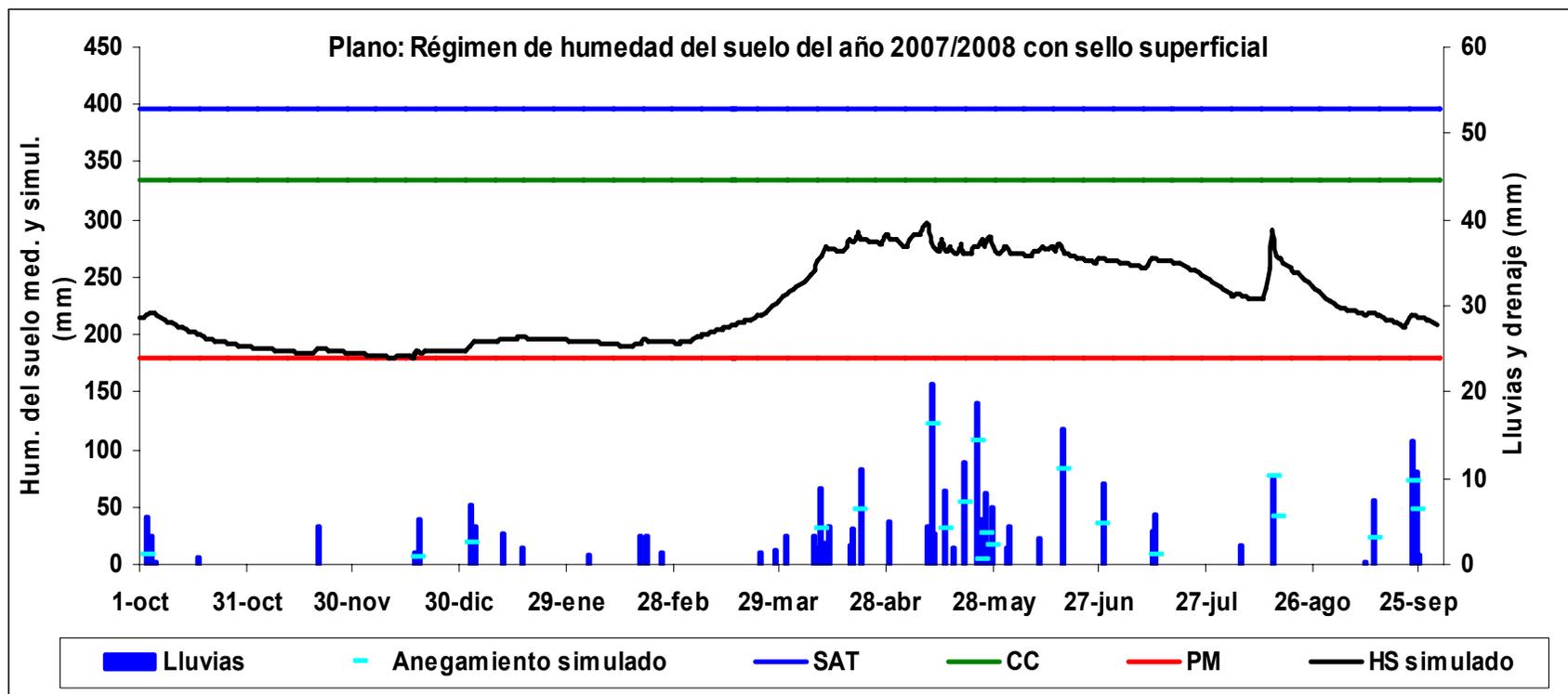


Fig. 44. Régimen hídrico del suelo del plano (P) de Raimat, con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con sello superficial, riego por aspersión y con una profundidad radical efectiva de 90 cm durante la campaña agrícola 2007/2008 con precipitaciones cercanas al promedio (306 mm). Anegamiento simulado: 114 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

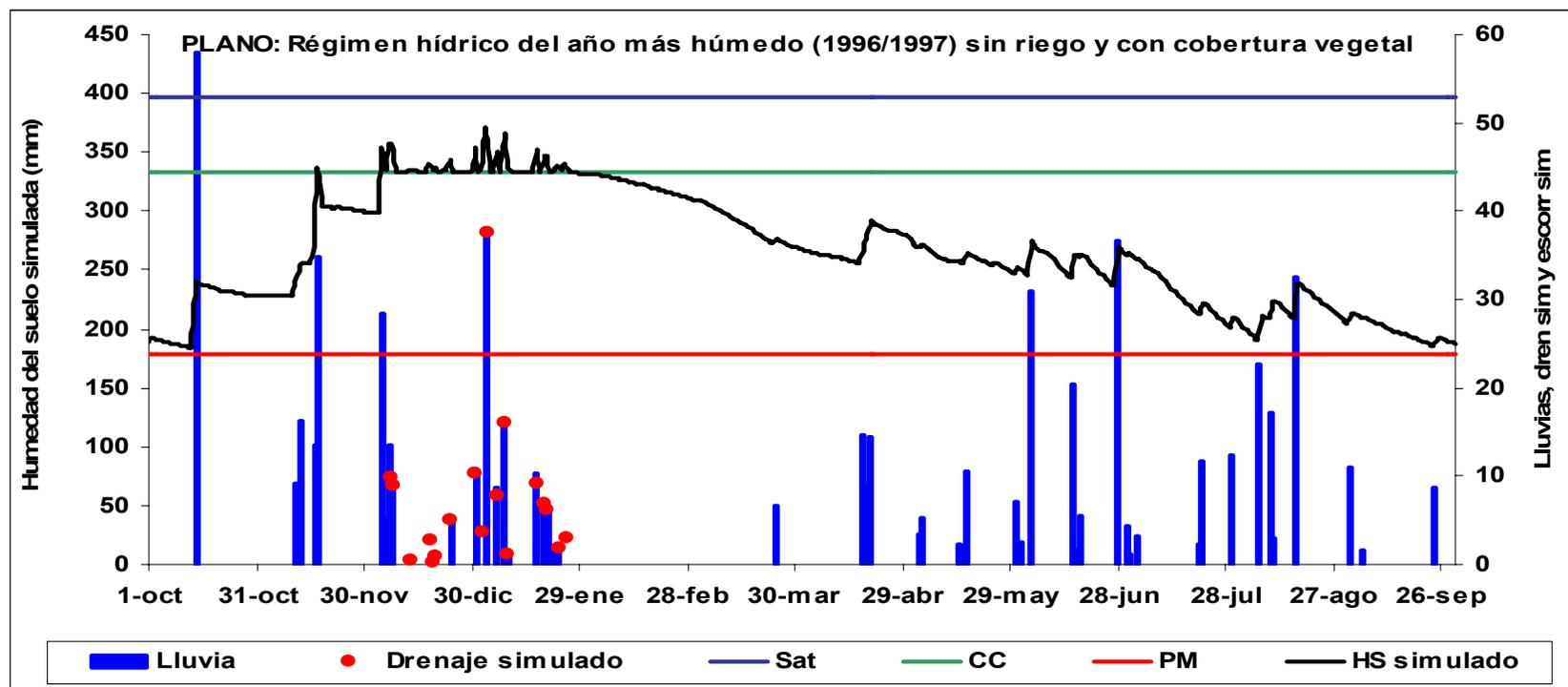


Fig. 45. Régimen hídrico del suelo del bajo (B) de Raimat con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 90 cm del año más húmedo (656 mm) en un período de retorno 21 años. Escorrentía simulada: 0 mm; Drenaje simulado: 144 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

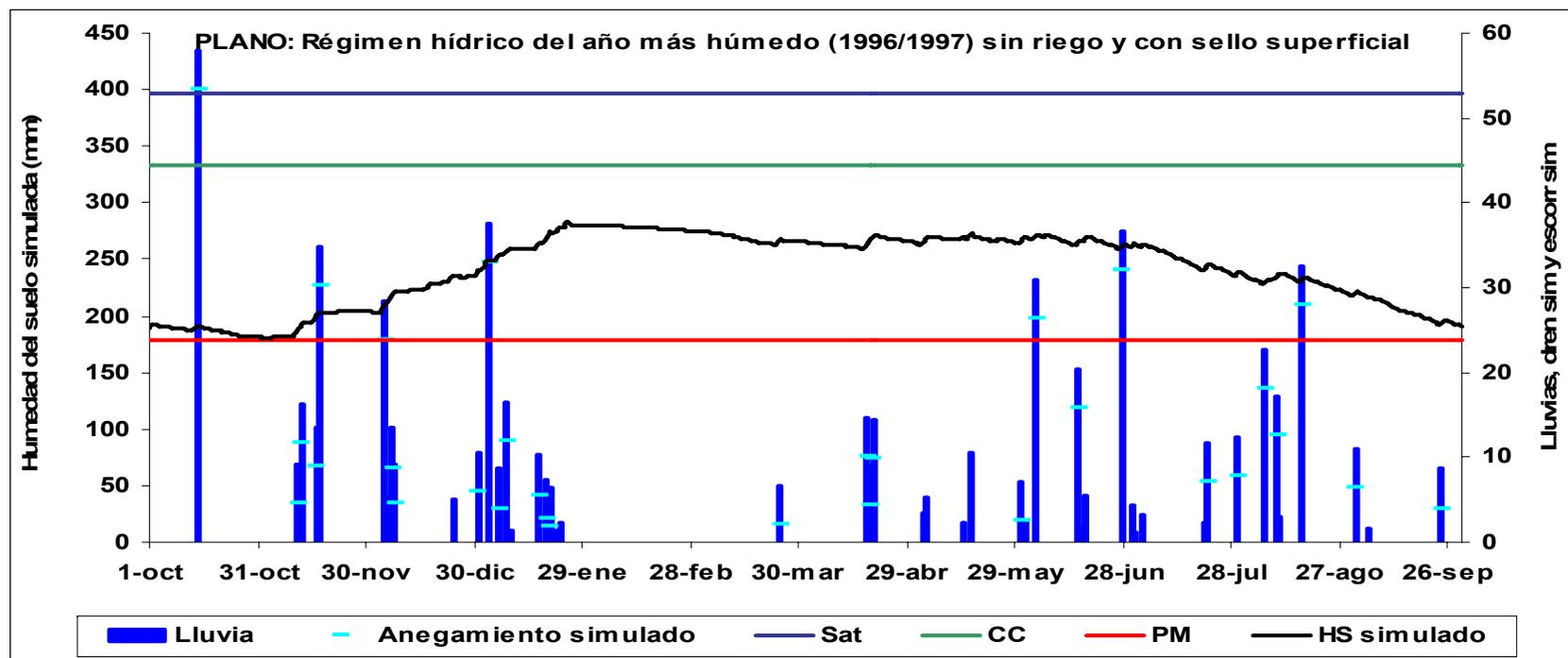


Fig. 46. Régimen hídrico del suelo del Plano (P) de Raimat con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo y con una profundidad radical efectiva de 90 cm del año más húmedo, en un período de retorno 21 años. Anegamamiento simulado: 406 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

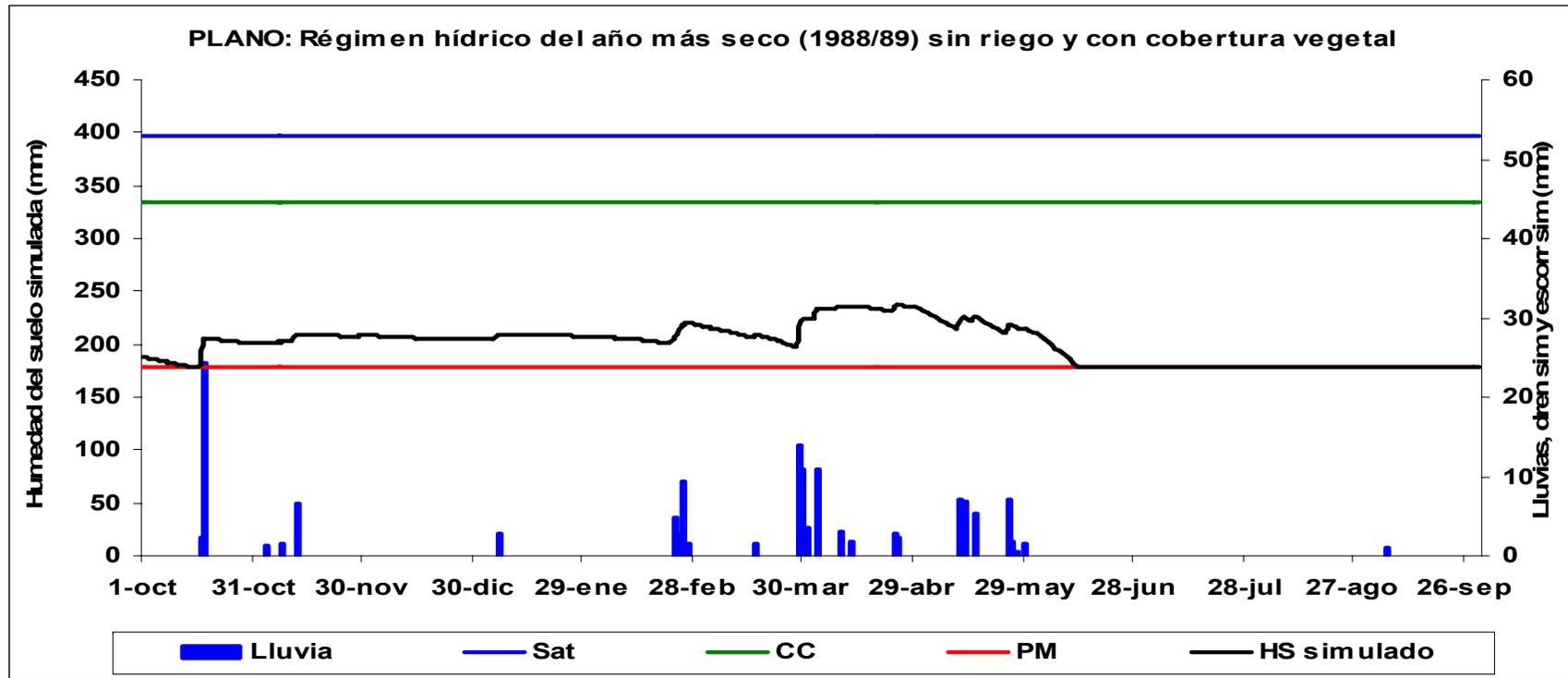


Fig. 47. Régimen hídrico del suelo del plano (P) de Raimat, con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, en las siguientes condiciones: con cobertura vegetal, sin riego y con una profundidad radical efectiva de 90 cm en el año más seco (156 mm) de un período de retorno 21 años. Anegamiento simulado: 0 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

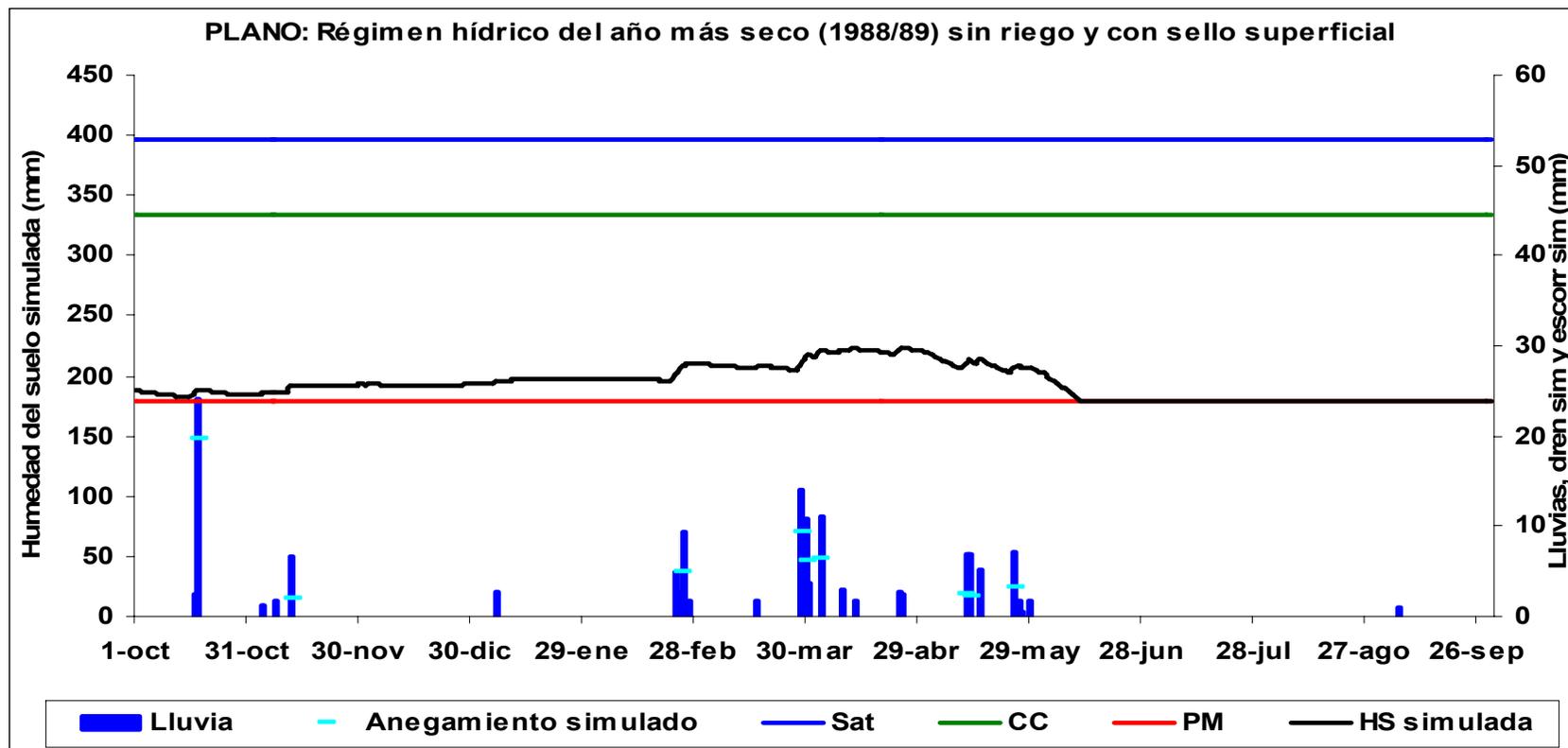


Fig. 48. Régimen hídrico del suelo del plano (P) de Raimat, con la humedad del suelo simulada calculada con parámetros del suelo medidos en el sitio, y las siguientes condiciones: con formación de sello superficial del suelo y con una profundidad radical efectiva de 90 cm en el año más seco con un período de retorno 21 años. Aneamiento simulado: 56 mm; Drenaje simulado: 0 mm. SAT: saturación; CC: Capacidad de campo; PM: Punto de marchitez (agua retenida a -1,5 MPa)

El régimen de humedad del suelo simulado para P, sin riego, para el año más seco (156 mm) con cobertura vegetal y a pesar de tener una muy buena infiltración el contenido de humedad del suelo sería bajo, pues el aporte de las lluvias seguiría siendo escaso e insuficiente para cubrir las necesidades hídricas en los momentos críticos de su desarrollo (“floración” y “cuajado”). Con las bajas precipitaciones, no alcanzaría a existir pérdida por drenaje interno, ya que el perfil no llegaría a capacidad de campo y la humedad no alcanzaría el 50% del agua aprovechable del suelo (el valor máximo de humedad esperado en abril sería 236 mm). Por la elevada infiltración tampoco habría anegamientos (Fig. 47). Para el 17 de junio se alcanzarían condiciones de deficiencias hídricas.

Para el año más seco en P, pero con presencia de sello superficial y una infiltración de $2,3 \text{ mm h}^{-1}$, (Fig. 48) parte de las bajas lluvias de ese período se acumularían en superficie, por la baja pendiente del sitio generando anegamiento sin entrar al suelo (56 mm). La humedad sería más baja aún que con cobertura vegetal y se llegarían a mayores deficiencias hídricas para el cultivo con mayor anticipo que en la Fig. 48 y con un estrés adicional por anegamiento.

4.8. Producción y características de calidad de uvas y del mosto

En la Tabla 12 se presentan los datos de la vendimia en kg de fruta fresca, por planta más próxima a cada tubo de TDR y a las sondas de FDR donde se evaluaron los contenidos de humedad de las parcelas y la producción equivalente por ha de cada parcela. Los datos corresponden a 8 plantas por sitio. Se observaron diferencias entre P que produjo menos que L y B, algo característico de la variedad Chardonnay. Esta variedad de uvas blancas, es de ciclo corto, por lo cual es esperable menor rendimiento. Las cepas de la variedad Chardonnay son vigorosas, de brotación precoz, adaptadas a diversos climas y tipos de terreno, siempre que no sean excesivamente húmedos. Pueden resistir deficiencias de hierro, pero no sequía extrema, sus rendimientos son bajos y su acidez elevada. En cambio, la variedad Tempranillo tiene potenciales de rendimiento medios a elevados, en función del terreno. Son sensibles a sequías extremas. Es una variedad adecuada para elaboración de vinos jóvenes, admitiendo crianza en barricas de roble con buenos resultados. Si se realizan buenas vendimias puede dar una buena calidad de vino (Chomé Fuster, 2003).

Los rendimientos promedios de Chardonnay variaron según las campañas de 6,1 a $7,8 \text{ kg cepa}^{-1}$, aumentando la producción en la cosecha 2008. Para dicha cosecha las viñas tuvieron mayor disponibilidad de agua en el suelo y más anticipadamente que para la cosecha anterior. El suelo alcanzó CC para el 10/5/08, correspondiente a las primeras etapas de la floración (Fig. 28a). Al cubrirse las necesidades hídricas de la vid de dicho período y a mediados de

agosto en plena maduración, aumentó la producción (t: 2,06 P < 0,108). Por el contrario en la campaña anterior recién se alcanzó CC a mediados de junio posterior a la etapa de “cuajado” (Fig. 25a).

Tabla 12. Rendimiento de la vid por cepas y por hectárea, y características del mosto en grados Brix, pH y acidez total expresada como g L⁻¹ de ácido tartárico en los sitios de plano con la variedad Chardonnay y bajo riego por aspersión, en la loma y el bajo con la variedad Tempranillo, riego por goteo y una densidad de plantación de 3 por 2,2 m, de las cosechas 2007, 2008 y 2009 (n: 24).

Cosechas	Sitios	kg por cepa	Mg ha ⁻¹	Grados Brix	pH	Acidez total
2007	PLANO: promedios	6,1	9,2	10,8	3,0	11,5
	Desv. estándar	0,8	1,2	1,0	0,1	0,9
	Coef. de variac.	12,9	12,9	9,6	3,5	8,0
	Máximos	7,3	11,0	12,0	3,2	12,1
	Mínimos	5,1	7,8	9,2	3,0	9,9
	LOMA: promedios	8,3	12,5	13,2	3,3	4,8
	Desv. estándar	1,4	2,2	0,8	0,2	0,7
	Coef. de variac.	17,5	17,5	5,8	4,6	14,5
	Máximos	11,3	17,1	14,2	3,5	5,8
	Mínimos	6,3	9,5	12,0	3,1	3,7
	BAJO: promedios	12,2	18,5	12,3	3,3	5,5
	Desv. estándar	3,2	4,8	1,4	0,1	1,0
	Coef. de variac.	25,9	25,9	11,8	4,3	18,1
	Máximos	18,9	28,7	14,0	3,5	7,5
	Mínimos	7,9	12,0	10,0	3,1	4,3
2008	PLANO: promedios	7,8	11,8	11,6	3,1	12,1
	Desv. estándar	2,6	3,9	0,7	0,2	0,5
	Coef. de variac.	32,9	32,9	6,3	7,0	4,3
	Máximos	12,2	18,5	12,6	3,3	12,7
	Mínimos	4,6	7,0	10,8	2,8	11,5
	LOMA: promedios	7,0	10,5	12,4	3,2	4,8
	Desv. estándar	1,7	2,6	1,1	0,1	0,8
	Coef. de variac.	24,5	24,5	8,8	2,4	17,5
	Máximos	10,0	15,2	14,2	3,3	6,1
	Mínimos	4,0	6,1	10,8	3,0	3,8
	BAJO: promedios	10,3	15,7	12,3	3,2	5,3
	Desv. estándar	2,3	3,5	1,4	0,1	1,2
	Coef. de variac.	22,6	22,6	11,8	3,8	22,6
	Máximos	14,7	22,3	14,0	3,3	7,3
	Mínimos	7,3	11,0	10,0	3,0	3,9
2009	LOMA: promedios	5,2	7,9	12,3	3,2	4,6
	Desv. estándar	2,4	3,6	0,9	0,1	0,2
	Coef. de variac.	45,8	45,8	7,4	2,4	4,9
	Máximos	10,6	16,1	14,2	3,3	5,0
	Mínimos	3,3	5,0	11,5	3,0	4,4
	BAJO: promedios	10,0	15,1	11,9	3,2	5,1
	Desv. estándar	3,6	5,4	1,0	0,1	0,3
	Coef. de variac.	36,0	36,0	8,6	4,6	6,3
	Máximos	15,3	23,2	12,9	3,3	5,6
	Mínimos	6,2	9,4	10,0	2,9	4,6

La producción del Tempranillo en las diferentes campañas, varió de 5 a 12 kg cepa⁻¹. Los rendimientos de vid en Catalunya son muy dispares, por ejemplo en

la zona del Priorat son bajos, de unos pocos kg cepa⁻¹, contrastando con el Penedés que puede llegar a unos 8 kg cepa⁻¹, en ambos casos sin riego, (Sanz Carnero, 1982). A medida que bajaron las dosis de riegos y la humedad del suelo, se observó una disminución de la producción entre campañas en L y B (Tabla 12).

Comparando por campañas en B con mayor humedad del suelo, se obtuvieron mayores promedios que en L, con diferencias significativas entre sí, en las tres campañas ($P < 0,05$). La disminución de rendimientos de esta variedad entre las cosechas del año 2007 y 2008 fueron significativas para L (t: 2,46 $P < 0,043$) y para B (t: 3,23 $P < 0,015$).

La variedad Chardonnay presentó menores grados Brix o sólidos solubles totales (SST) y mayor acidez total que la variedad Tempranillo (Tabla 12). Estas características varietales, la definen como muy apta para la elaboración de cavas, y vinos blancos más espesos o secos, figurando entre los mejores cultivares que existen, con más fama y calidad (Salazar y Melgarejo, 2005).

Para la cosecha 2008 hubo un aumento de la acidez total y de los SST del mosto del Chardonnay respecto a la campaña anterior, pero dichos cambios no fueron significativos ($P < 0,10$).

El pH del mosto no presentó cambios en todas las campañas de ambas variedades. Puyo (1992) tampoco encontró cambios en acidez titulable, ni en el pH de mostos de uvas, ni en la calidad del vino en Xerochreptes típicos de origen aluvial, sin déficit hídrico. Las aplicaciones de riego afectan poco el pH del mosto, en ocasiones aumentan ligeramente la acidez y en general aumentan: el peso de los racimos, la relación pulpa hollejo, la relación grano raquis, y el número y tamaño de bayas por racimo (Reynier 1999, citado por Salazar y Melgarejo, 2005).

En la variedad Tempranillo, se presentaron mayores contenidos de SST, en L, sin diferencias significativas con respecto a B, como fueron halladas por algunos autores (Hardy, 1967; Ballatore et al., 1970) al comparar viñedos con y sin riego. Los SST son importantes para definir el momento óptimo de la vendimia, para lo cual se tiene en consideración el máximo contenido de azúcar por procesos bioquímicos y no por procesos de pasificación (evaporación del agua que contiene la baya). Si se adelanta la vendimia, se tienen pérdidas de producción y un exceso de acidez. Al retrasar la maduración disminuye la acidez y se perjudican los procesos enológicos y la aromaticidad y calidad de los vinos (Salazar & Melgarejo, 2005).

La acidez total del Tempranillo fue menor en L que en B sin diferencias significativas para las tres cosechas. Ferreyra, et al. (2002) encontraron que no se afectó la calidad del mosto cuando se cubrieron las necesidades hídricas con riego entre floración y envero, a pesar de tener ligeras deficiencias posteriores al

envero. La relevancia de la acidez titulable y el pH se relaciona a la estabilidad del jugo y estos parámetros son usados como indicadores de calidad. La concentración de ácidos orgánicos no solo contribuyen al sabor ácido del mosto, también influyen en el color del vino y la estabilidad microbiológica.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones Generales

1- Los regímenes de humedad del suelo simulados con el modelo SOMORE mostraron un buen ajuste con las mediciones de humedad del suelo realizadas en campo para las diferentes posiciones geomorfológicas, suelos y sistemas de riego (por aspersión y goteo). Ello permitió evaluar el posible efecto de diferentes prácticas de manejo del suelo (sin y con cobertura) bajo diferentes condiciones climáticas (desde años muy húmedos hasta años muy secos).

2- Los resultados obtenidos de las observaciones de campo y de las simulaciones, mostraron que bajo las condiciones de clima y suelos de Raimat, la cobertura vegetal disminuiría el uso de agua de riego al evitar pérdidas de agua de lluvia y riego por escorrentía superficial, aumentando la recarga de agua en el suelo. Dichas predicciones pueden ser realizadas adecuadamente con el modelo, si se cuenta con información apropiada de las principales propiedades físicas e hidrológicas del suelo.

3- Para lograr uniformizar y mejorar la producción tanto en cantidad como en calidad, en suelos de gran variabilidad como los estudiados, es necesario un buen diseño y manejo del riego, adaptado a cada una de las situaciones. Para ello es necesario realizar previamente una adecuada evaluación de las condiciones físicas del suelo que afectan tanto al crecimiento de raíces como a las propiedades hidrológicas.

4- Mejorando las prácticas de manejo del suelo, de la cobertura vegetal, y haciendo un seguimiento y monitoreo de la humedad del suelo hasta la profundidad de las raíces, aún en años con una distribución irregular de las lluvias, se podría alcanzar una buena producción, con menores dosis de riego que las actualmente aplicadas.

5.2. Conclusiones Específicas

1- Las metodologías de campo para evaluar algunas propiedades físicas, como densidad aparente, saturación y conductividad hidráulica saturada, demostraron ser más fiables que las usadas en laboratorio, a pesar de involucrar un mayor costo y tiempo. Dichas determinaciones presentaron la ventaja que se realizaron en muestras más grandes representando las condiciones naturales en

que se encuentra el suelo en campo, permitiendo una evaluación más apropiada. Esto es particularmente cierto en suelos con altos contenidos de fracción gruesa, como los estudiados. Por ejemplo, el método de densidad aparente por excavación, al incluir mayor cantidad de muestra, resulta más representativo que el método del cilindro de dimensiones reducidas, aumentando el volumen de la muestra a medida que se hallen mayores contenidos de fracción gruesa.

2- La medición de la velocidad de infiltración y de la conductividad hidráulica saturada con el método del cilindro de 30 cm de diámetro presentó menor variabilidad que con los cilindros de 20 y 5 cm de diámetro, por lo cual su empleo resultó más apropiado.

3- La determinación del punto de marchitez con el WP4-T tiene la ventaja de ser un procedimiento de determinación rápido y sencillo respecto a las placas Richards y aporta mayor información para suelos con salinidad pues también mide el efecto del potencial osmótico.

4- Para realizar un adecuado diagnóstico y tratamiento de los procesos de degradación de suelos con elevados contenidos de fracción gruesa, es fundamental seleccionar la metodología más adecuada, para ello es necesario probar varios métodos para la determinación de las propiedades físicas estudiadas.

5.3. Recomendaciones y sugerencias agronómicas:

1- La combinación de datos obtenidos en campo y en laboratorio, con metodologías de fácil realización para evaluar y diagnosticar las propiedades mecánicas e hidráulicas estudiadas, sería ventajosa y necesaria para un manejo más eficiente del cultivo y del diseño de riego. Con tal información se evitarían excesos en la aplicación de agua de riego, que en ocasiones superó la velocidad de infiltración de los suelos.

2- Cuando se requiera el punto de marchitez permanente para estudios del agua del suelo y diseños de riego, en suelos con salinidad, sería recomendable evaluar la conductividad eléctrica a efectos de evitar una subestimación de los resultados obtenidos con las placas Richards.

3- En suelos con gran variabilidad espacial de sus propiedades, el uso de sensores de la humedad del suelo instalados a diferentes profundidades, en la zona de aplicación del riego, es un excelente recurso para la gestión hídrica del viñedo, ya que ayuda a determinar la cantidad adecuada de agua de riego a aplicar en cada etapa del cultivo con rapidez para implementar cambios oportunos.

4- El monitoreo de la resistencia a la penetración y la densidad aparente serían un buen recurso en la decisión del uso de subsoladores en los suelos con elevada resistencia a la penetración para las raíces de la viña. Ello contribuiría a aumentar la infiltración del agua. El uso de rodillos o rulos que emparejan la superficie, disminuyendo la rugosidad superficial del suelo, tiende a anular parcialmente el efecto beneficioso de los subsoladores.

5- La mecanización de las labores culturales del viñedo, ha generado huellas debidas al tránsito de la maquinaria, donde el suelo se ha densificado y disminuido la velocidad de infiltración de agua, acentuando la escorrentía superficial del agua de lluvia y de riego, con arrastre de suelo en dichos sectores. Por ello, convendría roturarlo periódicamente, para evitar la formación de dicho microrelieve, y favorecer el crecimiento y exploración de raíces.

6. BIBLIOGRAFIA

- Abreu, X.C. 2005. Evaluación del efecto de las propiedades hidrológicas y sistemas de manejo sobre la susceptibilidad a erosión superficial y en masa en suelos pedregosos con viña del priorato (Cataluña, España). Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. Cataluña.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Cuaderno 56. FAO. Roma.
- Amerine, M.A., and C.S. Oug. 1988. Methods for analysis of musts and wines. John Wiley and Sons, New York.
- Andraski, B.J. 1991. Balloon and core sampling for determining bulk density of alluvial desert soil. *Soil Sci. Soc Am. J.* 55:1188-1190.
- Ayers, P.D., Perumpral, J.V., 1982. Moisture and density effect on cone index. *Trans. ASAE* 24, 1169–1172.
- Ballatore G.P., F. Ravelli, and V. Lombardo. 1970. Esperienze di irrigazione della vite sull'ambient semiarido della Sicilia sudoccidentale. *Irrigazione* 17:25-36.
- Barceló J, J. M. Escalona, J. Flexas, R. Savé, H. Medrano. 1998. Variety effect on water relation changes in response to drought in field grown grapevines. In *Proceedings of the 10emes Journées Groupe d'Études des Systèmes de Conduite de la Vigne (GESCO)*. pp. 25-29. Switzerland: Changins.
- Bartolomé, M.C. 1993. Respuestas de la vid (*Vitis vinífera* L.) a condiciones de estrés hídrico: Efectos sobre las relaciones agua – planta, el crecimiento, la producción y la calidad (cv. Tempranillo). Dpto. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bartolomé, M.C., V. Sotes, P. Baeza, C. Ruíz y J.C. Lissarrague. 1995. Efectos del déficit hídrico sobre el desarrollo vegetativo y fructífero del cultivar “Tempranillo” de vid (*V. vinífera* L.). *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 10 (2): 245-261.
- Baver L.D., W.H. Gardner, y W.R. Gardner. 1991. Física de suelos. Traducido al español: J.M. Rodríguez y Rodríguez. Unión Tipográfica. Editorial Hispanoamericana SA. de CV. México D. F. 529 p.
- Beare, M.H., P.F. Hendrix, and D.C. Coleman. 1994. Water - stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 777-786.

- Begg, J.E. and N.C. Turner. 1976. Crop water deficits. *Adv. Agron.* 28: 161-217.
- Bengough, A. G. and C.E. Mullins. 1992. Mechanical impedance to root growth: a review of a experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41: 341-358.
- Ben-Hur, M., 1994. Runoff erosion and polymer application in moving sprinkler irrigation. *Soil Sci.* 158, 283–290.
- Bittelli, M. and M. Flury. 2009. Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates *Soil Sci Soc Am J* 73:1453-1460
- Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. p. 363-375. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI.
- Bouma, J., 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Adv. Agron.* 46, 1–37.
- Bower, H. 1986. Intake rate: Cilinder infiltrometer. P. 825-844. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI.
- Brejda, J. J., Moorman T. B., Smith, J. L., Karlen, D. L., Allan, D. L., y Dao, T. H. 2000. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 974-982.
- Brown, B. and T. Sluggett. 2001. Spring irrigation management of winegrapes. *The Australian Grapegrower & Winemaker.* November 2001. 59-61.
- Bruand, A., C. Hartmann, S. Ratana-Anupap, P. Sindhusen, R. Poss, and M. Hardy. 2004. Composition, Fabric, and Porosity of an Arenic Haplustalf of Northeast Thailand: Relation to Penetration Resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:185–193.
- Cassel, D.K. and D.R. Nielsen. 1986. Field capacity and available water capacity. p. 901-926. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI.
- Cassel, D.K. and M.D. Sweeney. 1974. In situ soil water holding capacities of selected North Dakota soils. *North Dakota Agric. Exp. Stn. Bull.* 495.
- Chaudhary, M.R., Khera, R., Singh, C.J., 1991. Tillage and irrigation effects on root growth, soil water depletion and yield of wheat following rice. *J. Agric. Sci.* 116, 9–16.

- Chomé Fuster P.M. 2003. Variedad de vid. Registro de variedades comerciales. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica de Madrid. 303 pág.
- Chowdary, V.M., M. Damodhara Rao, and C.S. Jaiswal. 2006. Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management* Volume 83, Issues 1-2: 69-78
- Crescimanno, G., A. de Santis, and G. Provenzano. 2007. Soil structure and bypass flow processes in a Vertisol under sprinkler and drip irrigation. *Geoderma* 138 (1-2) 15: 110-118.
- Cresswell, H.P., T.W. Green, and N.J. McKenzie. 2008. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:41–49.
- Cuevas E, Baeza P, Lissarrague JR. 1998. Effects of four moderate water regimes on seasonal changes in vineyard evapotranspiration and dry matter production under semi-arid conditions. *Acta Horticulturae* 493: 253–260.
- Dane, J.H., and J.W. Hopmans. 2002. Pressure plate extractor. p. 688–690. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods.* SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- De Rosny, G., A. Chanzy, M. Pardé, J.C. Gaudu, J.P. Frangi and J.P. Laurent. 2001. Numerical modelling of a capacitance probe response. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:13-18.
- Dean, T.J., J.P. Bell, A.J.B. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part 1: Sensor design and performance. *Journal of Hydrol.*, 93: 67-78.
- Decagon Devices, Inc. 2002. Instrumentation catalg. Decagon Devices, Pullman, WA.
- Delgado E., J. Vadell, F. Aguiló, J. M. Escalona, H. Medrano. 1995. Irrigation and grapevine photosynthesis. In *Photosynthesis: from Light to Biosphere*, Vol. 4, pp. 693-696. Ed. P Mathis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Duteau, J., M. Guilloux, and G. Seguin. 1981. Influence des facteurs naturels sur la maturation du raisin, en 1979, à Pomerol et Saint-Emilion. *Conn. Vigne Vin* 15(3):1-27.

- El País. 2009. [En línea]. Disponible en: http://www.elpais.com/articulo/economia/Agricultura/regula/arranque/subvencionado/vinedos/elpepueco/20080421elpepueco_3/Tes (acceso: 7/07/09; verificada en febrero 2009).
- El Periódico. 2009. [En línea]. Disponible en: http://www.elperiodico.com/default.asp?idpublicacio_PK=46&idioma=CAS&idnoticia_PK=603428&idseccio_PK=1009 (Acceso: 30/07/09; verificada en febrero 2009).
- Elias Castillo, F. y F. Castellvi Sentis. 1996. Agrometeorología. Coedición Minsiterio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica. Ediciones Mundi-Prensa. España. 517 p.
- Elliot, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Am. J.* 50: 627-633.
- Escalona, J. M., J. Flexas, & H. Medrano. 1999. Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis under water stress in field-grown grapevines. *Australian Journal of Plant Physiology* 26:421-433.
- Esteban M.A., M.J. Villanueva, and J.R. Lissarrague. 1999. Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugars, organic acids, and mineral elements. *Am. J. Enol. Vitic.* 50 (4): 418-433.
- Fabregat-Santiago, F.; N.S. Ferrols, G. García Belmonte, J. Bisquert, e I. Morell. 1999. Estudio de los diferentes estados energéticos del agua del suelo en función de los fenómenos de relajación dieléctrica. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter y C. Tascón. ICIA. Tenerife.
- Ferrer, F., I. Pla, F. Fonseca, H. Dalurzo, J.M. Villar. 2008. Combining field and laboratory methods to calculate soil water content at field capacity and permanent wilting point. 10th Congress of the European Society for Agronomy. Bologna-Italy. *Rivista di Agronomia*, 2008, Vol. 3, No. 3 supplement. Pag. 279-280.
- Ferreya, R., G. Selles, J. Peralta, L. Burgos, y J. Valenzuela. 2002. Efectos de la restricción del riego en distintos períodos de desarrollo de la vid cv. Cabernet Sauvignon sobre producción y calidad del vino. *Agricultura Técnica (Chile)* 62(3): 406-417.
- Fimbres-Fontes A, Lagarda-Murrieta R. 1985. Optimización del sistema de riego por goteo en vid *Vitis vinifera* L. en la región de Caborca. *Agricultura Técnica en Mexico II-I*: 51–67.

- Flint, A.L., and S. Childs. 1984. Development and calibration of an irregular hole bulk density sampler. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 374-378.
- Fonseca, F.J. 2006. Balance hídrico en suelos pedregosos con viña de secano en el Priorat (Cataluña). Efectos por cambio de Manejo y Clima. Tesis Dr. Universidad de Lleida (España).
- Fonseca, F.J., F. Ferrer, J.M. Villar and I. Pla. 2007. Adapting the gee passive capillary lysimeter to soils with poor drainage and shallow water table. 15th Nitrogen Workshop. Towards a better efficiency in N use. 147 p. Lleida. Spain.
- Fregoni, M. 1998. Viticultura di qualita. *l'Informatore Agrario*. Piacenza.
- García Escudero, E., F. Martínez Bujanda, J.R. Lissarrague, y V. Sotés. 1994. Influencia del momento de aplicación del riego sobre la producción y la calidad del mosto. *Vitivinicultura* 1-2: 49-54.
- Gardner, W.R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants, *Soil Sci.* 89:63-73.
- Gardner, W.R. 1986. Water content. In: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Gaucher, G. 1971. *Tratado de pedología agrícola. El suelo y sus características agronómicas*. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 646 pp. Pag 64
- Gee, G.W., A.L. Ward, T.G. Caldwell, and J.C. Ritter. 2002a. A vadose zone water fluxometer with divergence control. *Water Resources Research* 57 (8): 161-167.
- Gee, G.W., A.L. Ward, Z.F. Zhang, G.S. Campbell, and J. Mathison. 2002b. The Influence of Hydraulic Nonequilibrium on Pressure Plate Data. *Vadose Zone J.* 1: 172-178.
- Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. p 383 - 409. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Gerlach, T. 1967. Hillslope troughs for measuring sediment movement. *Révue de Géomorphologie Dynamique, Special Edition to the International Hydrological Decade*, v.4, p 173.
- Gilley, J.R., Mielke, L.N., 1980. Conserving energy with low pressure center pivot. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 106, 49–59.

- Girona, J., M. Mata, J. del Campo, A. Arbones, E. Bartra, and J. Marsal. 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science* 24 (2): 115-127.
- Gladstone, J. 1992. *Viticulture and environment*. Adelaide. Australia.
- Godoy Avila, C., I. López Montoya, e I. Reyes Juárez. 2001. Respuesta de la vid a tres tensiones de humedad del suelo en postcosecha. *Terra* vol. 20 (3) 285-290.
- Gooderham, P.T. 1973. Soil physical conditions and plant growth. Ph. D. Thesis University of Reading.
- Goss, M.J., 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.): I. Effects on the elongation and branching of seminal root axes. *J. Exp. Bot.* 28, 96–111
- Greacen, E.L., and R. Sands. 1980. Compaction of forest soil. *Aust. J. Soil Res.* 18: 163-171.
- Hamman, R.A., R.A. Renquist and H.G. Huges. 1990. Pruning effect on cold hardiness and water content during deacclimation of Merlot bud a cane tissues. *Am. J. Enol. Vitic.* 41: 251-260.
- Hamza, M.A., and W. Anderson. 2005. Soil compactation in cropping systems. A review of the nature , causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Hanson, C.T. and R.L. Blevins. 1979. Soil water in coarse fragments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 819-820.
- Hardie W.J. and J.A. Considine. 1976. Response of grapes to water-deficit stress in particular stages of development. *Am. J. Enol. Vitic.* 27: 55-61.
- Hardy, P.J. 1967. Sucrose breakdown and synthesis in the ripening grape berry. *Austral. J. Biol. Sci.* 20: 465-470.
- Heimovaara, T.J. 1994. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms. Measurement for the complex dielectric permittivity of soil. *Water Resources Research*, 30 (2): 189-199.
- Heimovaara, T.J., J. Bouten, and W. Verstraten. 1994. Frequency domain analysis of time domain analysis of time domain reflectometry waveforms. A four-component complex dielectric mixing model for soils. *Water Resources Research*, 30 (2): 201-209.

- Henderson, C., A. Levett, and D. Lisle. 1988. The effect of soil water content and bulk density on the compactability and soil penetration resistance of some western Australian sandy soils. *Aust. J. Soil Res.* 26, 391–400.
- Hidalgo, L. 1999. *Tratado de Viticultura General*. Ediciones Mundi-Prensa. 2da Edición. Madrid-Barcelona-México.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego. California. US. 771 p.
- Hussain, I., K.R. Olson, M.M. Wander, and D.L. Karlen. 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in Illinois. *Soil Till. Res.* 50: 237-249.
- Ishaq, M., M. Ibrahim, A. Hassan, M. Saeed, and R. Lal. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil Tillage Res.* 60:153–161.
- Jackson D.I. and P.B. Lombard. 1993. Environmental and management-practices affecting grape composition and wine quality - A Review. *Am. J. Enol. Vitic.* 44 (4): 409-430.
- Kamande, N.C., M. Shimizu, G. Okamoto and K. Hirano. 1997. Abscisic acid, carbohydrates, and nitrogen contents of Kyoho grapevines in relation to budbreak induction by water stress. *Am. J. Enol. Vitic.* 48: 115-120.
- Kemper, W.D. and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. p. 425-441. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Klesta, E.J. and J.K. Bartz. 1996. Quality assurance and Quality control. p. 19 - 48. In D. L. Sparks (ed.) *Methods of soils analysis: Chemical methods. Part 3. SSSA Book Ser. 5*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kliewer, W.M. 1981. Grapevine physiology. How does a grapevine make sugar? Leaflet 21231. Division of Agricultural Sciences, University of California. Davis, CA.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory Methods. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Lal, R. 2007. Soil Science and the Carbon Civilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:1425–1437.

- Lal, R., and M.K., Shukla. 2004. Principles of soil physics. New YorkBasel New York.
- Lissarrague, J.R. 1997. Necesidades de agua de la vid. Consecuencias del estrés hídrico y del riego en el viñedo. Agricultura. 785: 943-950.
- Lowery, B., Schuler, R.T., 1994. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. Soil Tillage Res. 29, 205–210.
- Magrisso, J. 1997. Les bases physiologiques de la résistance de La vigne a la sècheresse. Physiologie de la vigne. 3er Symposium international sur la physiologie de la vigne (édite by Bouard, J.; Pouget, R.) 175-178; Paris, France; Office International de la Vigne et du Vin.
- Martínez-Casasnovas, J.A., C. Antón-Fernández, and M.C. Ramos. 2003. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high resolution DEMs and GIS analysis. Earth Surface Processes and Landforms 28, 443–456.
- Matthews M.A., and M.M. Anderson. 1988. Fruit ripening in *Vitis vinifera* (L.) Responses to seasonal water deficits. Am. J. Enol. Vitic. 39: 313-320.
- Matthews M.A., R. Ishii, M.M. O. Anderson, and M. Mahony. 1990. Dependence of wine sensory attributes on vine water status. Journal of Science of Food and Agriculture 51:321-335.
- McIntyre, D.S. 1974. Water retention and the moisture characteristic. p. 43-62. In J. Loveday (ed.) Methods for analysis of irrigated soils. Tech. Comm. Commonw. Bur. Soils n°54. CAB: Fornham Royal, England.
- Micromedios Digitales S.L. 2009. http://www.soitu.es/soitu/2008/12/15/info/1229344866_647086.html. Actualizado 15-12-2008 (acceso: 30/06/09; verificada en febrero 2009)
- Muller, R.N. and M.E. Hamilton. 1992. A simple, effective method for determining the bulk density of stony soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 23:313-319.
- Nacci, S., M.C. Ramos, and I. Pla. 2002. Dynamics of the soil physical properties in vineyards of the Anoia-Alt Penedes Region (Catalunya, Spain). In J.L. Rubio *et al.* (eds.) Man and soil at the third millennium, II:1615-1624. Logroño, Spain, Geoforma.

- Nacci, S.S. 2001. Alteraciones en el régimen hídrico del suelo asociadas a la sistematización y cambios en el manejo de tierras con viña de secano en el Anoiá-Alt Penedes. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. Cataluña.
- Nacci, S.S., y Pla, I. 1991. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP-CNIA: 48p Serie B. N° 17. Maracay.
- Nacci, S.S., y Pla, I. 1993. Técnicas y equipos simplificados para evaluar propiedades físicas importantes para el manejo de suelos en los trópicos. In: R. Villegas and D. Ponce de León (Editors), Memorias XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo. Vol I. SLCS-INICA. La Habana, Cuba, pp. 199-217.
- Neja, R.A., L.E. Williams, L.A. Yates, and E.L. Walker. 1994. Postharvest irrigation and cyanamid effects on budbreak and yield of Perlette grapevines grown in the Coachella Valley, pp. 109-113. In: International Symposium on Table Grape Production. Am. Soc. Enol. Vitic. Anaheim, CA.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter p. 961-1010. In: J.M. Bigham (ed.). Methods of soil analysis Part 3. Chemical Methods. ASA and SSSA, Madison, WI.
- O'Brien, J.J., and S.F. Oberbauer. 2001. An inexpensive, portable meter for measuring soil moisture. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 1081-1083.
- Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. Plant Soil 76: 319-337.
- Ojeda, H., C. Andary, E. Kraeva, A. Carbonneau, and A. Deloire. 2002. Influence of pre- and postveraison water deficits on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. Am. J. Enol. Vitic. 53:261-267.
- Ojeda, H., A. Deloire, Z. Wang, y A. Carbonneau. 2004. Determinación y control del estado hídrico de la vid. Efectos morfológicos y fisiológicos de la restricción hídrica en vides. Viticultura/Enología Profesional 90:27-43.
- Osterass, P. 1962. Vineyard irrigation practices. Calif. Irrig. Inst. Proc. Fresno, CA.
- Pabin, J., J. Lipiec, S. Wlodek, A. Biskipsky and A. Kaus. 1998. Critical soil Bulk density and strength for pea root growth as related to other soil factors. Soil Till. Res. 43: 206-208.

- Page-Dumroese, D.S., M.F. Jurgensen, R.E. Brown, and G.D. Mroz. 1999. Comparison of methods for determining bulk densities of rocky forest soils. *Soil Sci. Soc. Am J.* 63:379-383.
- Pascual, M. 1994. Aspectos fisiológicos de la vid en relación con el aporte de agua. En: *Jornades de transferència de tecnologia sobre: Conservació de sòls i aigües en vinyes*. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Institut Català de la Vinya i el vi. Lleida. pp: 5-34.
- Pérez, M.A., J.A. Rubio, S. López Miranda y J. Yuste. 2002. Efecto de la densidad de Plantación y del régimen hídrico en la intercepción de radiación y la productividad total en Tempranillo conducido en espaldera. *Vitic. y Enol. Profes.* 82: 5-12.
- Perfil ambiental de España. 2007. Informe basado en indicadores. Editorial Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. 373 p.
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Publ. Rev. Agron. Alcance* n°32. Maracay (Venezuela). 90 pág.
- Pla, I. 1992. Water saving for rainfed crop production in the tropics through surface soil conditioning. P 127-135. In: H. Verplancke et al. (ed.) *Water Saving Techniques for Plant Growth*. Kluwer Academic Publish, Dordrecht, The Netherlands.
- Pla, I. 1995. Modelling hydrological processes for guiding soil and water conservation practices. In *the soil as strategic resource: Degradation processes and conservation measures*. Meeting European Soc. Soil Conserv. Spain.
- Pla, I. 1996. A soil water balance model for monitoring soil erosion processes and effects on Steep land in the tropics. *Soil Tech.* 11 (2): 1-13.
- Pla, I. 1996. Aspectos hidrológicos relacionados con la evaluación y prevención de problemas de degradación de suelos y aguas en América Latina: Posibilidades de Modelización. XIII Memorias Cong. Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Aguas de Lindoia.
- Pla, I. 1996. Propiedades físicas del suelo. Relaciones con la productividad y procesos de degradación. Métodos de evaluación y modelaje. p 19-51. In López R. & F. Delgado (ed.). *Suelos con limitaciones físicas*. CIDIAT. Mérida. Venezuela.

- Pla, I. 1997. A soil water balance model for monitoring soil erosion processes and effects on steep lands in the tropics. En: Pla, I. (Ed.). *Soil Erosion Processes on Steep Lands*. Special Issue of *Soil Technology*. Elsevier. Amsterdam. pp: 17-30.
- Pla, I. 1998. Modelling hydrological processes for guiding soil and water conservation practices. En: Rodríguez, A. (Ed.). *The soil as strategic resource: Degradation processes and conservation measures*. Meeting European Soc. Soil. Conserv. Spain. Geofoma Ed. Logroño. pp: 395-412.
- Pla, I. 2002. Assessment of environmental impacts derived of soil and water conservation practices. In *Sustainable Utilization of Global Soil and Water Resources*. III:282-290. Tsinghua Univer. Press. Beijing (China).
- Pla, I. 2005. Evaluación y modelización hidrológica de la degradación física de suelos: Problemas metodológicos. En: *Comunicaciones II Simposio Nacional sobre control de la degradación de suelos*. 847-851. SECS. Madrid (España).
- Pla, I. 2006. Efectos de la labranza y uso de coberturas en cultivo de viña de secano en Cataluña. *Jornada Técnica: Efectes dels abancaments en el conreu de la vinya*. Porrera del Priorat. Catalunya España.
- Pla, I., M.C. Ramos, S. Nacci, F. Fonseca & X. Abreu. 2004. Soil and water conservation as affected by changing Mediterranean climate and Land Management in vineyard of Catalonia (NE Spain). In Kovacs *et al* (eds). "Proc. 4^o International Congress of the ESSC". 86-91. Budapest (Hungary).
- Pla, I., M.C. Ramos, S. Nacci, F. Fonseca & X. Abreu. 2005. Soil moisture regime in dryland vineyards of Catalonia (Spain) as influenced by climate, soil and land management. In R. Benitez & J. Pisante (eds). "Integrated soil and water management of orchard development". 41-49. FAO Land and Water Bulletin 10 Roma (Italy).
- Pla, I., S. Nacci, F. Fonseca & H.C. Dalurzo. 2007. Soil water regime under different land and crop management systems in Catalonia (NE Spain) vineyards. 5th International Congress of the European Society for Soil Conservation. Palermo (Italy). Book of Abstracts. 56 p.
- Pla, I and S. Nacci. 2001. Impacts of mechanization on surface erosion and mass movements in vineyards of the Anoia-Alt Penedés area (Catalonia, Spain). In D.E. Stott *et al.* (eds.) *Sustaining the global farm*, pp. 812-816. West Lafayette, USA, Purdue University – USDA.

- Pla, I and S. Nacci. 2003. Traditional compared to new systems for land management in vineyards of Catalonia (Spain). In E. Roose (ed.) *Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen*. Bull. Res. Eros. 21:213-223.
- Porta, J., M. Lopez-Acevedo, & R. Rodriguez. 1986. *Técnicas y experimentos en edafología*. Universitat Politècnica de Catalunya. ETSEA. COEAC. Lleida.
- Porta, J., M. Lopez-Acevedo, & R.M. Poch Claret. 2008. *Introducción a la edafología. Uso y protección del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. 451 pp.
- Puyo, M. 1992. *Influencia de diferentes regimenes de riego sobre el desarrollo vegetativo, la productividad, maduración y calidad de vinos Cabernet Sauvignon*. 101 p. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Pontificia Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.
- Ramos, M.C. 2006. Soil water content and yield variability in vineyards of Mediterranean northeastern Spain affected by mechanization and climate variability. *Hydrol. Process.* 20, 2271–2283 (2006)
- Ramos, M.C., and J.A. Martínez-Casasnovas. Soil loss and soil water content affected by land levelling in Penedès vineyards, NE Spain. *Catena* (2007), doi:10.1016/j.catena.2007.03.001.
- Ramos, M.C., and S. Nacci. 1997. Estabilidad estructural de agregados superficiales de suelos del Anoia Penedés (Barcelona) frente al humedecimiento y al impacto de las gotas de lluvia. *Bol. Soc. Española de la Ciencia del Suelo.* 3 (1): 3-12.
- Ramos, M.C., S. Nacci, and I. Pla. 2000. Soil sealing and its influence on erosion rates for some soils in the Mediterranean area. *Soil Science* 165, 396–403.
- Reynier, A. 1995. *Manual de Viticultura. Versión española*. Sotes; Iglesias; Lisarrague (traduc.) Editorial Mundi Prensa. Madrid. España.
- Reynolds and Elrick, 1990 W.D. Reynolds and D.E. Elrick, Ponded infiltration from a single ring. I. analysis of steady state flow, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 (1990), pp. 1233–1241.
- Richards, L.A. and L.R. Weaver. 1943. Fifteen-atmosphere percentages as related to the permanent wilting percentage. *Soil Sci.* 56:331-339.
- Rühl, E.H. and G. Alleweldt. 1985. Investigations into the influence of time of irrigation on yield and quality of grapevines. *Acta Horti* 171: 457-462

- Salazar Hernández, D.M, y P. Melgarejo Moreno. 2005. Viticultura. Técnicas de cultivo de la vid, calidad de la uva y atributos de los vinos. A. Madrid Vicente, Ed. Mundi-Prensa Ed. Madrid. 1º Edición. 325 pp.
- Salazar Hernández, D.M. 2002. Viticultura. Materials vegetals i el seu maneig. UPV. Ed Valencia.
- Sanz Carnero, F. 1982. El viñedo español. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Servicio de Publicaciones Agrarias. Madrid. 300 p.
- Scanlon, B.R., B.J. Andriaski, and J. Bilskie. 2002. Miscellaneous Methods for measuring matric or water potential. 643-670 p. In Dane J.H. & G.C. Topp (eds.) Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Schultz H.R. 1996. Water relations and photosynthetic responses of two grapevine cultivars of different geographical origin during water stress. Acta Horticulturae 427:251-266.
- Schulze E.D. 1988. Adaptation mechanisms of noncultivated arid-zone plants: useful lessons for agriculture. In Drought research priorities for the dryland tropics. (Eds.) F.R. Bidinger and C. Johansen. Patancheru: India: ICRISAT.
- Segura, A., y Llanos, M. 2002. El riego la vid y el vino. Agricultura 837: 201-204.
- Sepulveda, G. and W.M. Kliwer .1986. Effect of high temperature on grapevines (*Vitis vinifera* L.). II Distribution of soluble sugars. Am. J. Enol. 36: 230-259.
- Sharma, M.L., G.A. Gander and C.G. Hunt. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. J. Hydrol. 45: 101-122.
- Smart, R.E. and B.G. Coombe. 1983. Water relations of grapewines, p. 137-196. In T.T. Kozłowski (Ed) Water deficit and plant growth. Vol 7. Academic Press, New York.
- Smithson, P., K. Addison & K. Atkinson. 2008. Fundamentals of the Physical Environment. London, Fourth Edition. 103-106 p.
- Soar, C. J., and B. R. Loveys. 2007. The effect of changing patterns in soil-moisture availability on grapevine root distribution, and viticultural implications for converting full-cover irrigation into a point-source irrigation system. Aust. J. Grape Wine Research 13 (1): 2-13.
- Soil Sci. Soc. Am. J. Glossary of soil science terms. Soil Science Society of America, Madison, WI.

- Soil Survey Staff. 2006. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-SCS, Agric. Handbook. 436. U.S. Govt. Print. Office, Washington, DC, 754 pp.
- Sojka, R.E., W.J. Busscher, and G.A. Lehrsch. 2001. In situ strength, bulk density, and water content relationships of a Durinodic Xeric Haplocalcid soil. *Soil Sci.* 166:520–529.
- Sotes Ruiz, V. 1996a. Efectos del riego localizado de la vid (I). *Vitivinicultura* n°78-79: 58-61.
- Sotes Ruiz, V. 1996b. Efectos del riego localizado de la vid (II). *Vitivinicultura* n°80-81: 58-60.
- Stepniewski, W., J.Glinski, and B.C. Ball. 1994. Effects of compaction on soil aeration properties. p. 167-189. In B.D. Soane and C. van Ouwerkerk (eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam.
- Sykes, J. 1969. Reconsideracao do conceito de unidade de marchamento permanente. *Turrialba* 19: 525-530.
- Tisdal J.M. and J.M. Oades, 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *Soil Sci.* 33: 141-163.
- Tisdall, A.L. 1951. Comparison of methods of determining apparent density of soils. *Aust. J. Agric. Res.* 2: 239-354.
- Topp, G. C., D. R. Lapen, M. J. Edwards, and G. D. Young. 2003. Laboratory Calibration, In-Field Validation and Use of a Soil Penetrometer Measuring Cone Resistance and Water Content. *Vadose Zone Journal* 2:633–641.
- Tricker, 1978 A.S. Tricker, The infiltration cylinder: some comments on its use, *J. Hydrol.* 36 (1978), pp. 383–391.
- University of California, 1985. Spatial variability of soil physical parameters in solute migration: a critical review. EPRI EA-4228. Riverside, CA.
- Uson, A., E. Espinosa, and R.M. Poch. 1998. Effectivity of Soil conservation practices in vineyard soil from Catalonia region, Spain. *Int. Agrophysics*, 12: 155-165.
- van Leeuwen, C., and G. Seguin. 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990). *J. Int. Sci. Vigne Vin.* 28(2):81-110.

- Veihmeyer, F.J. and A.H. Hendrickson. 1952. Does transpirations decrease as the soil moisture decreases? *Trans. Am. Geophys. Un.* 36, 425-448.
- Vepraskas, M.J., 1984. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 1220–1225.
- Voorhees, W. B. 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces alleviating wheel induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 129-133.
- Warrick, A.W., Gardner, W.R., 1983. Crop yield as affected by spatial variations of soil and irrigation. *Water Resour. Res.* 19, 181–186.
- Whalley, W.R. 1993. Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *Journal of Soil Science*, 44: 1-9.
- Wild, A. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Ed. Mundi – Prensa. Madrid. 1045 p.
- Williams, L.E., J.A. Cook, W.M. Kliewer and L.A. Lider. 1994. Grape. Pp 43-75. In: B. Schaffer and P.C. Anderson (eds.). *Handbook of Environmental Physiology of Fruits Crops*. CRC Press. Boca Raton. FL.
- Williams, L.E., R.A. Neja, J.L. Meyer, L.A. Yates, and E.L. Walker. 1991. Postharvest irrigation influences budbreak of Perlette grapevines. *Hortscience* 26: 1081-1086.
- Winkler, A.J., J.A. Cook, W.M. Kliewer and L.A. Lider. 1974. *General viticulture*. Univ. of Calif. Press. Berkeley and Los Angeles, CA.
- Youngs, E.G. 1987. Estimating hydraulic conductivity values from ring infiltrometer measurements. *J. Soil Sci.* 38 (4): 623–632.

7. ANEXO

Tabla I. Descripción del perfil correspondiente al suelo de la loma con riego por goteo (Fig. 5).

Clasificación taxonómica: Xerorthent típico, esquelética franca, métrica, de acuerdo con la Clave del Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2006).

Capacidad de uso: IV.

Material originario: Lutitas

Vegetación natural: cultivos de vides con riego por goteo.

Paisaje: Lomadas en pendientes.

Posición: Loma.

Pendiente del paisaje representado: 13 al 16%. En la calicata 14,6%.

Drenaje: Bien drenado.

Principales limitaciones de uso: erosión hídrica moderada y salinidad a poca profundidad.

Ubicación: Raimat.

Provincia de Lleida.

Coordenadas: 0291689 de latitud N y 4615206 longitud E.

Altitud sobre el nivel del mar: 249,7 m.

A 0-40 cm: Estado de humedad del suelo: seco. Límite de horizonte claro suave. Franco limosa, de color pardo amarillento (10 YR 5/4) en húmedo, y pardo muy claro en seco (10 YR 7/4). Elementos gruesos frecuentes (15%) de gravas gruesas, gravas medias y cantos. Estructuras en bloques subangulares y angulares gruesos y medios, que rompen a bloques subangulares y angulares medios. Consistencia dura, plástica y adhesiva. Eflorescencias blanquecinas de sales. Raíces abundantes.

C1 40-90 cm: Claro suave. Franca, de color pardo (10 YR 5/3) en húmedo, y pardo muy claro en seco (10 YR 7/3). Elementos gruesos muy frecuentes (35%) de lajas, gravas gruesas y cantos. Estructuras en bloques subangulares y angulares gruesos que rompen a bloques subangulares medios, fuertes. Consistencia dura, plástica y poco adhesiva. Raíces abundantes.

C2 30-40 cm: Gradual suave. Franca, de color pardo amarillento oscuro en húmedo (10 YR 4/6), y amarillo parduzco, (10 YR 6/6) en seco. Elementos gruesos muy frecuentes (40%) de gravas gruesas, medias y cantos. Estructura en bloques subangulares y angulares irregulares medios, fuertes. Consistencia dura, poco plástica y poco adhesiva. Raíces comunes.

Tabla II. Descripción del perfil correspondiente al suelo del bajo con riego por goteo (Fig. 6).

Clasificación taxonómica: Xerorthent típico, esquelética franca, méscica.

Capacidad de uso: V.

Material originario: Lutitas

Vegetación natural: cultivos de vides con riego por goteo.

Paisaje: Fondos de valles.

Posición: Bajo.

Pendiente: 1 a 2%. Escurrimiento lento.

Drenaje: moderadamente bien drenado.

Principales limitaciones de uso: Ligera salinidad.

Ubicación: Raimat.

Provincia de Lleida.

Coordenadas: 0291708 de latitud N y 4615277 longitud E.

Altitud sobre el nivel del mar: 240,7 m.

A (0-40 cm): Estado de humedad del suelo: seco. Límite de horizonte claro suave. Franco limosa, de color pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4) en húmedo, y pardo amarillo claro en seco (10 YR 6/4). Elementos gruesos poco frecuentes (15%) de gravas gruesas, y gravas medias. Estructuras laminares gruesas y muy gruesas, con escasos bloques subangulares y angulares finos. Consistencia dura, plástica y adhesiva. Eflorescencias blanquecinas de sales. Raíces abundantes.

A/C (40-70 cm): Claro suave. Franco limosa, de color pardo (10 YR 5/3) en húmedo, y pardo muy claro en seco (10 YR 7/3). Elementos gruesos muy frecuentes (más de 35%) de bloques, cantos y lajas. Estructuras en bloques subangulares y angulares gruesos que rompen a bloques subangulares medios, muy fuertes. Consistencia muy dura, plástica y adhesiva. Raíces comunes.

C1 (70-100 cm): Gradual suave. Franco limosa, de color pardo amarillento en húmedo (10 YR 5/4), y pardo muy claro, (10 YR 7/4) en seco. Elementos gruesos frecuentes (20%) de gravas gruesas, medias y cantos. Estructura en bloques subangulares y angulares irregulares medios, fuertes. Consistencia dura, plástica y adhesiva. Raíces comunes.

C2 (70-100 cm): Gradual suave. Franco limosa, de color pardo amarillento en húmedo (10 YR 5/3), y pardo muy claro en seco (10 YR 7/3). Elementos gruesos frecuentes (20%) de gravas gruesas, y cantos. Estructura en bloques subangulares y angulares irregulares medios, fuertes. Consistencia dura, plástica y adhesiva. Raíces escasas.

Tabla III. Descripción del perfil correspondiente al suelo del Plano con riego por aspersión (Fig. 7).

Calcixerept típico, franca fina, mésica

Capacidad de uso: IV.

Material originario: Lutitas

Vegetación natural: cultivos de vides regadas por aspersión.

Paisaje: Plataformas.

Posición: Plano.

Pendiente: menor del 1%.

Drenaje: Bien drenado.

Principales limitaciones de uso: Ligera erosión hídrica.

Ubicación: Raimat.

Provincia de Lleida.

Coordenadas: 290220 de latitud N y 4618706 de longitud E.

Altitud sobre el nivel del mar: 306 m.

A (0-45 cm): Estado de humedad del suelo: fresco. Límite de horizonte claro suave. Textura franca. Color pardo oscuro (10 YR 3/3) en húmedo, y pardo amarillento a pardo amarillento claro en seco (10 YR 5,5/4). Elementos gruesos poco frecuentes (10%) de gravas gruesas, y gravas medias. Estructuras en bloques subangulares y angulares gruesos. Presencia de gravas con calcrete. Consistencia dura, plástica y adhesiva. Raíces abundantes. Reacción positiva al ácido clorhídrico.

C (45-93 cm): Estado de humedad del suelo: fresco. Límite de horizonte claro suave. Franca, de color pardo (10 YR 4/3) en húmedo, y pardo claro en seco (10 YR 6/3). Elementos gruesos poco frecuentes (10%) de gravas gruesas, y gravas medias. Estructuras en bloques subangulares y angulares gruesos. Consistencia muy dura, plástica y adhesiva. Raíces escasas. Reacción positiva al ácido clorhídrico.

Ab (93-133 cm): Estado de humedad del suelo: fresco. Límite de horizonte gradual suave. Franca, de color pardo amarillento oscuro en húmedo (10 YR 4/4), y pardo claro a pardo muy claro en seco (10 YR 6,5/3). Elementos gruesos poco frecuentes (10%) de gravas gruesas, y gravas medias. Estructuras en bloques subangulares y angulares gruesos. Restos de madera carbonizada. Consistencia dura, plástica y poco adhesiva. Raíces comunes. Reacción positiva al ácido clorhídrico.

Tabla IV. Riegos aplicados por riego por aspersión a las viñas de la variedad Chardonnay en el sitio del plano de Raimat (Catalunya – España) durante las campañas agrícolas 2006/2007 y 2007/2008.

Campaña agrícola: 2006/2007		Campaña agrícola: 2007/2008	
Total de agua de riego aplicada a la fecha	Riego por aspersión (mm)	Total de agua de riego aplicada a la fecha	Riego por aspersión (mm)
04/03/2007	23	22/03/2008	84
12/03/2007	26	12/04/2008	34
23/03/2007	25	19/04/2008	30
04/04/2007	26	26/04/2008	30
23/05/2007	43	30/04/2008	30
06/06/2007	24	03/05/2008	28
17/06/2007	50	10/05/2008	28
21/06/2007	60	17/05/2008	24
26/06/2007	65	24/05/2008	20
27/06/2007	48	31/05/2008	28
19/07/2007	25	06/06/2008	35
26/07/2007	25	14/06/2008	21
04/08/2007	14	21/06/2008	10
11/08/2007	14	30/06/2008	26
18/08/2007	15	26/07/2008	10
25/08/2007	4	28/08/2008	25
Total 2006/2007	487	Total 2007/2008	463

Tabla V. Riegos aplicados bajo riego por goteo a las viñas de la variedad Tempranillo en la loma y en el bajo de Raimat (Catalunya – España) en la campaña agrícola 2007/2008 y en la 2008/2009.

Campaña agrícola: 2007/2008			Campaña agrícola: 2008/2009		
Total de agua de riego aplicada a la fecha	Loma (mm)	Bajo (mm)	Total de agua de riego aplicada a la fecha	Loma (mm)	Bajo (mm)
09/11/2007	15	15	01/10/2008	0	0
01/03/2008	0	0	25/11/2008	21	28
23/04/2008	35	35	17/12/2008	0	0
16/05/2008	39	15	01/03/2009	0	0
28/05/2008	5	4	26/03/2009	0	10
12/06/2008	9	0	04/05/2009	0	0
24/06/2008	43	0	21/05/2009	25	4
11/07/2008	38	0	11/07/2009	57	15
07/08/2008	81	0	18/07/2009	25	0
04/09/2008	78	0	08/08/2009	25	0
13/09/2008	8	0	04/09/2009	36	0
24/09/2008	11	0	11/09/2009	12	2
30/09/2009	4	0	30/09/2009	27	0
Total	366	69	Total	229	58

