



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TRANSPORTE DE SOLUTOS EN EL FLUJO DE AGUA EN RIEGO POR SURCOS

TESIS DOCTORAL

MARÍA NOFUENTES MUÑOZ

DIRECTORES:

MARÍA JOSÉ POLO GÓMEZ
JUAN VICENTE GIRÁLDEZ CERVERA

Departamento de Agronomía

Universidad de Córdoba

Octubre 2007



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA
E.T.S.I.AGRÓNOMOS Y MONTES

Campus de Rabanales
Colonia de San José, Edif. 4,
1ºder.
14071 CÓRDOBA
SPAIN
Teléf. 34 - 957 - 21 26 62

María José Polo Gómez y Juan Vicente Giráldez Cervera, profesores del Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba, como directores de la tesis doctoral de la alumna de tercer ciclo de este Departamento María Nofuentes Muñoz, titulada *Transporte de solutos en el flujo de agua en riego por surcos*, informa que la doctoranda ha cubierto los objetivos propuestos en la tesis.

En su desarrollo, la doctoranda ha abordado el estudio del movimiento de los solutos en el flujo superficial bajo un triple enfoque: experimental en campo, experimental en canales de flujo en laboratorio, y teórico con la elaboración de modelos que integran y explican los anteriores resultados, con completa satisfacción.

Por todo ello creemos que procede la presentación de la tesis para la tramitación de la exposición y defensa.

Córdoba, 15 de junio de 2007

María José Polo Gómez

Juan Vicente Giráldez Cervera

Este trabajo se ha llevado a cabo dentro de los proyectos AGL 2000-1476 *Manejo integrado de riego por surcos* y AGL 03-01958 *Transporte de agroquímicos y sedimentos en surcos de riego*. Financiado por el Plan Nacional de I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia.

Resumen: El riego por surcos es el sistema de riego por superficie más eficiente, y sigue siendo usado en la actualidad tanto en países en desarrollo como en países avanzados. La aplicación de nutrientes al agua de riego es un método de fertilización eficiente y económico que, además, evita posibles daños cuando el cultivo está establecido, pero obtener resultados satisfactorios no es sencillo, ya que la eficiencia de la fertilización depende en gran medida de las variables del riego. En este trabajo se evalúa la influencia de las características del flujo superficial de agua en el transporte de fertilizante y, por tanto, en el resultado final de la fertirrigación: rendimiento de aplicación (Ra) y uniformidad de distribución (UD) final. Para ello, se han realizado una serie de ensayos en campo donde las variables de diseño fueron el caudal aplicado en cabecera, el momento de aplicación del fertilizante al flujo de agua y el número de riego en el que se realiza el proceso (primer o segundo riego). El análisis de estos resultados se realizó programando un modelo numérico 1D que resuelve las ecuaciones de circulación de agua y transporte de sustancias en superficie, sobre medio poroso (incluyendo la componente de infiltración), utilizando un coeficiente de dispersión longitudinal (E) uniforme y constante. El modelo se calibró con los resultados experimentales de los ensayos de campo y se obtuvo una expresión adimensional entre el valor efectivo de E y las variables de operación del proceso de fertirriego (condiciones del flujo superficial de agua, tiempos de aplicación del fertilizante) y el tipo de suelo; esta relación ha sido validada con medidas de ensayos previos. Usando esta relación para elegir el valor de E correspondiente a cada caso, se efectuaron numerosas simulaciones numéricas del proceso de fertirriego en surcos, para evaluar la influencia sobre los resultados de Ra y UD de: las condiciones iniciales del suelo, el momento de la aplicación de fertilizante y su duración. Los resultados óptimos alcanzados corresponden a aplicaciones cortas realizadas antes de que el frente de avance del agua alcanzara el final del surco, disminuyendo Ra y aumentando UD con aplicaciones tardías, ya en condiciones permanentes del flujo de agua, y viceversa. El modelo acoplado permite generar diagramas de operación óptima de fertirriego.

Para realizar una primera aproximación del proceso de transporte en condiciones marcadamente transitorias, se completó el trabajo con un estudio experimental del proceso de transferencia de sustancias desde el suelo al flujo superficial de agua y su transporte, a partir de ensayos en un canal hidráulico de pendiente constante que se rellenó de suelo, utilizando el caudal en cabecera como variable de diseño experimental. En una sección estrecha (franja estrecha) se colocó suelo con alta concentración de trazador y se midió la conductividad eléctrica del agua como indicador de su concentración en el flujo superficial de agua. El modelo numérico 1D anteriormente descrito se utilizó para cuantificar el caudal en cada punto del canal y, con este, estimar las cargas efectuadas desde el suelo. Los resultados obtenidos muestran que a mayores caudales de entrada se alcanzan mayores valores de concentración en el flujo de agua, aunque la duración del proceso de transferencia disminuye. Asimismo, cuando la longitud del tramo concentrado en sustancia aumenta, el proceso global de transferencia no aumenta de forma lineal en relación con el caso de franja estrecha con las mismas condiciones de flujo.

Abstract: Furrow irrigation is the most efficient surface irrigation system, used nowadays in both developed and developing countries. Nutrient application to surface water is an efficient and economic fertilization method, which avoids crop damage. However, final good results are not easy to achieve, depending strongly on water flow variables. This work evaluates the surface flow effects on fertilizer transport, and the final fertigation results: Application Efficiency (Ea) and Distribution Uniformity (UD). To this purpose, a serial of field experiments were carried out, with the inflow water flow, the fertilizer application moment, and the irrigation number (first or second irrigation) as design variables. A 1-D numerical model was programmed to analyze the experimental results, which solves shallow water and solute transport equations over porous medium (including infiltration as a boundary condition), by means of uniform and constant value of the Longitudinal Dispersion Coefficient (E). The model was calibrated and validated, and a dimensionless expression between E effective values found and the fertigation process variables (surface flow characteristics, fertilizer application time) and soil type; this relationship was also validated from previous experimental work. This function was used to choose the E value corresponding to each individual run of the 1D numerical transport model in a series of simulated performances of fertigation cases, carried out to evaluate the effects of soil initial conditions, fertilizer application moment and duration on the final values of Ea and UD . Optimal results were obtained for short applications occurring before the water flow reached the end of the furrow, with decreasing Ea and increasing UD values for later applications under steady flow conditions, and vice versa. The validated coupled model allows the generation of optimal operational fertigation diagrams.

Finally, a first approximation to transport 1D modelling under transient conditions was achieved by laboratory work. Solute transfer from soil to surface runoff, and transport process characterization was approached from serial of experiments in a hydraulic flume with uniform slope, filled with soil, with the inflow water rate as design variable. A concentrated short section (short fringe) of soil was located 4 m downstream from the inflow water source, and water electrical conductivity was measured as a tracer of solute concentration in surface flow. The water flow characteristics along the channel were calculated by the 1D numerical model described above, and used to estimate solute loads from soil to runoff. The results showed an intensification of the transfer process with increasing water flow rates, together with a reduction of its significant duration. Besides, when the concentrated fringe is longer, the global transfer process exhibits strong non-linearity, by comparison to the results with a short fringe and similar water flow conditions.

Agradecimientos

Son muchas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo y a las que quiero expresar mi más sincero agradecimiento.

A mis directores por su inestimable ayuda y paciencia durante estos años.

Al profesor Luis Teixeira por facilitarnos el laboratorio de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Castilla la Mancha, en el que se realizó una parte experimental importante de este trabajo.

A Eduardo, el mejor técnico que uno se puede encontrar en un laboratorio de hidráulica, con él no existieron los problemas.

A Rafa, José Manuel y “el Rubio” por los días de trabajo en el campo, que además de duros fueron muy divertidos.

A Tani por su ayuda en los ensayos de laboratorio. A Isa por su trabajo tanto en laboratorio como en campo.

A Pilar García-Navarro, por su gran ayuda, apoyo y ánimo en la realización del método numérico. El mes que compartí con su grupo en Zaragoza fue un punto de inflexión en mi trayecto; quisiera agradecerles a todos haberme hecho sentir como en casa.

A Javier Murillo, por tantas conversaciones en las que nunca dejó de resolverme problemas numéricos, su apoyo durante meses ha sido de una ayuda incalculable.

A Cristina, mi compañera y amiga, de la que siempre he recibido apoyo durante la realización de este trabajo.

A María José, mi amiga, contigo nunca dejo de crecer.

A las incorporaciones del último año, Elena, Jesús y Marta, y a todos los compañeros del área, el día a día siempre es más divertido.

A mis padres y hermana por su confianza y comprensión siempre.

A Javi, mi compañero de viaje, del que siempre he recibido apoyo y confianza, animándome a hacer *un esfuerzo más* en los momentos críticos.

A Javi

INDICE GENERAL

1. Introducción y objetivos	1
1.1 Descripción del fertirriego por surcos	5
1.2 Transporte del fertilizante en el flujo superficial de agua	7
1.3 Modelado del fertirriego por surcos.....	8
Objetivos	13
2. Modelado 1-D de flujo de agua y solutos en un surco de riego.....	15
2.1 Flujo de agua	15
2.1.1 Operación del riego por surcos	15
2.1.2 Clasificación del flujo de agua.....	17
2.1.3 Ecuaciones que describen el flujo de agua.....	18
2.1.3.1 Modelado del proceso de infiltración.....	20
2.1.3.2 Estimación de los parámetros de la función de infiltración.....	21
2.2 Flujo de solutos.....	25
2.2.1 Ecuación del transporte de solutos en el flujo de agua.....	25
2.2.2 Clasificación del régimen en función de los procesos de transporte	29
2.3 Modelado numérico	33
2.3.1 Formas de describir el movimiento y propiedades principales de los esquemas numéricos	34
2.3.1.1 Dominio de cálculo, aproximación de las derivadas y propiedades de los esquemas numéricos	34
2.3.2 Clasificación de los términos de las ecuaciones de Saint Venant.....	37
2.3.3 Resolución de los puntos interiores de la malla	38
2.3.3.1 Tratamiento de los términos dinámicos.....	38
2.3.3.2 Tratamiento de la infiltración	41
2.3.3.3 Tratamiento de la fricción	41
2.3.4 Condiciones de contorno	42
2.3.5 Tratamiento de solutos	44
3. Ensayos de campo: Diseño, calibración del modelo de flujo de agua y resultados experimentales	48
3.1 Descripción de los ensayos	48
3.1.1. Diseño experimental.....	48

3.1.2	Medidas de caudal de entrada y salida	51
3.1.3	Aplicación y medida de trazador	52
3.1.4	Geometría de los surcos	53
3.1.5	Toma de muestras de suelo para el análisis de bromuro.....	53
3.2	Medidas experimentales y calibración del modelo de agua	55
3.3	Evolución del soluto en el flujo superficial de agua: Resultados experimentales..	58
3.3.1	Evolución temporal de soluto en el flujo de agua.....	58
3.3.2	Rendimiento de aplicación de agua y de soluto.....	64
3.3.3	Estimación de la masa de trazador infiltrada a partir de muestreos de suelo	65
3.3.4	Uniformidad de distribución longitudinal de soluto en el suelo	66
3.4	Conclusiones.....	70
4.	Optimización de la fertirrigación en surcos	71
4.1	Calibración del modelo de transporte de solutos.....	72
4.1.1	Distribución vertical de solutos en el suelo	80
4.2	Relación del coeficiente de dispersión longitudinal con las variables de operación de fertirriego	84
4.2.1	Obtención de una función paramétrica que relacione el coeficiente de dispersión con las variables de operación de fertirriego.....	85
4.2.2	Validación	88
4.2.2.1	Calibración del flujo de agua.....	89
4.2.2.2	Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal y validación de la función E^*-T^*	90
4.3	Simulación de operaciones de fertirriego.....	95
4.3.1	Resultado de las simulaciones	96
4.3.2	Influencia del orden de riego en que se realice la aplicación.....	101
4.4	Curvas de operación del fertirriego.....	103
4.5	Conclusiones.....	107
5.	Transferencia de solutos desde el suelo al flujo superficial de agua	109
5.1	Introducción y objetivos.....	109
5.2	Ensayos de laboratorio.....	112
5.2.1	Descripción de los ensayos.....	112
5.3	Resultados	116
5.3.1	Resultados experimentales.....	116

5.3.2 Dinámica del proceso de transferencia: obtención de una función de carga desde el suelo	119
5.3.3 Modelo de transporte de solutos en superficie: casos de franja estrecha	124
5.3.3.1 Calibración del ensayo correspondiente a la franja de 0.7 m de longitud	127
5.4 Conclusiones	129
6. Conclusiones.....	131
A. Transporte superficial en el surco de sustancias aplicadas al agua de riego	131
B. Transferencia de sustancias desde la superficie del suelo al flujo superficial de agua	132
7. Bibliografía	134
Anejos	144
Anejo I	145
Anejo II.....	148
Anejo III	153
Lista de símbolos.....	155

INDICE DE TABLAS

1.1 Superficie regada a cada tipo de cultivo.....	2
3.1 Fracciones de arena, limo y arcilla en el suelo de la parcela experimental	49
3.2 Características de los ensayos de campo	50
3.3 Características geométricas de los surcos.....	55
3.4 Valores ajustados de los parámetros de la ecuación de infiltración y en coeficiente de aspereza de Manning en todos los ensayos de campo.....	56
3.5 Errores relativos de los valores calculados y medidos de las curvas de avance, y el error del balance de masa del modelo.....	57
3.6 Valores de la concentración y carga iniciales en cada ensayo.....	58
3.7 Rendimiento de aplicación de agua.....	64
3.8 Rendimiento de aplicación de soluto.....	65
3.9 Resultado del análisis de las muestras de suelo	66
3.10 Uniformidad de distribución de soluto	69
4.1 Valores del coeficiente de dispersión longitudinal.....	79
4.2 Coeficientes ajustados de la ecuación 4.3.....	87
4.3 Características de los ensayos utilizados en la validación de la función E^*-T^*	89
4.4 Parámetros ajustados de la ecuación de infiltración	89
4.5 Errores en la calibración de los ensayos de agua	90
4.6 Valores estimados del coeficiente de dispersión longitudinal.....	91
4.7 Comparación de los valores de rendimiento de aplicación, experimental y calculado.....	94
4.8 Valores estimados de E en las simulaciones correspondientes a primer riego.....	97
4.9 Valores estimados de E en las simulaciones correspondientes a segundo riego.....	98
4.10 Ra y UD en las simulaciones correspondientes a primer riego.....	99
4.11 Ra y UD en las simulaciones correspondientes a segundo riego.....	100
4.12 Valores del coeficiente de Dispersión Longitudinal, Ra y UD	106
5.1 Caudal de entrada, masa de trazador y humedad inicial del suelo.....	115
5.2 Valores ajustados de los parámetros de la ecuación de infiltración y el coeficiente de aspereza de Manning en todos los ensayos de laboratorio.....	116
5.3 Parámetros de la función de carga ajustada para los ensayos de franja estrecha.....	122

INDICE DE FIGURAS

2.1 Tiempos característicos y fases principales del riego por surcos.....	17
2.2 Malla discreta de puntos del dominio en el espacio y tiempo.....	35
3.1 Parcela experimental	49
3.2 Aforadores situados en la cabecera de los surcos	51
3.3 Aforadores situados en la cola de los surcos	52
3.4 Estación de medida durante un ensayo	52
3.5 Perfilómetro de varillas	53
3.6 Puntos de toma de muestras de suelo en las estaciones de medida del surco	54
3.7 Curva de avance e hidrograma de escorrentía para los ensayos realizados en primer riego (ensayos 1 y 2).....	56
3.8 Curva de avance e hidrograma de escorrentía para los ensayos realizados en segundo riego (ensayos 3 y 4).....	57
3.9 Evolución temporal de la concentración y carga de soluto durante el ensayo 1...	59
3.10 Evolución temporal de la concentración y carga de soluto durante el ensayo 2.	60
3.11 Evolución temporal de la concentración y carga de soluto durante el ensayo 3.	62
3.12 Evolución temporal de la concentración y carga de soluto durante el ensayo 4.	63
3.13 Ejemplo de la longitud asignada a cada estación de muestreo	65
3.14 Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 1	67
3.15 Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 2	67
3.16 Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 3	68
3.17 Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 4	68
4.1 Ensayo 1 (primer riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada.....	72
4.2 Ensayo 1 (primer riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada.....	73
4.3 Ensayo 2 (primer riego), aplicación 1. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada.....	74
4.4 Ensayo 2 (primer riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada.....	74
4.5 Ensayo 2 (primer riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada.....	75

4.6 Ensayo 3 (segundo riego), aplicación 1. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada	76
4.7 Ensayo 3 (segundo riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada	76
4.8 Ensayo 3 (segundo riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada	77
4.9 Ensayo 4 (segundo riego), aplicación 1. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada	78
4.10 Ensayo 4 (segundo riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada	78
4.11 Ensayo 4 (segundo riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental y calculada y características de la calibración en la tabla asociada	79
4.12 Distribución vertical del soluto en el suelo en el primer ensayo	81
4.13 Distribución vertical del soluto en el suelo en el segundo ensayo	81
4.14 Distribución vertical del soluto en el suelo en el tercer ensayo	82
4.15 Distribución vertical del soluto en el suelo en el cuarto ensayo	83
4.16 Valores de E calibrados frente al tiempo de aplicación. Ensayos 1 y 3, primer y segundo riego en el primer grupo de surcos; ensayos 2 y 4, primer y segundo riego en el segundo grupo de surcos	85
4.17 Evolución temporal a lo largo del riego de la velocidad media superficial del agua en el surco para los ensayos 1 y 2 (primer riego), y 3 y 4 (segundo riego)....	87
4.18 Función paramétrica adimensional que relaciona el coeficiente de dispersión longitudinal efectivo en un riego con el tiempo de aplicación del fertilizante	88
4.19 Tiempos de avance e hidrogramas de escorrentía, experimentales y calculados.	90
4.20 Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.1, aplicación 1	91
4.21 Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.1, aplicación 2	92
4.22 Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.2, aplicación 1	92
4.23 Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.2, aplicación 2	93
4.24 Influencia del orden del riego en el rendimiento de aplicación	102
4.25 Influencia del orden de riego en la uniformidad de distribución	102

4.26 Curva de operación de fertirriego en primer riego	103
4.27 Curva de operación de fertirriego en segundo riego	104
4.28 Evolución temporal de la concentración de fertilizante en el agua de riego a lo largo del surco.....	105
4.29 Distribución longitudinal final de fertilizante en el suelo	105
4.30 Distribución vertical final de fertilizante en el suelo	105
5.1 Canal de laboratorio	112
5.2 Preparación y recogida del suelo en campo	113
5.3 Canal relleno de suelo y estructura de remanso en el extremo de entrada de agua en la cabecera.....	114
5.4 Tiempo de avance medido y tiempos calculados en los ensayos.....	116
5.5 Evolución temporal de los números de Reynolds y Froude.....	117
5.6 Evolución temporal de soluto en los ensayos 1 y 2 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)	117
5.7 Evolución temporal de soluto en los ensayos 3 y 4 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)	118
5.8 Evolución temporal de soluto en los ensayos 5 y 6 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)	118
5.9 Evolución temporal de soluto en el ensayo 7 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)	118
5.10 Evolución temporal de la carga de soluto y el caudal en la sección donde se situó el trazador en los ensayos 1 y 2 respectivamente.....	120
5.11 Evolución temporal de la carga de soluto y el caudal en la sección donde se situó el trazador en los ensayos 3 y 4 respectivamente.....	120
5.12 Evolución temporal de la carga de soluto y el caudal en la sección donde se situó el trazador en los ensayos 5 y 6 respectivamente.....	121
5.13 Velocidad media del flujo y caudal de entrada frente a frente a β y W_0	122
5.14 Función de carga experimental (puntos) y ajustada (línea).....	123
5.15 Ampliación de la figura 80 correspondiente a los 50 primeros segundos.....	123
5.16 Estaciones 2 y 3 del ensayo 1 respectivamente. Los símbolos representan los datos experimentales y la línea el resultado obtenido con el modelo.....	124
5.17 Estaciones 2 y 3 del ensayo 2 respectivamente. Los símbolos representan los datos experimentales y la línea el resultado obtenido con el modelo.....	125

5.18 Estaciones 2 y 3 del ensayo 3 respectivamente. Los símbolos representan los datos experimentales y la línea el resultado obtenido con el modelo.....	125
5.19 Estaciones 2 y 3 del ensayo 4 respectivamente. Los símbolos representan los datos experimentales y la línea el resultado obtenido con el modelo.....	125
5.20 Estaciones 2 y 3 del ensayo 5 respectivamente. Los símbolos representan los datos experimentales y la línea el resultado obtenido con el modelo.....	126
5.21 Estaciones 2 y 3 del ensayo 6 respectivamente. Los símbolos representan los datos experimentales y la línea el resultado obtenido con el modelo.....	126
5.22 Estaciones 2 y 3 del ensayo 7 respectivamente.....	128

1. Introducción y objetivos

El aumento creciente de la superficie cultivada en regadío en los últimos 50 años contribuye a que el agua sea un recurso cada vez más escaso. Esta escasez se acentúa con la frecuente ineficiencia de los sistemas de riego, lo que provoca conflictos entre los distintos grupos demandantes de agua. Las malas perspectivas de aumentar los recursos hidráulicos y la preocupación por la preservación de la calidad de las aguas hacen necesario mejorar el uso del agua de riego.

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación ha elaborado un análisis de los regadíos españoles durante el periodo 2002/2006, basado en los resultados de la Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE) (MAPA, 2006), en la que se ha venido recogiendo anualmente información sobre los sistemas de riego ligados a parcelas y a los cultivos que las ocupan.

Del total de la superficie de regadío en España, que asciende a 3.3 Mha, el riego localizado se utiliza en el 41.6 % de la superficie, concretamente en 1.381.835 hectáreas, frente al riego por gravedad, que supone un 35 % del total. Ambos sistemas suponen el 76 % de los regadíos, situándose en posiciones inferiores el riego por aspersión, utilizado en el 23.4 % de la superficie.

De acuerdo con el análisis sectorial, destaca el predominio del riego localizado en el olivar y el viñedo, por encima del 85 %, seguido por los frutales y los cítricos, con más del 60 %. Los datos recogidos demuestran también que la mitad de la superficie de hortalizas, incluidas las de invernadero, se riega con estos sistemas más modernos, realizándose el resto por gravedad y aspersión, empleándose también este último sistema de riego para la mitad de la superficie dedicada a tubérculos y cultivos industriales, como la remolacha, el girasol o el algodón. Sólo los cereales y las plantas forrajeras son cultivos en los que se utiliza principalmente el riego por gravedad, en prácticamente el 60 % de su superficie. En la tabla 1.1 se presenta la superficie total regada y la correspondiente a riego por gravedad para cada tipo de cultivo.

Tabla 1.1. Superficie regada asociada a cada tipo de cultivo.

<i>Cultivo</i>	<i>Superficie total (Mha)</i>	<i>Superficie regada (%)</i>	<i>Superficie regada por gravedad (%)</i>
Cereales	6.56	26.7	58.7
Cítricos	0.32	9.3	28.6
Forrajeras	0.86	8.5	59.3
Frutales	1.05	7.6	32.7
Hortalizas	0.23	6.2	20.3
Industriales	0.78	6.1	30.0
Leguminosas grano	0.27	0.7	23.7
Olivar	2.48	16.7	7.2
Tubérculos	0.06	1.4	18.5
Viñedo	1.13	9.6	4.0

Aunque la evolución de los sistemas de riego tiende hacia el riego localizado, actualmente el 35 % de la superficie total regada en España utiliza el riego por superficie, que se caracteriza porque el agua se distribuye en el campo a la vez que se va infiltrando, lo que hace que distintos puntos del campo estén cubiertos de agua durante distintos tiempos; esta particularidad complica el manejo del sistema y, por tanto, que el resultado final sea el deseado, especialmente cuando la velocidad de infiltración es alta, el terreno no está bien explanado o el manejo no es adecuado. Por tanto, es muy importante que el diseño sea

bueno y evite pérdidas importantes de agua, tanto por escorrentía como por filtración profunda.

El diseño, evaluación y simulación de los sistemas de riego por superficie radica en el conocimiento de las propiedades de infiltración del suelo y del movimiento del agua sobre el mismo. La variación espacial (y temporal) de la velocidad de infiltración hace que el manejo de estos sistemas sea especialmente complejo.

Existen varios tipos de riego por superficie:

1. Riego por inundación: consiste en hacer discurrir el agua por el terreno, y según el tipo de suelo, su nivelación y cultivo, la infiltración varía de una forma u otra. La forma de la superficie a regar, el tablar, es generalmente rectangular, y su tamaño suele variar entre 0.3 y 0.7 ha. Se caracteriza porque la parcela debe estar perfectamente nivelada y el agua avanza debido a su propia inercia.
2. Riego por escorrentía en tablar: se caracteriza por una pendiente en el tablar. Pueden ser libres o cerrados, según esté abierta o cerrada la cola del tablar.
3. Riego por surcos: este tipo se caracteriza porque la superficie del suelo está ondulada formando canales a lo largo de los que circula el agua de forma independiente. La correcta explanación es muy importante para que el agua corra sin dificultad, sin encontrar obstáculos en su recorrido, pero sin causar erosión.

La aplicación de nutrientes al cultivo con el agua de riego, “fertirriego”, es un método de fertilización eficiente y económico, que además reduce el gasto energético, el número de labores agrícolas, la compactación del suelo, y evita los inconvenientes del uso de maquinaria cuando el cultivo está establecido (Abbasi *et al.*, 2003b). Su práctica implica que la eficiencia de la fertilización dependa en gran medida de las variables del riego. Así, por ejemplo, la eficiencia global del fertirriego alcanza valores altos en riego localizado, tanto en RENDIMIENTO como en UNIFORMIDAD de DISTRIBUCIÓN, dadas su escorrentía nula y la elevada densidad de puntos de aplicación. En el otro extremo, en los

sistemas de riego por gravedad esta eficiencia del fertirriego depende de las condiciones de transporte en el flujo superficial de agua, las cuales quedan determinadas, por una parte, por las características y el estado del suelo en el momento del riego y por el manejo que se haga de este, y por otra, por lo que se podrían denominar los aspectos temporales de la aplicación del fertilizante: momento del inicio de esta, su duración y el número del riego en que se lleve a cabo. Esta eficiencia desde el punto de vista agrícola conlleva asimismo una adecuada gestión desde el punto de vista ambiental, pues las pérdidas de agua con nutrientes por escorrentía o filtración profunda acarrearán un gran riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Por tanto, es interesante el estudio de esta práctica en el riego por superficie debido a la gran sensibilidad de la uniformidad de distribución del agua, y del fertilizante, a las variables del manejo en estos sistemas (Boldt *et al.*, 1994; Abbasi *et al.*, 2003a). Pero también hay que destacar que estos sistemas de riego son la única alternativa existente en numerosas regiones del mundo, encontrándose en la bibliografía trabajos que evalúan estos sistemas en las zonas regables de China, concretamente el noroeste del país (Kang *et al.*, 2000), Uzbekistán (Horst *et al.*, 2005; Ibragimov *et al.*, 2007), Pakistán (Latif *et al.*, 2004), Irán (Sepaskhah *et al.*, 2002; Rasoulzadeh *et al.*, 2003), Turquía (Akkuzu *et al.*, 2007), siendo también muy utilizado en países con un gran desarrollo tecnológico como son EE.UU. (Playán *et al.*, 2004; Zerihun *et al.*, 2005a), Australia (Esfandiari *et al.*, 2001; Khatri *et al.*, 2006) y Francia (Taconet *et al.*, 2006), entre otros. Por todo ello se justifica el interés en profundizar en el conocimiento de aquellos aspectos de su manejo que optimicen su gestión y permitan establecer pautas de fertirriego eficientes desde el punto de vista del cultivo, de los recursos y del entorno.

Dentro de las modalidades de riego por gravedad, el riego por surcos necesita normalmente menos cantidad de agua para regar adecuadamente la misma superficie que el riego por inundación o por escorrentía en tablao, por lo que las pérdidas por filtración profunda o escorrentía son menores. Además, evita la aparición de posibles enfermedades en cultivos como el maíz, el algodón, la remolacha, el melón, el tomate, el naranjo o limonero, entre otros, al no existir contacto directo agua-planta (parte aérea). Estas

características hacen del riego por surcos un sistema generalmente más eficiente y adecuado entre los sistemas de riego por superficie.

1.1. Descripción del fertirriego por surcos

La práctica del fertirriego se puede realizar de diferentes formas en función del momento en que se aplica fertilizante al flujo de agua y la duración de esta aplicación, buscando siempre como objetivo final obtener la mejor eficiencia, entendida de modo global. Uno de los factores fundamentales para que se produzcan buenos resultados es que la mezcla que se produzca entre el flujo de agua y el fertilizante sea completa; así todo lo que se infiltre contendrá nutrientes que quedarán a disposición del cultivo. Cuando la relación de mezcla entre el fertilizante y el agua sea constante durante el riego, la uniformidad de aplicación del fertilizante será la misma que la del riego (Playán y Faci, 1997a) obteniéndose así los mismos resultados en eficiencia de riego y fertilización, con lo que el manejo de la fertirrigación resulta más sencillo, al ir compaginados adecuadamente ambos movimientos. Pero cuando la aplicación de fertilizante se realiza de forma puntual, o durante un intervalo de tiempo menor que el tiempo del riego, la uniformidad del fertilizante será mayor, menor o igual que la del riego por lo que el manejo de la fertirrigación será más difícil.

Normalmente la aplicación de fertilizante se realiza en forma de solución concentrada, aplicándolo al flujo de agua durante un tiempo determinado; el momento de aplicación puede influir considerablemente en el tipo de mezcla que se producirá entre la solución concentrada y el flujo de agua, dependiendo por ejemplo de si se realiza al comienzo del riego o cuando se han alcanzado condiciones permanentes. Este trabajo pretende incidir, entre otros aspectos, en el análisis del momento óptimo de la aplicación.

Los primeros ensayos experimentales dirigidos a estudiar el fertirriego en riego por superficie utilizaron fertilizante en estado sólido, aplicándolo directamente al flujo superficial; el resultado obtenido fue bastante negativo por una baja uniformidad de distribución final de fertilizante en el suelo (Playán y Faci, 1997b). Posteriormente se utilizó

fertilizante disuelto previamente en agua, facilitando la mezcla fertilizante-agua de riego, obteniéndose mejores resultados pero sin solucionar todos los problemas ya que, por un lado, si la uniformidad de distribución del agua es baja también lo es la del fertilizante, y por otro, cuando se produzcan pérdidas por escorrentía, se perderá fertilizante (Playán y Faci, 1997a).

El manejo de estos sistemas con el acoplamiento de fertilizante no es sencillo ya que, aunque la uniformidad de distribución del agua sea adecuada, si el rendimiento de aplicación es bajo y se producen pérdidas por escorrentía al final del surco, se producirán pérdidas de fertilizante, con la consecuente pérdida económica y posible contaminación aguas abajo. Se puede producir el caso contrario: que existiendo un buen rendimiento de aplicación existan pérdidas por filtración profunda con la consecuente salida de fertilizante, favoreciéndose la contaminación de acuíferos. Una adecuada programación debe contemplar, por tanto, ambas eficiencias (Eisenhauer *et al.*, 1991).

Los índices que evalúan el resultado de la fertirrigación son los mismos que se utilizan en riego, así se puede definir el rendimiento de aplicación de fertilizante como la diferencia entre la cantidad aportada al sistema y la que lo abandona (ec. 1.1). La uniformidad de distribución, adoptando la definición de Merriam y Keller (1978), es la relación entre la aplicación media de fertilizante del menor cuarto de la parcela y la aplicación media total aplicada (ec. 1.2). Un buen resultado en la fertirrigación debe considerar ambos índices tanto para el agua como para el fertilizante, lo que implica un buen diseño y manejo. Ambas definiciones se expresan como:

$$Ra_{fert} = \frac{Me - Ms}{Me} 100 \quad (1.1)$$

$$UD_{fert} = \frac{\bar{M}_{25}}{\bar{M}_t} 100 \quad (1.2)$$

donde Me y Ms representan la masa de fertilizante de entrada y de salida de la zona radicular, respectivamente. \bar{M}_{25} y \bar{M}_t , la masa media de fertilizante infiltrada en el cuarto del surco donde la infiltración de fertilizante es menor y la masa media infiltrada en todo el

surco, respectivamente. Sabillón y Merkley (2004) utilizan en su trabajo como función a maximizar el producto de Ra_{fert} (en tanto por uno), y un coeficiente de uniformidad equivalente al coeficiente de Christiansen, desarrollado para cuantificar la uniformidad de aplicación del agua, expresado también en tanto por uno. Este coeficiente de uniformidad no distingue las zonas más desfavorables del surco (Zerihun *et al.*, 2003), ya que proporciona la desviación media de la distribución con respecto a la uniformidad de distribución media, por lo tanto en este trabajo se ha escogido la propuesta de Merriam y Keller para evaluar la Uniformidad de Distribución.

1.2. Transporte del fertilizante en el flujo superficial de agua

El transporte del fertilizante en el flujo de agua está condicionado por los procesos de advección y dispersión, que a su vez dependen de las condiciones del flujo superficial (que dependen del proceso de infiltración) y de las características de la aplicación. Cuando en el transporte domina la advección, el movimiento de las partículas de fertilizante queda suficientemente descrito por el campo medio de velocidades del flujo de agua, y el grado de mezcla durante su avance experimenta poca variación con respecto a su valor inicial en el punto de aplicación. Cuando el transporte está dominado por los procesos difusivos, se favorece la mezcla agua-fertilizante a lo largo del surco y el movimiento neto de las partículas de fertilizante no se puede explicar suficientemente con el valor medio de velocidad del flujo de agua; estas condiciones se producen cuando el flujo tiene carácter transitorio que potencia la difusión turbulenta, ya que la velocidad del flujo en un punto sufre unas fluctuaciones aleatorias y las partículas fluidas siguen trayectorias irregulares (Rutherford, 1994).

El estado inicial del suelo condiciona directamente el tipo de flujo que se dará en superficie; así, el flujo circulante sobre un suelo recién labrado y seco obedecerá a una infiltración alta que necesitará más tiempo para estabilizarse que cuando el suelo presenta una mayor humedad inicial, o haya recibido agua previamente y tenga un lecho más consolidado. Este último alcanzará antes las condiciones de flujo permanente con una

velocidad superficial media mayor y, por tanto, tendrá un carácter más advectivo en el proceso de transporte (Chapra, 1997).

Todo esto influye en el resultado final de la fertirrigación, tanto en el rendimiento de aplicación, que será mayor en los casos de mayor infiltración, como en la uniformidad de distribución del fertilizante en el suelo, que se verá favorecida por los flujos más uniformes. Por eso es importante, en cada caso, realizar la aplicación del fertilizante cuando las condiciones del flujo de agua favorezcan los valores adecuados finales tanto del rendimiento como de la uniformidad del fertirriego.

1.3. Modelado del fertirriego por surcos

Diversos autores han estudiado y modelado la fertirrigación en surcos; entre los primeros se encuentran trabajos como el de Boldt *et al.* (1994), que desarrolló el modelo SIFUM (Surge Irrigation Fertigation Uniformity Model) de simulación de la distribución, uniformidad y pérdidas por escorrentía superficial de la fertirrigación en riego por pulsos en surcos. Este modelo no resuelve la ecuación de transporte; utiliza las salidas del modelo de simulación de circulación de agua en surcos de riego SIRMOD (Walker, 1993) y, con los valores de infiltración, estima la cantidad de fertilizante que se infiltra en cada punto. El modelo es puramente advectivo y asume un movimiento del soluto de tipo pistón.

García-Navarro *et al.* (2000) modelaron el transporte de solutos en riego por superficie resolviendo las ecuaciones de Saint Venant que describen el flujo de agua y la ecuación de advección-dispersión para el transporte de soluto utilizando el esquema numérico de MacCormack. Calibraron y validaron su modelo 1D con los datos experimentales de ensayos realizados previamente por Playán y Faci (1997b) en riego en tablar. En su trabajo comparan dos tipos de modelos, advección pura y advección-dispersión; calibran el coeficiente de dispersión longitudinal para el caso de flujo permanente, con lecho impermeable, y lo validan con los resultados obtenidos en lecho permeable, adoptando un valor constante de este coeficiente en todos los casos. Los resultados obtenidos con el modelo de advección-dispersión mejoraron los

correspondientes al supuesto de transporte advectivo, por lo que evidenciaron la importancia del efecto de la dispersión en estas condiciones de transporte.

Abbasi *et al.* (2003b) presentaron un trabajo en el que desarrollaron un modelo 1D advección-dispersión (utilizando el método numérico de Crank-Nicholson) para evaluar la uniformidad de distribución del soluto en el suelo. Estimaron el coeficiente de dispersión longitudinal a partir del producto de la velocidad del flujo en cada punto y la dispersividad longitudinal, D_l (m), con un ajuste previo de este parámetro resultante en $D_l = 1$ m, que produjo un intervalo de variación del coeficiente de dispersión longitudinal entre $4 \cdot 10^{-8}$ y $0.00745 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Estos autores simularon varios casos de los que poseían resultados experimentales (Abbasi *et al.*, 2003a): el primero con flujo de salida libre al final del surco y la aplicación de fertilizante durante toda la duración del riego; y el segundo con surcos bloqueados al final, por lo que no existían pérdidas por escorrentía, con aplicaciones de soluto durante todo el riego, sólo durante la primera mitad del riego y sólo durante la segunda mitad del riego. Los mejores resultados de uniformidad de distribución, tanto experimentales como calculados, los obtuvieron cuando los surcos estaban bloqueados en cola y la aplicación de fertilizante se realizaba durante todo el riego o durante la segunda mitad del riego.

El trabajo presentado por Sabillón y Merkley (2004) desarrolla un modelo de transporte advectivo, con el que los autores evaluaban la eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución. Los resultados del modelo los compararon con dos conjuntos de datos de campo y con resultados simulados con el programa SIRMOD II (Walker, 2002). Los mejores resultados los obtuvieron con aplicaciones del fertilizante en un intervalo corto de tiempo y con alta concentración. Concluyeron que el momento óptimo en que se ha de realizar la aplicación depende de las condiciones de infiltración, así, si la infiltración se produce lentamente se debe aplicar el fertilizante cuando el frente de avance del agua ha recorrido el 85-90% de la longitud total del surco, pero si la infiltración inicial es alta se debe tener en cuenta la pendiente del terreno, de modo que para pendientes muy pequeñas el tiempo de inicio de la aplicación debe ser alto con respecto al tiempo de avance, este tiempo va decreciendo con el aumento de la pendiente, por lo que resulta difícil establecer una línea general de actuación.

Zerihun *et al.* (2005a; 2005b) fueron más allá y desarrollaron y comprobaron un modelo que acopla el movimiento de solutos en superficie y en el suelo. El transporte superficial de soluto lo resolvieron separando la advección y la difusión, utilizando el método de las características para resolver la advección y el esquema implícito de Preismann en diferencias finitas para resolver la difusión. El transporte subsuperficial lo simulaban con el modelo HYDRUS-1D (Simunek *et al.*, 1998), y mediante un programa auxiliar acoplaron ambos transportes, utilizando los resultados del transporte superficial como condiciones de contorno en el subsuperficial. El cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal lo plantearon de forma similar a Abbasi *et al.* (2003b), asumiendo que depende del sumando de la difusión molecular y el producto de la dispersividad y la velocidad media del flujo. El valor de este producto lo estimaron a su vez para el caso de flujo superficial a partir de la expresión de Elder (1959, en Zerihun *et al.*, 2005b), en la que el coeficiente de dispersión es función de la velocidad de corte, el calado y de la constante de Elder, a la que le asignan el valor de 4 (una vez realizados varios tanteos). El modelo lo evaluaron con ensayos realizados en tableros con pendiente cero y 0.1% y en canteros con salida libre de escorrentía y pendiente media del 0.1%, aplicando el soluto durante todo el tiempo de riego.

En el trabajo de Zapata *et al.* (2005), se presenta un análisis del fertirriego por surcos a partir de cuatro ensayos, en los que la única variante fue el caudal de entrada. Calibraron y validaron un modelo en el que resolvían separadamente la advección y la dispersión. Para la advección utilizaron el método upwind con corrección TVD (Total Variation Diminishing). El término difusivo lo resolvieron mediante un método conservativo, centrado e implícito. El coeficiente de dispersión longitudinal lo estimaron utilizando la expresión de Rutherford (1994) que relaciona este coeficiente con la anchura y la velocidad de corte. Estos autores obtuvieron resultados satisfactorios con el modelo, una vez que compararon los resultados observados con los calculados, vieron que el modelo reproducía mejor el transporte en los casos en los que el caudal de entrada era mayor.

Strelkoff *et al.* (2006) presentaron un modelo semi-lagrangiano simplificado, que desprecia los efectos de dispersión y no permite el comportamiento reactivo de la sustancia transportada. Los resultados obtenidos los compararon con los resultados obtenidos a

partir de un modelo de advección-dispersión propuesto por Perea-Estrada (2005), en el que se estimaba el valor del coeficiente de dispersión longitudinal a partir de la ecuación de Fischer (1968). El modelo es útil para una primera estimación grosso modo de la distribución longitudinal de fertilizante en el surco.

Merece la pena destacar que en el modelado del fertirriego por surcos es importante tener en cuenta el efecto del coeficiente de dispersión longitudinal, como demostraron García-Navarro *et al.* (2000) en su trabajo, ya que influye notablemente en la adecuada representación del transporte cuando el flujo tiene carácter transitorio, debido a su directa dependencia de la velocidad del mismo. No todos los trabajos presentados hasta ahora tienen en cuenta el efecto de la dispersión en el transporte, aunque algunos de ellos lo evalúan a partir de expresiones empíricas obtenidas en el estudio del transporte en ríos, cuyas características de flujo se alejan de las que se puedan presentar en el riego por surcos. De ahí que para una evaluación correcta del fertirriego sea necesario acotar el intervalo de variación de este coeficiente en función del tipo de flujo; este es uno de los aspectos incluidos en los objetivos de este trabajo: establecer una relación entre el coeficiente de dispersión longitudinal y las condiciones del flujo de agua en el surco, así como su influencia en el modelado del transporte en cada caso. Para ello se han realizado una serie de ensayos de campo en los que se realizaron tres aplicaciones de soluto por ensayo, y así poder evaluar el transporte del mismo en distintas condiciones del flujo, y en los que se ha tenido en cuenta el rendimiento de aplicación y la uniformidad de distribución a la hora de evaluar la calidad de la fertirrigación. La mayoría de los trabajos hasta ahora presentados se basan en el análisis de la uniformidad de distribución de soluto en el suelo como índice de calidad de la fertirrigación.

Otro aspecto importante que puede influir en el resultado final de la fertirrigación y que no se ha tenido en cuenta hasta ahora es el efecto del flujo superficial de agua sobre los solutos que se encuentren en el suelo debido a una fertilización previa, es decir, la extracción de los solutos del suelo por el flujo de agua y su transporte en superficie. Este proceso puede influir en el resultado final tanto del Rendimiento de Aplicación como de la Uniformidad de Distribución del soluto en el suelo. El análisis de este proceso es otro de

1. Introducción y objetivos

los aspectos incluidos en los objetivos de este trabajo, relacionar este proceso con las condiciones del flujo de agua.

En el trabajo aquí presentado se ha programado un modelo 1-D para la simulación de la circulación de agua como del transporte de solutos.

Objetivos

En este estado del conocimiento y la experiencia previa, el objetivo general de este trabajo ha sido profundizar en los aspectos que condicionan el transporte superficial de sustancias en el agua de riego por surcos. En concreto, se han desarrollado los siguientes objetivos específicos:

A. Transporte superficial en el surco de sustancias aplicadas en el agua de riego

- Caracterización 1-D del transporte superficial de sustancias aplicadas en el agua de riego, en función del diseño del fertirriego (relación entre el coeficiente de dispersión longitudinal y las condiciones del flujo de agua con respecto a la aplicación del fertilizante).
- Relación entre el diseño del fertirriego y su eficiencia global, teniendo en cuenta el Rendimiento de Aplicación y la Uniformidad de Distribución de soluto en el suelo (diagramas de operación del fertirriego por surcos).

B. Transferencia de sustancias desde la superficie del suelo al flujo superficial de agua

- Relación entre el proceso de transferencia y las condiciones del flujo superficial de agua.
- Caracterización 1-D de las condiciones transitorias en el modelo de transporte superficial.

Para abordar dichos objetivos, se programó un modelo 1D de flujo de agua y solutos en el surco de riego, basado en los trabajos de García-Navarro *et al.* (2000), García-Navarro *et al.* (2004) y Playán *et al.* (2004), aunque supone una idealización debido a los supuestos de partida admitidos, que se describen en el capítulo 2, sus resultados son adecuados y han sido validados en los diferentes trabajos que hasta ahora se han comentado, además de aportar sencillez en la resolución de las ecuaciones que describen estos procesos y proporcionar resultados de utilidad práctica.

El modelo se calibró para los distintos casos estudiados utilizando la información recogida en ensayos de campo y laboratorio diseñados para tales fines, y se describe en el

1. Introducción y objetivos

capítulo 2 de este trabajo. Los capítulos 3 y 4 recogen los aspectos estudiados en el punto A; en el capítulo 3 se presenta el diseño experimental, así como los resultados obtenidos en campo. Se calibra el modelo del flujo de agua y se analizan los datos experimentales. El capítulo 4 se dedica a la calibración del modelo de transporte de solutos; se deduce una expresión paramétrica que permite estimar el valor del coeficiente de dispersión longitudinal a partir de las condiciones del flujo de agua y del momento de aplicación del soluto y se valida. El capítulo termina con la realización de una serie de simulaciones que permiten deducir las curvas de operación de fertirriego.

El capítulo 5, se dedica a los aspectos recogidos en el punto B, donde se describe el proceso de transferencia de solutos desde el suelo al flujo superficial y los ensayos realizados en laboratorio. Se añaden los resultados tanto experimentales como los obtenidos con el modelo. Por último, se han incluido unas conclusiones finales en el capítulo 6, junto con un apartado de referencias global del trabajo. Información más detallada de los ensayos de campo y laboratorio realizados aparecen en los anejos I, II y III.

2. Modelo 1-D de flujo de agua y solutos en un surco de riego

2.1. Flujo de agua

2.1.1. Operación del riego por surcos

En el riego por superficie, en particular en el riego por surcos, existen diversos eventos o fases que ayudan a comprender y a analizar el movimiento del agua a lo largo de una superficie. Estas fases se diferencian y clasifican en función de sus tiempos característicos:

- Tiempo de inicio (t_i) es el instante en el que el agua entra en la cabecera del surco.
- Tiempo de avance (t_a) en un punto x es el instante transcurrido desde el tiempo de inicio hasta que el agua llega a dicho punto desde cabecera. La curva de avance muestra la evolución del frente del flujo a lo largo del surco.
- Tiempo de corte (t_c) es el instante en el que el agua deja de entrar en el surco, o tiempo en el que se corta la entrada de agua en cabecera.
- Tiempo de vaciado (t_v) es el instante en el que el agua desaparece en la cabecera del surco.

2. Modelo 1-D de flujo de agua y solutos en un surco de riego

- Tiempo de receso (t_r) en un punto x es el instante en el que desaparece el agua en la superficie del surco en dicho punto. La curva de receso muestra la evolución del agotamiento de agua en superficie a lo largo del surco.
- Tiempo de oportunidad o tiempo de contacto (t_{op}) en un punto x es el intervalo de tiempo durante el cual existe agua sobre la superficie en dicho punto; es la diferencia entre el tiempo de receso y el tiempo de avance, por lo que no será constante a lo largo del surco.

Así, en un surco se suceden las siguientes fases del riego (Walker *et al.*, 1987, § 5):

- Fase de avance: fase comprendida entre el tiempo de inicio y el tiempo de avance hasta el final del surco, es decir, es el intervalo que transcurre desde que comienza el riego hasta que todos los puntos del surco están cubiertos de agua.
- Fase de almacenamiento: fase comprendida entre el tiempo de avance hasta el final del surco y el tiempo de corte. Es el intervalo que transcurre desde que todo el surco está cubierto de agua hasta que se corta el caudal en cabecera, y durante el mismo la altura de agua en cada punto del surco aumenta hasta alcanzar su valor máximo y mantenerse en este.
- Fase de agotamiento: fase comprendida entre el tiempo de corte y el de vaciado. Es el intervalo que transcurre desde que se corta el caudal en cabecera hasta que en dicha cabecera desaparece el agua de la superficie del suelo.
- Fase de receso: fase comprendida entre el tiempo de vaciado y el tiempo de receso al final del surco. Es el intervalo que transcurre desde que deja de haber agua en cabecera hasta que desaparece del resto de los puntos del surco.

En la figura 2.1 se han representado las fases del riego y los tiempos característicos que las definen, así como la lámina de agua requerida por el cultivo (H_r) y la infiltrada (H).

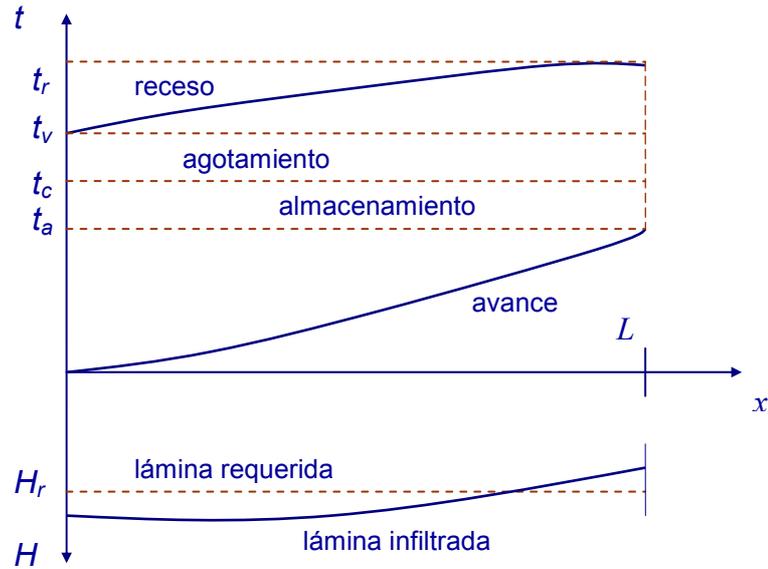


Figura 2.1. Tiempos característicos y fases principales del riego por surcos.

2.1.2. Clasificación del flujo de agua

El flujo de agua que discurre en un canal abierto se puede clasificar en función de la variación de la velocidad o el calado en el espacio y el tiempo (Chow, 1959 § 1.2):

- Flujo uniforme y no uniforme (o variado): el flujo se considera uniforme cuando el calado se mantiene constante en el espacio (no varían de un punto a otro en la dirección del avance del flujo). Por el contrario, no es uniforme cuando el calado no se mantiene constante en el espacio.
- Flujo permanente (o estacionario) y no permanente (o variable o transitorio): el flujo es permanente cuando el calado se mantiene constante en el tiempo, aunque sí puede variar en el espacio. Por el contrario, si el calado no se mantiene constante en el tiempo, el flujo no es permanente, sino transitorio.

El movimiento del agua sobre un campo de riego se puede caracterizar como variado y variable, aunque cuando la velocidad de infiltración se estabiliza y se hace constante en el tiempo, el flujo pasaría a ser variado y permanente.

2.1.3. Ecuaciones que describen el flujo de agua

El movimiento del agua que discurre sobre la superficie del suelo en un surco se caracteriza por su transitoriedad tendiendo hacia gradualmente variado. El caudal en cualquier punto del surco varía con el tiempo hasta que la velocidad de infiltración y el calado se estabilizan y se hacen constantes en el tiempo, en este momento el flujo pasa a tener carácter permanente.

El movimiento del agua se puede describir mediante las ecuaciones de conservación de masa, de cantidad de movimiento y de energía. Cuando el flujo es discontinuo (cuando existen entradas o salidas de flujo) se pueden usar las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento o las ecuaciones de conservación de masa y de energía, mientras que cuando el flujo es continuo se emplean las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento (Cunge *et al.*, 1980, § 2). A este último caso corresponden las ecuaciones de Saint Venant (Cunge *et al.*, 1980, § 2), que parten de las ecuaciones de Navier-Stokes bajo las hipótesis de fluido incompresible, newtoniano y con viscosidad constante, homogéneo e isótropo. Las ecuaciones tridimensionales se integran en la dirección vertical para obtener la aproximación bidimensional. Las ecuaciones en una dimensión se obtienen integrando de nuevo las ecuaciones en la dirección transversal a la principal y admitiendo las siguientes hipótesis:

1. El flujo se considera unidimensional, así se caracteriza el campo de velocidades como $U(x,t)$, es decir, para cada sección transversal la superficie libre del agua en la dirección transversal se considera horizontal.
2. La curvatura de las líneas de corriente es pequeña, despreciando así la componente vertical de la aceleración y considerando hidrostática la distribución vertical de presiones.
3. Los efectos de fricción y turbulencia debidos a la resistencia de los contornos se pueden tener en cuenta aplicando las mismas leyes que en el caso de flujo uniforme.

4. La pendiente media del lecho es pequeña, por lo que el coseno del ángulo que su eje longitudinal forma con la horizontal (θ) se puede sustituir por la unidad.

$$\cos \theta \approx 1 \rightarrow \text{sen} \theta \approx \text{tg} \theta \approx \theta \quad (2.1)$$

Con lo anterior, incluyendo la infiltración como un término sumidero en la ecuación de conservación de la masa al admitir la hipótesis 1D, y utilizando como variables de estado caudal y área de la sección transversal (Q , A , y con esta última, el calado h), en lugar de velocidad y calado (U , h), estas ecuaciones se escriben de la forma expresada en (2.2) y (2.3),

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + \frac{1}{2} g A h \right) = g A (S_0 - S_f) \quad (2.3)$$

en las que en cada punto x e instante t , A es el área de la sección transversal a la dirección del flujo o área mojada, Q es el caudal circulante, Z es el volumen de agua infiltrada por unidad de longitud de surco, g es la aceleración de la gravedad. S_0 es la pendiente del lecho en la dirección longitudinal del surco, tomada con valor positivo en el sentido de avance del agua,

$$S_0 = -\frac{\partial y}{\partial x} \quad (2.4)$$

y la pendiente de fricción, S_f , se puede describir en función del coeficiente de aspereza de Manning, n ,

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{A^2 R_h^{4/3}} \quad (2.5)$$

donde R_h es el radio hidráulico,

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (2.6)$$

con P , el perímetro mojado de la sección transversal.

2.1.3.1. Modelado del proceso de infiltración

El cociente de infiltración $\partial Z / \partial t$ puede ser descrito mediante alguna de las funciones de infiltración que reproducen satisfactoriamente el movimiento del agua. Una de las primeras ecuaciones de infiltración fue desarrollada por Kostiakov en 1932 (Sepaskhah *et al.*, 2002):

$$Z = kt_{op}^a \quad (2.7)$$

en la que Z es el volumen de agua infiltrado por unidad de longitud de surco en un punto desde que llega el frente de avance, t_{op} es el tiempo de oportunidad y k y a (adimensional y con valores menores que 1) son parámetros empíricos obtenidos a partir de las medidas de infiltración realizadas en un suelo determinado. Al derivar esta ecuación con respecto al tiempo se obtiene la velocidad de infiltración. Se observa que, a medida que aumenta el tiempo de oportunidad, la velocidad de infiltración tiende a cero. En realidad, a medida que el tiempo de oportunidad aumenta, la velocidad de infiltración tiende a estabilizarse. Para tener esto en cuenta, se añade a la ecuación 2.7 un término constante, obteniéndose así la ecuación de Lewis-Kostiakov (2.8), utilizada en numerosos trabajos (Walker, 1989; Playán y Faci, 1997a, b; Alazba, 1999; Brufau *et al.*, 2002):

$$Z = k \cdot t_{op}^a + f_0 \cdot t_{op} \quad (2.8)$$

en la que f_0 es la velocidad de infiltración para condiciones permanentes, aunque no se alcance en todos los puntos del surco a la vez. Utilizando la ecuación (2.8), el término $\partial Z / \partial t$ queda expresado de la forma,

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = akt_{op}^{a-1} + f_0 \quad (2.9)$$

Clemmens (1981) propuso una modificación de la ecuación de Lewis-Kostiakov, la ecuación de infiltración ramificada, muy conveniente cuando los tiempos de oportunidad alcanzan valores altos, como suele ocurrir en el caso de riego por surcos. Oyonarte y Mateos (2002) y Mateos y Oyonarte (2005) obtuvieron resultados satisfactorios con este modelo de infiltración. En este modelo se estima el tiempo de oportunidad a partir del cual la infiltración se estabiliza, t_f :

$$t_f = \left(\frac{f_0}{ak} \right)^{1/(a-1)} \quad (2.10)$$

La expresión completa en función de t_f

$$\begin{aligned} Z &= kt_f^a \quad \text{si } t_{op} \leq t_f \\ Z &= kt_f^a + f_0(t_{op} - t_f) \quad \text{si } t_{op} > t_f \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.1.3.2. Estimación de los parámetros de la función de infiltración

El carácter empírico de la función de infiltración requiere la utilización de datos experimentales para la estimación de sus parámetros. Elliot y Walker (1982) propusieron el “método de los dos puntos” para evaluar los parámetros de la ec. 2.11, que se basa en la ecuación del balance de masa de agua y requiere los valores medidos de los caudales de entrada y salida, así como el tiempo de avance del frente de agua en dos puntos de referencia del surco, por ejemplo el punto medio del surco y el final. El método es aplicable en surcos con cierta pendiente, y produce una ecuación de infiltración media para todo el surco.

El procedimiento comienza con la definición de la velocidad de infiltración estabilizada, f_0 , a partir de los valores medidos del caudal de entrada y de salida cuando el movimiento del agua se hace permanente,

$$f_0 = \frac{Q_0 - Q_s}{l} \quad (2.12)$$

Q_0 y Q_s son el caudal de entrada y el de salida, respectivamente, y l es la longitud del surco. Aplicando las ecuaciones de balance de agua en los tiempos de avance hasta los puntos situados en la mitad ($l/2$) y el final de surco (l), y adoptando la ecuación de infiltración de Lewis-Kostiakov (ec. 2.8), se obtiene:

$$Q_0 t_{l/2} = \frac{\sigma_y A_0 l}{2} + \sigma_z \frac{kt_{l/2}^a l}{2} + \frac{f_0 t_{l/2} l}{2(1+r)} \quad (2.13)$$

$$Q_0 t_l = \sigma_y A_0 l + \sigma_z kt_l^a l + \frac{f_0 t_l l}{1+r} \quad (2.14)$$

en las que $t_{l/2}$ es el tiempo de avance en el punto central del surco, t_l el tiempo de avance en el final del surco, A_0 la sección transversal en cabecera, σ_y un factor de forma del almacenamiento superficial que toma valores constantes entre 0.7 y 0.8, σ_z un factor de forma de almacenamiento subsuperficial. El parámetro r se puede estimar a partir de la función potencial que describe la trayectoria de avance (Walker *et al.*, 1987) que relaciona los tiempos de avance del flujo con la distancia en el surco.

El valor de A_0 se puede estimar a partir de la expresión,

$$A_0 = C_1 \left(\frac{Q_0 n}{60 \sqrt{S_0}} \right)^{C_2} \quad (2.15)$$

donde C_2 y C_1 son dos parámetros que se calculan como,

$$C_2 = \frac{3\sigma_2}{5\sigma_2 - 2\gamma_2} \quad (2.16)$$

$$C_1 = \sigma_1 \left(\frac{\gamma_1^{0.67}}{\sigma_1^{1.67}} \right)^{C_2} \quad (2.17)$$

σ_1 , σ_2 , γ_1 , γ_2 son parámetros empíricos que se estiman a partir de las relaciones potenciales entre el calado y el área mojada o el perímetro mojado:

$$h = \sigma_1 A^{\sigma_2} \quad (2.18)$$

$$P = \gamma_1 h^{\gamma_2} \quad (2.19)$$

Por otra parte, r se puede estimar a partir de la expresión:

$$r = \frac{\log(l/l_{1/2})}{\log(t_1/t_{1/2})} \quad (2.20)$$

en donde $l_{1/2}$ es la longitud hasta el punto medio del surco.

Por último, σ_z se obtiene a partir de:

$$\sigma_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+a)(1+r')} \quad (2.21)$$

donde el parámetro a se calcula a partir de la expresión,

$$a = \frac{\ln(V_1/V_{1/2})}{\ln(t_1/t_{1/2})} \quad (2.22)$$

y V_1 y $V_{1/2}$ representan el volumen de agua por unidad de longitud que alcanza el final y el punto medio del surco, respectivamente,

2. Modelo 1-D de flujo de agua y solutos en un surco de riego

$$V_l = \frac{Q_0 t_l}{l} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_{l/2}}{(1+r)} \quad (2.23)$$

$$V_{l/2} = \frac{2Q_0 t_{l/2}}{l} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_{l/2}}{(1+r)} \quad (2.24)$$

Una vez obtenido lo anterior, el parámetro k de la ecuación de infiltración se estima con la siguiente expresión,

$$k = \frac{V_l}{\sigma_z t_l^a} \quad (2.25)$$

Los coeficientes, f_0 y k calculados en este punto tienen dimensiones de $[L^3 L^{-1} T^{-1}]$ y $[L^3 L^{-1} T^{-a}]$ respectivamente. Si los coeficientes se dividen por la separación entre surcos, la ecuación de infiltración se expresa en unidades de longitud, que representa la lámina infiltrada y se designará H .

2.2. Flujo de solutos

Cuando una sustancia se introduce en el seno de un fluido es transportada de un punto a otro en el medio, y simultáneamente puede sufrir reacciones o interactuar con el medio, pero cuando la sustancia es conservativa, que es la asunción de este trabajo, se tienen en cuenta sólo los procesos físicos en el modelado del transporte. Por tanto, cuando se vierte una sustancia en el flujo de agua suceden dos cosas, primero es transportada desde el punto de vertido por la corriente mediante el proceso de advección, segundo, actúa sobre ella el proceso de difusión o dispersión lo que provoca su expansión (Rutherford, 1994, § 1.1). El uso del término advección en lugar de convección evita posibles confusiones debido al uso específico de este último en el campo de estudio del movimiento provocado por estratificación vertical inestable del fluido debido a gradientes verticales de temperatura (corrientes convectivas) (Rutherford, 1994, § 1.3).

2.2.1. Ecuación de transporte de solutos en el flujo de agua

La ecuación que describe el transporte de una sustancia en medio fluido es la ecuación de advección-difusión, que en su forma más general en las tres direcciones del espacio para una sustancia cualquiera se presenta como,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \underbrace{u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z}}_{\text{Advección}} - \underbrace{D_m \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right)}_{\text{Difusión molecular}} = \underbrace{-Kc}_{\text{Degradación}} \quad (2.26)$$

donde x, y y z representan las distancias longitudinal, vertical y transversal, respectivamente; c y $\vec{q}(u, v, w)$ son las variables instantáneas concentración de sustancia y velocidad del fluido (u, v, w , componentes en x, y, z , respectivamente); D_m es el coeficiente de difusión molecular; K es la constante cinética de primer orden de reacción química de la sustancia.

2. Modelo 1-D de flujo de agua y solutos en un surco de riego

Los sumandos advectivos a la izquierda de la igualdad describen el proceso de transporte de una sustancia en el seno de un fluido sin que exista cambio alguno en las distancias relativas entre las partículas de soluto, es decir, la nube de partículas se traslada sin deformarse con el flujo de agua.

El sumando difusivo a la izquierda de la igualdad describe el proceso de difusión molecular e implica variación de la distribución espacial de partículas de soluto en respuesta al gradiente de su concentración, debido al movimiento Browniano inducido a su vez por los movimientos aleatorios de las moléculas de soluto. A este nivel, la difusión de una sustancia en medio fluido se describe adecuadamente mediante la primera ley de Fick (1855) que, para una dirección del espacio cualquiera, r , se escribe como,

$$J_r = -D_m \frac{\partial c}{\partial r} \quad (2.27)$$

donde J_r representa el flujo o la densidad de flujo de sustancia en la dirección r , y $\frac{\partial c}{\partial r}$ es el gradiente de concentración en dicha dirección de dicho flujo. D_m depende de la sustancia y el fluido en que se encuentre, y es asimismo función de la temperatura.

Por último, el término a la derecha de la igualdad representa la pérdida de sustancia en el fluido por reacciones químicas, suponiendo que estas siguen un proceso químico con cinética de primer orden. K depende de la reacción química en cuestión y de la temperatura (por tanto, específica para la sustancia y el fluido). Si la sustancia es conservativa, entonces $K=0$ y se anula este término.

El régimen del flujo de agua incide, por tanto, en el proceso de transporte y su influencia queda recogida en los términos advectivos. Cuando el régimen es laminar, las partículas de agua se mueven ordenadamente y el campo de velocidades es unidireccional, por lo que el flujo no induce mezcla de la sustancia, sino que ésta se produce fundamentalmente por difusión molecular y, por tanto, depende de las propiedades de la sustancia y del fluido. En cambio, cuando el régimen es turbulento, las trayectorias erráticas multidireccionales de las partículas fluidas inducen la mezcla de las sustancias inmersas en

el fluido, disminuyendo los gradientes espaciales de su concentración. Esta mezcla tiene los mismos efectos finales que una difusión fickiana (de hecho se modela matemáticamente como tal sustituyendo el coeficiente D_m por un coeficiente de difusión turbulenta en la dirección estudiada), por lo que recibe el nombre de *difusión turbulenta*, pero se lleva a cabo con una intensidad mucho mayor que la mezcla debida a procesos de difusión molecular.

En régimen turbulento, la descomposición de la concentración y las componentes de velocidad en un sumando medio (en el tiempo) y un sumando de fluctuación aleatoria para describir la variabilidad temporal de las variables instantáneas. Esto permite promediar la ecuación (2.26) durante un periodo T , una vez sustituidas las variables instantáneas por la suma de ambos términos en cada sumando y desarrollados éstos. De esta forma el proceso, para una sustancia conservativa ($K=0$) y despreciando la contribución de la difusión molecular frente a la correspondiente a la difusión turbulenta, se puede describir como,

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + u_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + u_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(e_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(e_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(e_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (2.28)$$

donde \bar{c} es la concentración media de soluto (en un periodo T de integración); u_x, u_y, u_z las velocidades medias en las tres direcciones del espacio; e_x, e_y, e_z los coeficientes de difusión turbulenta en las tres direcciones del espacio. Los términos a la derecha de la igualdad provienen de la sustitución de los términos advectivos instantáneos por la suma de sus componentes media y de fluctuación. En concreto, de los productos cruzados resultantes de las derivadas parciales donde intervienen sólo componentes de fluctuación, productos que no se anulan al promediar la ecuación (2.26) en T , y que representan matemáticamente la mezcla inducida por dichas fluctuaciones. Estos productos se describen como una difusión fickiana sustituyendo D_m por un coeficiente de difusión turbulenta en la dirección correspondiente, cuyo valor depende por tanto fundamentalmente de las condiciones del flujo de agua.

En sistemas donde una dirección del movimiento fluido es predominante, como el caso objeto de este trabajo, se supone mezcla completa en las otras dos direcciones en un intervalo de tiempo relativamente corto. Por tanto, se puede admitir que existe mezcla

completa en la sección transversal a partir de cierta distancia del punto de vertido de sustancia (lo que se denomina longitud de mezcla). A partir de la misma, no existen gradientes transversal ni vertical de concentración, por lo que ambos términos se anulan en la ecuación. En otros casos, dichos términos no se anulan aunque su contribución puede ser poco significativa en comparación con el resto de términos.

Teniendo en cuenta todo lo descrito anteriormente, cuando se trabaja con sistemas donde la dirección longitudinal del flujo de agua (x) es predominante, se puede utilizar un modelo 1D para el transporte de sustancias en el mismo promediando la ecuación de advección-difusión, o de advección-difusión turbulenta, en la sección transversal a dicha dirección. Para el caso de sustancia conservativa, esto lleva a una expresión como la ecuación (2.29), donde C representa la concentración promediada en la sección transversal, en la que se ha sustituido en el término advectivo la velocidad media en la sección transversal, U , por el cociente Q/A ,

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.29)$$

En el término difusivo aparece un coeficiente, E , con dimensiones de coeficiente de difusión fickiana (las mismas que D_m y e_x , e_y , e_z), que recoge tanto los efectos de los procesos difusivos existentes como la difusión ficticia que puede producirse al promediar la concentración en la sección transversal en zonas sin mezcla completa. Por eso, la versión 1D de la ecuación de transporte de sustancias en medio fluido se denomina de forma general *ecuación de advección-dispersión*, reservando el término dispersión para incluir tanto efectos físicos como efectos numéricos, y a E se le da el nombre de *coeficiente de dispersión longitudinal*. El valor de E depende de las condiciones del flujo de agua, de la geometría del sistema y, en casos lejanos a la turbulencia completa, de la sustancia transportada.

En el caso del aporte de sustancias en el agua de riego en un surco, es necesario añadir un término sumidero, $C \frac{\partial Z}{\partial t}$, que representa la pérdida de sustancia asociada a la infiltración, quedando la ecuación (2.30a) de la forma:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} + C \frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.30a)$$

Si se desarrollan las derivadas parciales de los productos (AC) y (QC) , teniendo en cuenta la ecuación (2.2) de balance de agua, la ecuación (2.30a) queda,

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + Q \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.30b)$$

Para una mayor comprensión de los procesos aquí descritos de forma resumida y su modelado matemático se pueden consultar numerosos textos de referencia (*e.g.* Fischer *et al.*, 1979; James, 1993; Rutherford, 1994)

2.2.2. Clasificación del régimen en función de los procesos de transporte

La ecuación (2.30b) se puede expresar de forma adimensional, a partir de los valores C_0 , U_0 , A_0 correspondientes a un punto con condiciones de referencia constantes, bien en el espacio, bien en el tiempo, o en ambos, y la longitud l del dominio de integración,

$$A^* \frac{\partial C^*}{\partial t^*} + Q^* \frac{\partial C^*}{\partial x^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{1}{Pe} \cdot A^* \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \right) \quad (2.31)$$

$$Pe = \frac{U_0 l}{E}$$

También, si la ecuación se integra en una zona de longitud l' dentro del dominio l en donde se pueda despreciar $\frac{\partial U}{\partial x}$ y $\frac{\partial A}{\partial x}$, a partir de los valores de C_0 , U , A y l'

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + \frac{\partial C^*}{\partial x^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{1}{Pe} \cdot \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \right)$$

$$Pe = \frac{Ul'}{E}$$
(2.32)

Pe es un término adimensional que recibe el nombre de número de Peclet (James, 1993, § 5.7.1), cuyo valor determina la importancia relativa de los términos advectivo y dispersivo en la ecuación (2.29) y, en definitiva, de la influencia relativa del transporte advectivo y dispersivo en la evolución espaciotemporal de la concentración de sustancia en el sistema. Cuando $Pe < 0.1$ dominan los efectos difusivos, mientras que si $Pe > 10$ domina la advección; en el intervalo acotado por ambos valores ambos tipos de efectos deben ser considerados si se quiere caracterizar adecuadamente el proceso de transporte.

Por lo tanto, se puede clasificar el flujo en función de las condiciones de transporte analizando el valor de Pe en cada tramo y su evolución temporal, en su caso. Además de las características del flujo de agua, uniformidad y estacionariedad o no del campo de velocidades, el valor de E es determinante en el cálculo de Pe . Este coeficiente, en general, depende del valor de velocidad media en la sección en estudio, es función de x y de t . En la práctica, se adopta un valor constante en ambos dominios, espacial y temporal, para obtener soluciones tanto analíticas como numéricas de la ecuación (2.30), o (2.32), valor efectivo que debe reflejar el comportamiento real del sistema lo más adecuadamente posible pero de forma general.

Así, en la fertirrigación por surcos, existe un periodo inicial con carácter transitorio y velocidades más bajas; un periodo medio con carácter permanente en todo el surco aunque variado en cuanto a la velocidad, y con velocidades más elevadas, si transcurre el tiempo suficiente para que en toda la longitud del surco la velocidad de infiltración se estabilice; y un periodo final de nuevo transitorio desde el tiempo de corte, en el que las velocidades van disminuyendo de valor hasta anularse. Esto hace que se sucedan distintas condiciones potenciales de transporte a lo largo del riego, que determinan que el momento de inicio de la aplicación de fertilizante (primera variable de diseño del fertirriego) pueda encontrarse con condiciones predominantemente advectivas o dispersivas, o mixtas, y por

tanto que la evolución de la concentración de fertilizante en el flujo superficial presente características muy diferentes según el caso. Paralelo razonamiento puede seguirse para la duración de la aplicación de fertilizante, segunda variable de operación de fertirriego.

De igual forma, el número de riego en el que se realice la fertirrigación (tercera variable de diseño posible) determina qué tipo de condiciones serán predominantes, en su caso. En el primer riego, el suelo se encuentra menos consolidado, la velocidad de infiltración es más elevada y, por tanto, la velocidad del agua en el flujo superficial es más pequeña y el inicio de condiciones permanentes en el surco se retrasa; esto favorece un avance más lento del agua en el surco, con mayor relevancia de los efectos difusivos en el proceso de transporte. En el segundo riego y sucesivos, los efectos son contrarios: la superficie del suelo se encuentra más sellada, la velocidad de infiltración es más pequeña, la velocidad del agua en el flujo superficial más elevada, y se adelanta el inicio de condiciones permanentes en el surco; con esto, la influencia de los efectos difusivos se ve aminorada.

Con todo ello, es fácil deducir que, en el modelado 1-D de este proceso, es muy importante adoptar un valor efectivo adecuado para el coeficiente de dispersión longitudinal, E , que reproduzca el carácter medio de la evolución espaciotemporal de las condiciones de transporte en el sistema.

En trabajos anteriores, la elección del coeficiente de dispersión longitudinal se ha realizado de diferentes formas, así, García-Navarro *et al.* (2000) calibraron el modelo de transporte para el caso de lecho impermeable, obteniendo un valor de E constante que utilizaron en los casos de lecho permeable. Abbasi *et al.* (2003b) utilizaron un valor constante de la dispersividad que multiplicaban por el valor de la velocidad del flujo en cada punto, obteniendo un valor de E variable en cada punto pero que dependía de la dispersividad que la consideraban constante. Este mismo enfoque se puede observar en el trabajo de Zerihun *et al.* (2005a; 2005b). Otros autores como Zapata *et al.* (2005) optaron por utilizar la expresión de Rutherford (1994), en la que se relaciona E con la velocidad de corte del flujo. Esta expresión, junto con la propuesta por Fischer (1966) o Elder (1959) (en Fischer *et al.*, 1979) que también relacionan E con la velocidad de corte, y dan una

2. Modelo 1-D de flujo de agua y solutos en un surco de riego

primera aproximación del valor E , sobre todo en los casos en los que el flujo es permanente, ya que estas expresiones provienen de la caracterización del transporte en ríos.

En este trabajo, la fase transitoria del flujo de agua tiene gran importancia debido a su duración en el tiempo, por lo que no se ha recurrido a ninguna expresión de las mencionadas, y se ha caracterizado el valor de E para cada caso de forma individual, pudiendo así relacionarlo con el tipo de flujo y evaluar su influencia en el resultado final de la fertirrigación.

2.3. Modelado numérico

Aunque las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo de agua y solutos en corrientes libres son conocidas desde hace décadas, existen numerosos casos donde su integración analítica no se ha obtenido, fundamentalmente en condiciones transitorias. En paralelo, la elevada y creciente capacidad de cálculo de los ordenadores existente hoy día, ha hecho posible obtener soluciones numéricas aproximadas para una variadísima gama de circunstancias y condiciones. Tanto es así, que la *Dinámica de Fluidos Computacional* (e.g. Ferziger y Perić, 2002, § 2.1) es en sí un área dentro del estudio de la Dinámica de Fluidos, con revistas científicas especializadas en la misma.

La elección de un esquema numérico adecuado es fundamental para poder resolver satisfactoriamente el problema planteado, ya que hay abundantes métodos con características diferentes. La idoneidad de los distintos métodos para resolver problemas concretos está demostrada en numerosos trabajos, y se continúan mejorando los esquemas existentes, nuevos esquemas, criterios, etc. Este trabajo no tiene como objetivos específicos abundar en los aspectos numéricos del modelado de agua y solutos en surcos de riego. Para resolver el cálculo de las variables de estado del flujo conjunto de agua y solutos en surco de riego, básicos para lograr los objetivos planteados, se ha recogido la experiencia de otros autores. En concreto, se ha adoptado el método predictor-corrector de MacCormack por su sencillez y adecuada resolución de las ecuaciones de St. Venant (Fennema y Chaudhry, 1986; García-Navarro y Sabirón, 1992; Playán y Faci, 1997b; García-Navarro *et al.*, 2000; Burguete, 2003; García-Navarro *et al.*, 2004; Maikaka, 2004) y de advección-dispersión, siguiendo las pautas establecidas por García-Navarro *et al.* (2000).

Las ecuaciones de Saint. Venant se resuelven de forma análoga al esquema seguido por Maikaka (2004), que se caracteriza por separar los términos de estas ecuaciones según sus propiedades, diferenciando los términos dinámicos, los de infiltración y los de fricción. La ecuación de advección-dispersión se resuelve a partir del esquema seguido por García-Navarro *et al.* (2000), que resuelve de forma separada los términos advectivo y dispersivo de la ecuación.

2.3.1. Formas de describir el movimiento y propiedades principales de los esquemas numéricos

En general, existen dos enfoques para analizar problemas en Mecánica de Fluidos (y en otras ramas de la Física). El método Euleriano se basa en el concepto de “campo” para representar las variables de estado, es decir, el movimiento del fluido (y de los componentes inmersos en él) queda descrito por la representación de sus variables (presión, densidad, velocidad, etc.) en función del espacio y el tiempo. El método Lagrangiano consiste en seguir el movimiento de partículas concretas del fluido y cómo cambian sus propiedades a lo largo del tiempo mientras se desplazan.

En Mecánica de Fluidos es más usual la primera formulación, la Euleriana, tanto en trabajos experimentales como analíticos, a excepción de casos concretos donde identificar las trayectorias de partículas específicas es de interés.

2.3.1.1. Dominio de cálculo, aproximación de las derivadas y propiedades de los esquemas numéricos

Se ha adoptado un esquema de diferencias finitas. El espacio donde se mueve el flujo, o dominio, se subdivide o discretiza en un conjunto de celdas, cada una de las cuales constituye el volumen de control donde realizar el balance de masa y cantidad de movimiento para determinar las variables del flujo, según el método numérico utilizado (*e.g.* Brufau y García-Navarro, 2000; Burguete y García-Navarro, 2004a), a lo largo de la sucesión de intervalos de tiempo en los que se divide el periodo de cálculo. La discretización espacial 1-D del surco de riego da lugar, por tanto, a una malla con N nodos (x_i) que dividen la longitud del surco en $N-1$ elementos de longitud Δx (ver figura 2.2). En general se usa un valor de Δx constante, aunque a veces se recurre a intervalos variables cuando se requiere un mayor refinamiento de la representación espacial del dominio de cálculo en ciertas zonas. Para este estudio se ha adoptado un mallado uniforme, como se verá más adelante. En cuanto a la discretización temporal, también se puede elegir entre Δt variable o constante, que dividen el periodo en estudio en $M-1$ intervalos separados por M instantes (t^m). En el estudio de flujos transitorios, especialmente en el caso de transporte

de solutos en medio fluido, es habitual adoptar intervalos de tiempo variables cuyo valor se va ajustando en función de los criterios de estabilidad a satisfacer (Burguete, 2003; Maikaka, 2004; Murillo, 2006).

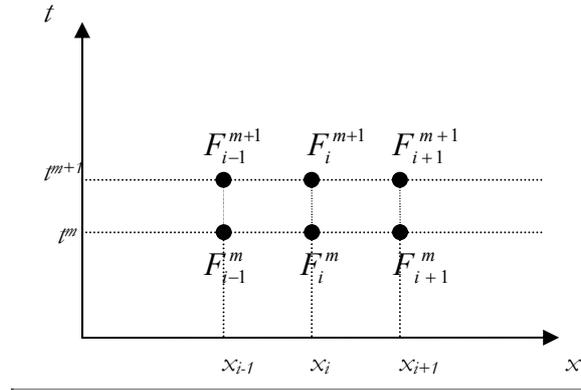


Figura 2.2. Malla discreta de puntos del dominio en el espacio y tiempo.

Para resolver las ecuaciones que relacionan las variables discretas, el esquema seguido se basa en el desarrollo en serie de Taylor de las mismas, que para primer orden y una variable cualquiera $F(x,t)$ se puede escribir como,

$$F(x_i + \Delta x, t + \Delta t) = F(x, t) + \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial t} \Delta t + O(\Delta x^2, \Delta x \Delta t, \Delta t^2) \quad (2.33)$$

de donde pueden aproximarse las derivadas en diferencias finitas. Las diferencias pueden ser centradas o descentradas, y con diferente grado de aproximación. Se han usado diferencias descentradas para las derivadas parciales con respecto a x (2.34, 2.35), y análogamente para las derivadas parciales con respecto a t (2.36).

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F_{i+1}^m - F_i^m}{\Delta x} = \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_i^m \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F_i^m - F_{i-1}^m}{\Delta x} = \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_i^m \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} \approx \frac{F_i^{m+1} - F_i^m}{\Delta t} \quad (2.36)$$

donde F_i^m representa el valor de la función en el nodo x_i para el de tiempo actual m , F_i^{m+1} el valor de la función en el mismo nodo que el anterior pero en el instante de tiempo $t + \Delta t$. Los subíndices $i+1$ e $i-1$ sitúan a la función en los nodos posterior y anterior respectivamente de la función objetivo.

En cuanto a las propiedades matemáticas de los métodos numéricos, se hace un breve comentario. Para su profundización se puede consultar abundante bibliografía específica (e.g. Carnahan *et al.*, 1969, § 6.6; Hamming, 1973, § II.21; Hirsch, 2001, § 7.2), encontrando sus definiciones claras y esquemáticas en los trabajos de Maikaka (2004) y Burguete (2003).

- Consistencia: Es la primera propiedad que debe cumplir un esquema numérico, ya que debe producir una buena aproximación de las ecuaciones que está resolviendo. Un esquema es consistente cuando el error de truncación tiende a cero al refinar la malla.
- Error de truncación: Es una medida de cómo el esquema numérico se aproxima localmente a la ecuación diferencial.
- Estabilidad: Un esquema será estable si no amplifica ninguna componente de las condiciones iniciales.
- Convergencia: El modelo converge si la solución discreta del esquema tiende a la solución exacta cuando Δx y Δt tienden a cero.
- Conservación: El modelo es conservativo si la variación observada en el periodo de tiempo analizado en la variable conservada es igual a la diferencia entre los flujos entrante y saliente, por el área respectiva de paso, más la contribución del término fuente.

2.3.2. Clasificación de los términos de las ecuaciones de Saint Venant

Las ecuaciones de Saint Venant (ec. 2.2 y 2.3) en forma conservativa se pueden expresar mediante los vectores U , F , G :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = G \quad (2.37)$$

donde,

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

representa el vector de las variables conservadas, área mojada y caudal. El flujo, F , en el segundo término de la ecuación (2.37) es:

$$F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + \frac{1}{2}gAh \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

El término G es el término fuente o sumidero, debido a la pendiente, la fricción en la dirección del flujo y los efectos de la infiltración en el suelo, donde $\frac{\partial Z}{\partial t}$ se expresa como el producto (Pz), teniendo en cuenta que:

$$z = \frac{1}{P'} \frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} \quad \frac{\partial Z}{\partial t} \approx Pz \quad (2.40)$$

$$G = \begin{pmatrix} -Pz \\ gA(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

Debido a las diferentes propiedades de los términos involucrados en las ecuaciones, resulta conveniente separarlos para construir un modelo computacional eficiente y bien estructurado,

2. Modelo 1-D de flujo de agua y solutos en un surco de riego

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f_f + f_i + f_r \quad (2.42)$$

donde f_f agrupa todos los términos del modelo dinámico sin fricción ni infiltración,

$$f_f = \begin{pmatrix} 0 \\ gAS_0 \end{pmatrix} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + \frac{1}{2} gAh \right) \quad (2.43)$$

f_i contiene los términos de infiltración,

$$f_i = \begin{pmatrix} -Pz \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

y f_r los de fricción,

$$f_r = \begin{pmatrix} 0 \\ -gAS_f \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

Una vez que se han clasificado los flujos y términos fuente de las ecuaciones en estos tres términos, se resolverán de forma independiente y por orden, los valores de las variables obtenidos con el término dinámico se utilizarán para calcular la infiltración, y una vez que se actualicen las variables (teniendo en cuenta la infiltración) se procederá al cálculo de la fricción, en estos pasos se sigue el algoritmo:

$$\Delta U_i^f = \Delta t (f_f)_i^m \quad (2.46)$$

$$\Delta U_i^{\text{inf}} = \Delta t (f_{\text{inf}})_i^f \quad (2.47)$$

$$\Delta U_i^r = \Delta t (f_r)_i^{\text{inf}} \quad (2.48)$$

$$\Delta U_i^m = \Delta U_i^f + \Delta U_i^{\text{inf}} + \Delta U_i^r \quad (2.49)$$

con,

$$\Delta U_i^m = U_i^{m+1} - U_i^m \quad (2.50)$$

2.3.3. Resolución de los puntos interiores de la malla

2.3.3.1. Tratamiento de los términos dinámicos

El esquema numérico escogido para el tratamiento de los términos dinámicos en los puntos interiores de la malla es el de McCormack. Se trata de un esquema explícito, que resuelve las ecuaciones teniendo en cuenta el valor de las variables en el paso de tiempo anterior, esta simplificación justifica la gran aceptación y aplicación de los esquemas explícitos en *Dinámica de Fluidos Computacional*, aunque tienen la limitación de que el paso de tiempo está condicionado por la condición de estabilidad que se imponga (Burguete y García-Navarro, 2004a). Es un esquema de segundo orden en espacio y tiempo, y consta de dos pasos.

Su ventaja reside en el carácter no centrado alterno de la diferenciación espacial, que lo hace más eficiente que las técnicas clásicas en diferencias centradas (García-Navarro, y Brufau, 2001). Usa diferencias unilaterales (hacia adelante o hacia atrás) para aproximar las derivadas espaciales.

Partiendo del sistema de ecuaciones (2.37), conocida su solución para el tiempo m , se obtiene la solución temporal $m+1$ en dos pasos. El primero se llama *paso predictor*, y proporciona una primera aproximación de la solución. Los valores obtenidos se usan en el siguiente paso, denominado *corrector*, y la solución final se calcula como el promedio del resultado obtenido en ambos pasos.

- Paso predictor:

$$U_i^p = U_i^m + \Delta t (f_f)_{i+\frac{1}{2}}^m \quad (2.51)$$

- Paso corrector:

$$U_i^c = U_i^p + \Delta t (f_f)_{i-\frac{1}{2}}^p \quad (2.52)$$

La variación de U es el promedio del resultado obtenido en ambos pasos:

$$U_i^f = \frac{U_i^p + U_i^c}{2} \quad (2.53)$$

Este esquema de segundo orden en espacio y tiempo es, además, conservativo puesto que se puede definir el siguiente flujo numérico:

$$F_{i+\frac{1}{2}}^{mac} = \frac{F_{i+1}^m + F_i^p}{2} \quad (2.54)$$

La condición de estabilidad del esquema es:

$$CFL \leq 1 \quad (2.55)$$

siendo CFL el número de Courant-Friedrichs-Lewy (Hirsch, 2001, § 8.1):

$$CFL = \frac{(|u| + cel)\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (2.56)$$

donde $|u|$ y cel son el módulo de la velocidad y la celeridad de la onda respectivamente. Esta última se calcula como:

$$cel = \sqrt{g \frac{A}{b}} \quad (2.57)$$

2.3.3.2. Tratamiento de la infiltración

Una vez calculados los valores de las variables dinámicas, U_i^f , se procede al cálculo de la influencia de la infiltración, representada por la variables U_i^{inf} , y se resolverán ecuaciones sencillas del tipo, en las que el objetivo es calcular el área de agua infiltrada, A_{inf} , en cada nodo.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -Ql \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial A_{\text{inf}}}{\partial t} = Ql \quad (2.59)$$

Ql representa el área infiltrada por unidad de tiempo. Estas ecuaciones se resuelven con el siguiente esquema explícito,

$$(Ql)_i^f = \min\left(\frac{A_i^f}{\Delta t}, P_i^f z_i^f\right) \quad (2.60)$$

$$A_i^i = A_i^f - \Delta t(Ql)_i^f \quad (2.61)$$

Este esquema asegura la conservación de la masa e impide que se generen valores negativos del área superficial, esto es, evita que numéricamente se genere más agua infiltrada de la disponible en la superficie.

2.3.3.3. Tratamiento de la fricción

Una vez que se ha incorporado la infiltración al modelo, se procederá a calcular las variables correspondientes al término de fricción, ec. 2.41 y 2.45. Aislado el término de fricción y utilizando el modelo de Manning, se resolverá una ecuación escalar del tipo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA \frac{n^2 Q |Q| P^{4/3}}{A^{10/3}} \quad (2.62)$$

2.3.4. Condiciones de contorno

Para simular correctamente los problemas de propagación no sólo se deben resolver las ecuaciones en el interior del dominio, sino que deben imponerse en sus fronteras las condiciones de contorno adecuadas.

De acuerdo con el carácter hiperbólico de las ecuaciones que gobiernan el movimiento, en el caso de régimen subcrítico es necesaria una condición física de contorno y otra correspondiente al esquema numérico en ambas fronteras, mientras que, si el régimen es supercrítico, se requieren dos condiciones externas en la frontera aguas arriba, y el esquema proveerá las dos condiciones necesarias en la frontera aguas abajo (Burguete y García-Navarro, 2004b). Las condiciones de contorno físicas exigen el conocimiento, bien empírico o bien teórico, de lo que ocurre en las fronteras. Las más usadas en problemas de riego son: imponer la evolución temporal del caudal o el calado en la entrada, e imponer la evolución temporal del caudal o el calado en la salida.

Las condiciones de contorno numéricas extraen la información del dominio de cálculo. Un método sencillo es el basado exclusivamente en la ecuación diferencial de conservación de masa, propuesto por Jin y Fread (1997), el *método de la conservación de masa local*, y utiliza información sobre la conservación de la masa entre dos puntos contiguos a las fronteras. La ecuación (2.2), expresada de la forma,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -Pz \quad (2.63)$$

se aproxima, discretizando respecto al tiempo en el nodo de entrada, como

$$\frac{\partial A}{\partial t} \approx \frac{A_1^{m+1} - A_1^m}{\Delta t} \quad (2.64)$$

y respecto al espacio en forma descentrada, como

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \theta \frac{(Q_2 - Q_1)^{m+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{(Q_2 - Q_1)^m}{\Delta x} \quad (2.65)$$

en donde se ha incluido el parámetro θ con $0 \leq \theta \leq 1$. Dependiendo del valor que se le asigne a θ , 0, 0.5 o 1, la ecuación se resolverá de forma explícita, semi-implícita o implícita respectivamente.

$$\frac{A_1^{m+1} - A_1^m}{\Delta t} + \theta \frac{(Q_2 - Q_1)^{m+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{(Q_2 - Q_1)^m}{\Delta x} = -(Pz)_1^m \quad (2.66)$$

de donde, despejando A_1^{m+1} , se llega a:

$$A_1^{m+1} = A_1^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\theta (Q_2 - Q_1)^{m+1} + (1 - \theta) (Q_2 - Q_2)^m \right] - \Delta t (Pz)_1^m \quad (2.67)$$

Para resolver la ecuación (2.67) hace falta definir Q_1^{m+1} como condición de contorno en la entrada, además de haber resuelto Q_2^{m+1} mediante el esquema numérico que resuelve los puntos interiores de la malla descrito anteriormente. El mismo procedimiento se repite en el extremo aguas abajo, los únicos cambios son Q_1^{m+1} y Q_2^{m+1} que aguas abajo serán, respectivamente, Q_N^{m+1} y Q_{N-1}^{m+1} , donde Q_N^{m+1} se definirá como condición de contorno en la salida.

$$A_N^{m+1} = A_N^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\theta (Q_N - Q_{N-1})^{m+1} + (1 - \theta) (Q_N - Q_{N-1})^m \right] - \Delta t (Pz)_N^m \quad (2.68)$$

en este caso, se ha resuelto la ecuación de forma explícita, asignándole a theta el valor de 0.

2.3.5. Tratamiento de solutos

El flujo de solutos se representa a partir del modelo 1-D de advección-dispersión propuesto por García-Navarro *et al.* (2000). La cantidad de sustancia en el flujo de agua se especifica mediante su concentración volumétrica, C , y se admite que el transporte de esta sustancia es mixto, no se desprecian los efectos difusivos en ningún caso.

En el contexto del modelo de agua propuesto anteriormente, C , la concentración promediada en la sección transversal, es el objetivo principal y su evolución espaciotemporal en el surco queda descrita por la ecuación (2.30a) o la (2.30b). Para el modelado numérico se ha adoptado la forma expresada en (2.30a) que se reproduce aquí,

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} + PzC = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.69)$$

La resolución numérica de la ecuación anterior se lleva a cabo en tres fases: primero se resuelve el término advectivo, en dos pasos sucesivos, y de forma acoplada con el cálculo del modelo de circulación de agua, resolviéndose conjuntamente y satisfaciendo la condición de estabilidad (ec. 2.78); a continuación, se resuelve el término dispersivo; por último se resuelve el término debido a la infiltración.

- Fase 1: Advección

La parte advectiva de la ecuación (2.69) se recoge en la ecuación (2.70), y se acopla con el modelo de circulación de agua y se resuelve como su término dinámico, es decir, se le aplica el método de MacCormack.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = - \frac{\partial(QC)}{\partial x} \quad (2.70)$$

Paso advectivo-predictor:

$$(AC)_i^p = (AC)_i^m - \Delta t (QC)_{i+\frac{1}{2}}^m \quad (2.71)$$

Paso advectivo-corrector:

$$(AC)_i^c = (AC)_i^p - \Delta t (QC)_{i-\frac{1}{2}}^p \quad (2.72)$$

La variación de (AC) por el término advectivo es el promedio del resultado obtenido en ambos pasos:

$$(AC)_i^{mac} = \frac{(AC)_i^p + (AC)_i^c}{2} \quad (2.73)$$

- Fase 2: Dispersión

Para resolver numéricamente el término de dispersión (ec. 2.74) se aplica un esquema estándar de diferencias centradas, en el que se utilizarán los valores calculados en el paso anterior:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.74)$$

$$(AC)_i^{disp} - (AC)_i^{mac} = \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\left[(AE)_{i-\frac{1}{2}} \right]^{m+1} \frac{(C)_{i-1}^{mac} - (C)_i^{mac}}{\Delta x} - \left[(AE)_{i+\frac{1}{2}} \right]^{m+1} \frac{(C)_i^{mac} - (C)_{i+1}^{mac}}{\Delta x} \right] \quad (2.75)$$

La evaluación de las cantidades $\left[(AE)_{i-\frac{1}{2}} \right]^{m+1}$ y $\left[(AE)_{i+\frac{1}{2}} \right]^{m+1}$ se realiza de una forma lineal:

$$\left[(AE)_{i-\frac{1}{2}} \right]^{m+1} = \left[\frac{(AE)_i + (AE)_{i-1}}{2} \right]^{m+1} \quad (2.76)$$

$$\left[(AE)_{i+\frac{1}{2}} \right]^{m+1} = \left[\frac{(AE)_{i+1} + (AE)_i}{2} \right]^{m+1} \quad (2.77)$$

La condición de estabilidad del esquema en este caso queda determinada por la combinación de ambos términos de advección y dispersión. El paso de tiempo está limitado por el número de Peclet y el número de CFL (Burguete y García-Navarro, 2004a; Murillo, 2005), por lo que se tiene que cumplir la siguiente expresión:

$$Pe + CFL \leq 1 \quad (2.78)$$

Por tanto, para asegurar la estabilidad del esquema acoplado de agua y solutos, se adoptará en cada paso el valor de intervalo de tiempo resultado de tomar la condición más restrictiva entre las ecuaciones (2.55) y (2.78).

- Fase 3: Infiltración

La contribución del término asociado a la infiltración a la variación de (AC) viene dada por:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = -PzC \quad (2.79)$$

que se puede expresar de la forma

$$(AC)_i^{m+1} = (AC)_i^{disp} - P_i^f z_i^f C_i^{disp} \quad (2.80)$$

de donde se obtienen los valores finales de concentración a lo largo del surco para ese instante de cálculo como,

$$C_i^{m+1} = A_i^{-(m+1)} \cdot (AC)_i^{m+1} \quad (2.81)$$

La masa infiltrada por unidad de longitud en el surco se acumula siguiendo la siguiente expresión,

$$(AC_{\text{inf}})_i^{m+1} = (AC_{\text{inf}})_i^m + PzC_i^{\text{disp}} \Delta t^{m+1} \quad (2.82)$$

y la masa de soluto que sale del surco por escorrentía,

$$Ms = \sum_{n=1}^{t_{\text{final}}} Q_N^m \cdot C_N^m \cdot \Delta t^m \quad (2.83)$$

3. Ensayos de campo: Diseño, calibración del modelo de flujo de agua y resultados experimentales

3.1. Descripción de los ensayos

Para evaluar la influencia del régimen del flujo de agua en las condiciones de transporte del fertilizante y disponer del modelo 1-D de agua y solutos en surcos de riego operativo para la simulación de las diferentes operaciones de fertirriego, se requiere información experimental con la que calibrar los parámetros de las ecuaciones de infiltración y advección-dispersión (ec. 2.11 y 2.29 respectivamente). Con este fin se realizaron una serie de ensayos en parcelas de surcos, cuyo diseño y desarrollo se describen a continuación. Se ha calibrado el modelo del flujo de agua para poder analizar de forma completa los resultados experimentales.

3.1.1. Diseño experimental

Para la realización de los ensayos se escogió una parcela experimental en la finca Alameda del Obispo de Córdoba, con suelo aluvial de clase textural franca, con alto

contenido en carbonato cálcico y pobre en materia orgánica, clasificado como *Typic xerofluvent* (Soil Survey Staff, 1999), o como *Eutric fluvisol* (FAO, 1988). La parcela, de 135 m de longitud y 0.8 % de pendiente, se gradeó varias veces antes de aporcar surcos, a los que se les dio una separación de 0.75 m. La figura 3.1 muestra la parcela experimental, con un grupo de surcos de riego.



Figura 3.1. Parcela experimental.

En la tabla 3.1 se presentan las características texturales medias del suelo resultado de unos ensayos realizados durante los veranos de 1994 y 1995 (Fernández-Gómez, 2004).

Tabla 3.1. Fracciones de arena, limo y arcilla en el suelo de la parcela experimental.

<i>Año</i>	<i>Arena</i> (%)	<i>Limo</i> (%)	<i>Arcilla</i> (%)
1994	35.0	44.3	20.6
1995	32.6	45.6	21.8

Se han adoptado como variables de diseño de los ensayos el momento de aplicación del fertilizante y el orden del riego en el que se realiza dicha aplicación (primer o segundo riego). En todos los ensayos, la aplicación de una misma cantidad de trazador en cabecera se realizó en idénticas condiciones de concentración y duración de la aplicación. El caudal de agua en cabecera, constante durante el ensayo, se ajustó en función del orden de riego

en el que se aplicó el soluto para conseguir una misma lámina infiltrada teniendo en cuenta la mayor compactación del suelo en el segundo riego, tal y como se realiza en la práctica del riego (ver valores en la tabla 3.2).

Los ensayos se llevaron a cabo durante el verano de 2003. Se regaron dos grupos de 3 surcos en la parcela. En cada grupo las medidas se efectuaron en el surco central, actuando de guarda los otros dos. Se realizaron dos riegos. El primer riego tuvo lugar los días 22 y 23 de julio (un grupo de surcos cada día), sobre el suelo recién gradeado y aporcado. El segundo riego se realizó durante los días 5 y 6 de agosto, sin que mediara ninguna labor tras el primer riego, y sin que ocurriera precipitación alguna entre ambos riegos. En total, se efectuaron cuatro ensayos de riego.

En la tabla 3.2 se muestran las características de los cuatro ensayos, con tres aplicaciones diferentes en cada uno de ellos, en los que se usaron como trazadores bromuro potásico y nitrato potásico, según los casos. Se puede observar el riego al que corresponde cada uno (primer o segundo riego), el caudal de entrada, el tiempo de avance del flujo hasta el final del surco y los tiempos en los que se realizó la aplicación de fertilizante desde el comienzo del ensayo. Las tres aplicaciones realizadas en cada ensayo corresponden a la fase transitoria, inicio de condiciones permanentes y permanentes para el flujo superficial de agua, respectivamente. Se descartó la primera aplicación del ensayo 1 debido a problemas durante la realización del ensayo.

Tabla 3.2. Características de los ensayos de campo.

Ensayo	Orden de riego	Q_0 (L/s)	t_{avance}	$T_{inicio\ aplicación\ trazador}$		
				Ap. 1	Ap. 2	Ap. 3
				<i>min</i>		
1	1	0.86	75.5	—*	105.8	176.6
2	1	1.14	62.8	55.4	81.3	166.4
3	2	0.66	39.5	34.5	58.4	87.4
4	2	0.62	43.5	36.7 *	62.0	95.0

* BrK como trazador; NO₃K en el resto.

La primera aplicación en cada ensayo se realizó cuando el frente de agua había recorrido el 88% de la longitud del surco, 87% y 84% para los ensayos 2, 3 y 4, respectivamente. Esta elección corresponde a resultados previos obtenidos por Domínguez *et al.* (2003).

3.1.2. Medidas de caudal de entrada y salida

El caudal de entrada y salida se midió en cada ensayo utilizando aforadores portátiles tipo RBC (Clemmens *et al.*, 1984). Estos aforadores tienen un estrechamiento largo en el que se produce una transición gradual del flujo de entrada hasta conseguir régimen crítico, condiciones en las que se relaciona de forma directa el calado con el caudal.

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran los aforadores colocados en la cabecera y cola de los surcos durante los ensayos. Se dispuso un plástico en cabecera para poder mantener el caudal de entrada y evitar la erosión y consecuente deformación del cauce en dicho punto.



Figura 3.2. Aforadores situados en la cabecera de los surcos.



Figura 3.3. Aforadores situados en la cola de los surcos.

3.1.3. Aplicación y medida del trazador

Los trazadores utilizados fueron NO_3K y BrK , que se aplicaron en cabecera en forma de solución concentrada, 5 kg de trazador disueltos en 22.5 L de agua, mediante un pulso de 4 minutos de duración realizado en distintos momentos desde el comienzo del riego (aplicaciones 1, 2, 3 en la tabla 3.2). El movimiento en superficie del soluto se evaluó midiendo la evolución temporal de la conductividad eléctrica (CE) del agua en secciones transversales en el surco (en cabecera, y a 33.75 m, 67.5 m, 101.25 m y 135 m de la misma) con conductímetros portátiles.

La figura 3.4 muestra una estación de medida, pudiéndose observar la situación de la célula de medida del conductímetro situada en el surco central.



Figura 3.4. Estación de medida durante un ensayo.

Los conductímetros utilizados se calibraron el día previo a los ensayos usando soluciones con una amplia gama de concentraciones de los trazadores, en las que se midió la CE. La relación entre su concentración y CE es lineal; en el Anejo I se recogen las rectas calibradas. Para comprobar el estado de los conductímetros durante cada ensayo, se tomaron varias muestras de agua por cada estación para analizar en laboratorio la concentración del trazador.

3.1.4. Geometría de los surcos

Para determinar la geometría de los surcos se utilizó un perfilómetro de varillas, figura 3.5, con una separación entre varillas de 10 mm, que permite la reproducción en papel de la sección transversal del surco. Se tomaron medidas en las cinco estaciones de muestreo después de cada ensayo. En el Anejo II se recogen las medidas tomadas en campo con el perfilómetro de varillas.

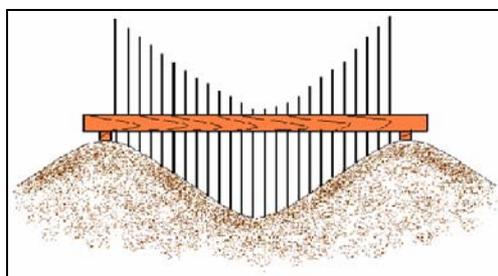


Figura 3.5. Perfilómetro de varillas.

3.1.5. Toma de muestras de suelo para el análisis de bromuro

Se ha escogido como trazador BrK en los ensayos por la gran movilidad del ión Br⁻ en el suelo, que permite estimar el flujo de agua a su través, así como por su fácil extracción y análisis sin enmascaramiento por la presencia previa de la sustancia en el suelo, como sucede en el caso de los compuestos de nitratos. Al tener que descartarse la primera aplicación del primer ensayo, correspondiente a una aplicación de bromuro, sólo se muestreó el suelo en el surco correspondiente al ensayo 4, tomándose muestras con

barrena a diferentes profundidades en el perfil de suelo en las cinco estaciones de medida y en las secciones intermedias entre las estaciones. En cada estación de medida se seleccionaron cinco puntos de la sección (figura 3.6), un punto de recogida en cada lomo, para poder ver el efecto bidimensional del movimiento del agua en los depósitos de bromuro, otros dos puntos en la zona media de la pendiente de bajada hacia el lecho, y otro punto en el centro del lecho. En cada punto se tomaron 10 muestras de 0.15 m de espesor cada una, por lo que en se alcanzó una profundidad total de 1.5 m de suelo. De esta forma se puede integrar fácilmente la masa total de bromuro en la sección de surco.

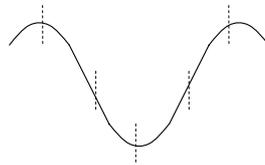


Figura 3.6. Puntos de toma de muestras de suelo en las estaciones de medida del surco.

Las muestras de suelo recogidas se analizaron en laboratorio, en el Anejo III se desarrolla el método utilizado, obteniendo la cantidad de bromuro retenido por el suelo, que se utilizó para cerrar el balance de masa a escala de surco, como una comprobación adicional. Se decidió tomar las muestras en las estaciones de medida de conductividad eléctrica, para poder comparar las lecturas de los conductímetros con la masa de bromuro en el suelo, aunque también se tomaron muestras en las secciones intermedias a estas estaciones y así poder estimar la cantidad de soluto en todo el surco con el apoyo de 9 estaciones muestreadas. Los resultados obtenidos se contrastaron con las estimaciones de masa realizadas a partir de las medidas de CE en el agua, pudiendo verificar las lecturas de los conductímetros.

3.2. Medidas experimentales y calibración del modelo de flujo de agua

Una vez desarrollado el modelo de flujo de agua, es necesario calibrarlo con las medidas experimentales, para poder simular posteriormente el flujo de solutos y obtener conclusiones. La fase de receso no se ha calculado en los surcos, ya que para trabajar con el flujo de solutos no es necesaria.

Para llevar a cabo la calibración es necesario definir la geometría del surco, en este trabajo se ha asumido forma trapezoidal y constante para cada ensayo, y sus características de obtuvieron a partir de las medidas de los perfiles tomados en los surcos después de cada ensayo y que se pueden consultar en el Anejo II. De los cinco perfiles medidos correspondientes a cada ensayo, se escogieron las características (base y ángulo del talud lateral) del más representativo. Como se puede observar en la tabla 3.3, a cada ensayo le corresponden unas características propias.

Tabla 3.3. Características geométricas de los surcos

<i>Ensayo</i>	<i>base (m)</i>	<i>tg α</i>
1	0.14	1.6
2	0.12	2.1
3	0.09	1.2
4	0.10	1.5

Los parámetros de calibración del modelo de agua son los de la ecuación de infiltración y el coeficiente de aspereza de Manning. Los datos experimentales usados en la calibración son las curvas de avance en cada ensayo y los hidrogramas de esorrentía medidos en la cola del surco (fig. 3.7 y 3.8 para ensayos de primer y segundo riego, respectivamente). Los parámetros de la ecuación de infiltración se estimaron con el método descrito en el apartado 2.1.3.2. Todos los parámetros se ajustaron con el modelo hasta que las diferencias entre las curvas de avance, experimental y calculada, fueron mínimas. Se

analizaron también los hidrogramas de salida, consiguiendo que el resultado del modelo siguiera la tendencia de las medidas tomadas en campo. En la tabla 3.4 se presentan los valores de los parámetros de calibración para cada ensayo.

Tabla 3.4. Valores ajustados de los parámetros de la ecuación de infiltración y el coeficiente de aspereza de Manning en todos los ensayos de campo.

Ensayo	Riego	$k (m s^{-a})$	a	$f_0 (m s^{-1})$	$n (S.I.)$
1	1°	0.022	0.27	$1.10 \cdot 10^{-5}$	0.037
2	1°	0.022	0.269	$7.30 \cdot 10^{-6}$	0.040
3	2°	0.015	0.26	$6.68 \cdot 10^{-6}$	0.020
4	2°	0.016	0.21	$3.92 \cdot 10^{-6}$	0.017

En las figuras 3.7 y 3.8 se presentan las curvas de avance y los hidrogramas de escorrentía calculados y medidos para los ensayos realizados en primer y segundo riego respectivamente. Se observa que los tiempos de avance son mayores en los ensayos correspondientes al primer riego, esto era de esperar ya que el contenido inicial de humedad en el suelo es menor en estos ensayos. Los hidrogramas de escorrentía obtenidos con el modelo están dentro del rango de valores medidos en cada ensayo, por lo que se deduce que el modelo reproduce el movimiento de agua satisfactoriamente. En la tabla 3.5 se presentan los errores relativos calculados entre las curvas de avance obtenidas con el modelo y las medidas para todos los ensayos, y el error de balance de masa que proporciona el modelo.

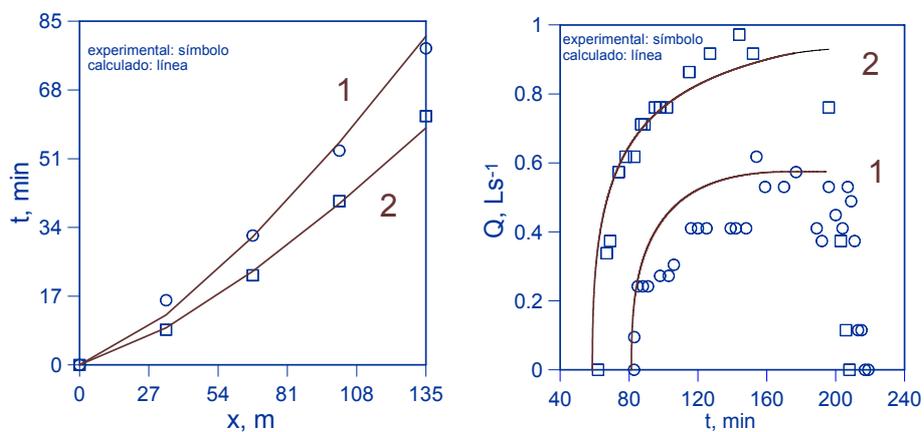


Figura 3.7. Curva de avance e hidrograma de escorrentía para los ensayos realizados en primer riego (ensayos 1 y 2).

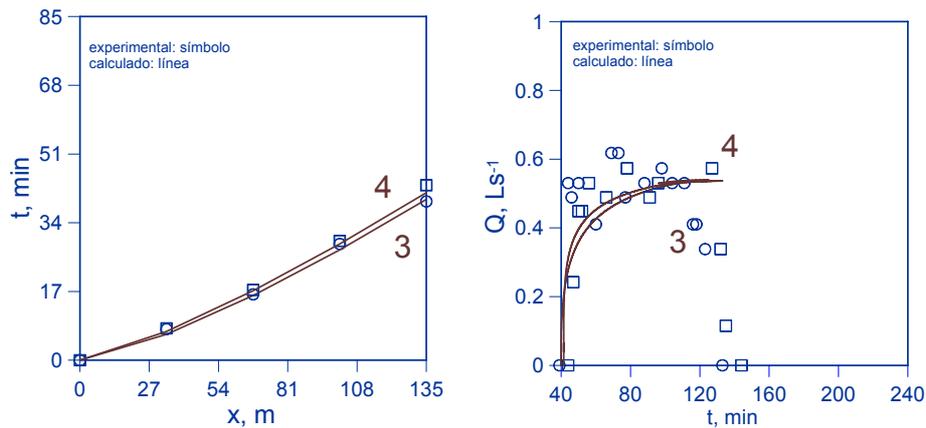


Figura 3.8. Curva de avance e hidrograma de escorrentía para los ensayos realizados en segundo riego (ensayos 3 y 4).

Tabla 3.5. Errores relativos de los valores calculados y medidos de las curvas de avance, y error del balance de masa del modelo.

<i>Ensayo</i>	<i>Riego</i>	<i>Error relativo</i>	<i>Error balance de masa (%)</i>
1	1°	0.06	0.92
2	1°	0.08	2.21
3	2°	0.05	1.16
4	2°	0.02	0.98

Los errores relativos calculados a partir de las curvas de avance, experimental y calculada, indican el buen ajuste de los parámetros de calibración. El error en el balance de masa que proporciona el modelo en cada ensayo se encuentra dentro de los valores esperados. Éstos no difieren mucho de los obtenidos por Brufáu *et al.* (2002), donde el modelo que usan presenta errores del balance de masa entre 1.4 y 1.7 %; el modelo utilizado por Abbasi *et al.* (2003b) proporciona errores entre el 0.004 y 1.8 %. En los resultados presentados por Maikaka (2004) el error del balance de masa obtenido con el esquema de MacCormack y las condiciones de contorno de conservación local (utilizadas en este estudio) varía entre el 3 y el 5%.

3.3. Evolución del soluto en el flujo superficial de agua: Resultados experimentales

3.3.1. Evolución temporal de soluto en el flujo de agua

En cada estación de muestreo, los flujos de soluto superficial y a través del suelo se calcularon a partir de la concentración de soluto medida y del caudal estimado con el modelo de flujo de agua en cada instante. En las figuras 3.9-3.12 se puede observar cómo evoluciona en cada ensayo la concentración superficial de soluto para cada una de las aplicaciones efectuadas. Se analizaron los casos de régimen transitorio (Ap. 1), comienzo del régimen permanente (Ap. 2) y en régimen permanente (Ap. 3) en las cinco estaciones de muestreo, así como la carga de soluto asociada, $W(t)$, calculada como el producto de la concentración medida, C , y el caudal circulante calculado con el modelo, Q (según se ha descrito en el capítulo 2).

$$W = Q \cdot C \quad (3.1)$$

Las figuras 3.9 a 3.12 representan ambas variables normalizadas con respecto a sus valores durante la aplicación en la cabecera del surco, C_0 y W_0 (tabla 3.6), respectivamente.

Tabla 3.6. Valores de concentración y carga iniciales en cada ensayo.

<i>Ensayo</i>	<i>Riego</i>	C_0 (g/L)	W_0 (g/s)
1	1°	14.9	12.8
2	1°	11.3	12.9
3	2°	19.4	12.8
4	2°	22.6*	14.0*
		20.7	12.8

* Aplicación de BrK.

En general, se aprecia el efecto del transporte advectivo-difusivo en la evolución temporal de soluto en las aplicaciones de todos los ensayos. La disminución de los valores máximos de concentración de soluto en las curvas conforme se aproximan al final del surco, es debida, además de a la infiltración del mismo en el suelo, al efecto de la dispersión, que favorece el aumento de la amplitud de las bases de las curvas durante este recorrido. Estas tendencias las encontraron en los resultados obtenidos por Playán y Faci (1997b) y García-Navarro *et al.* (2000) en los ensayos realizados en tablares y Domínguez *et al.* (2003) y Zapata *et al.* (2005) en los ensayos realizados en surcos.

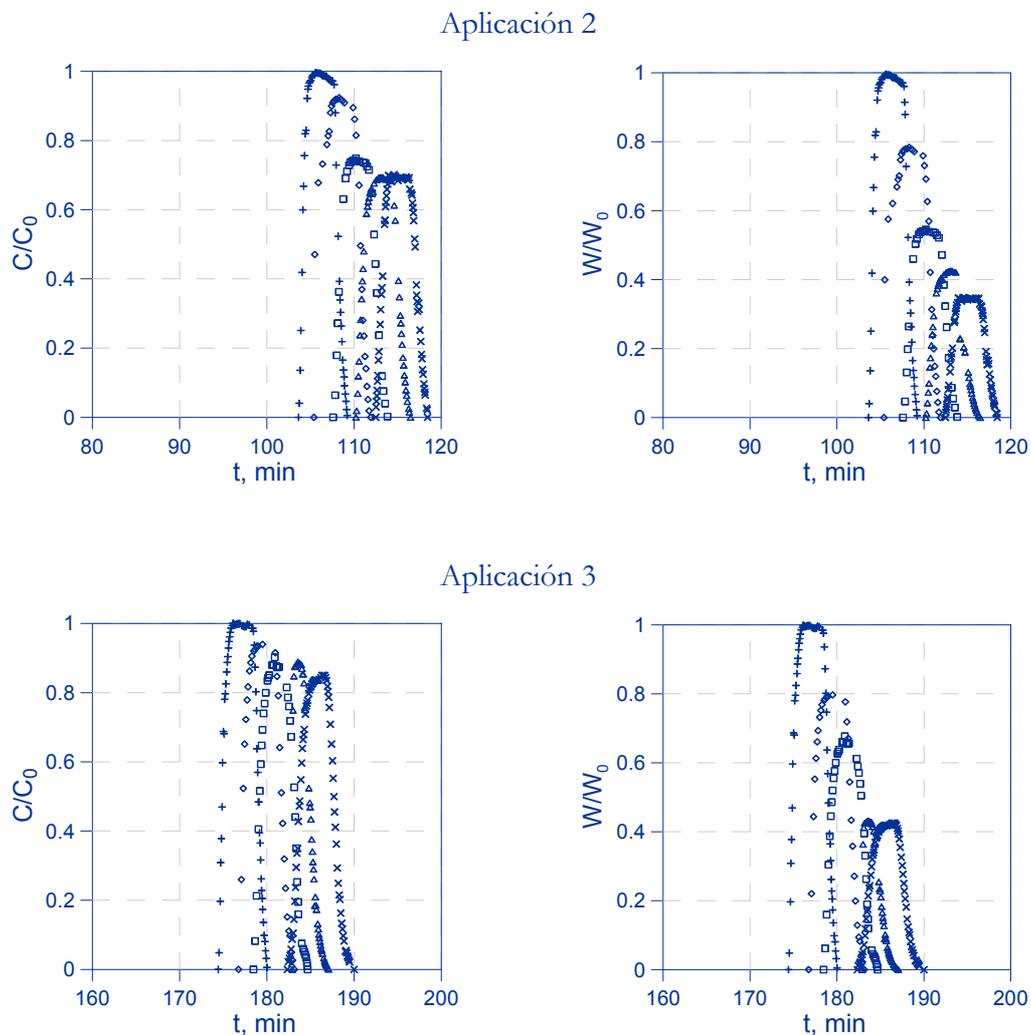
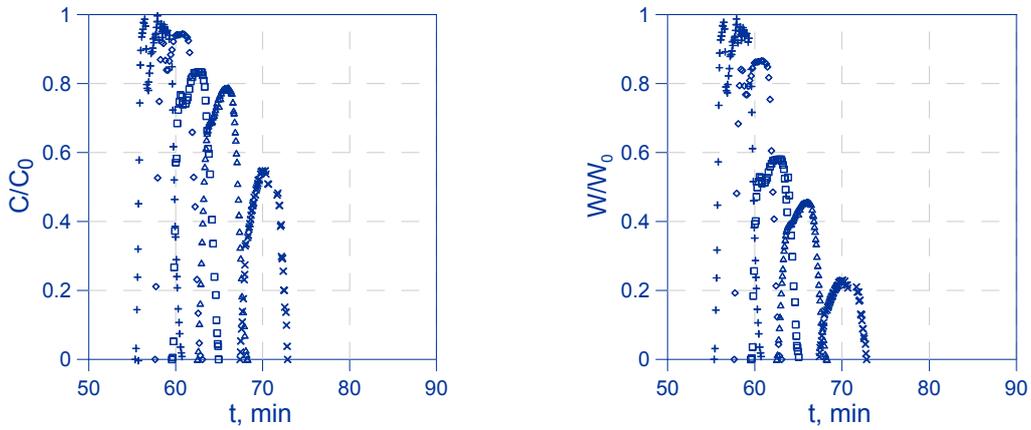
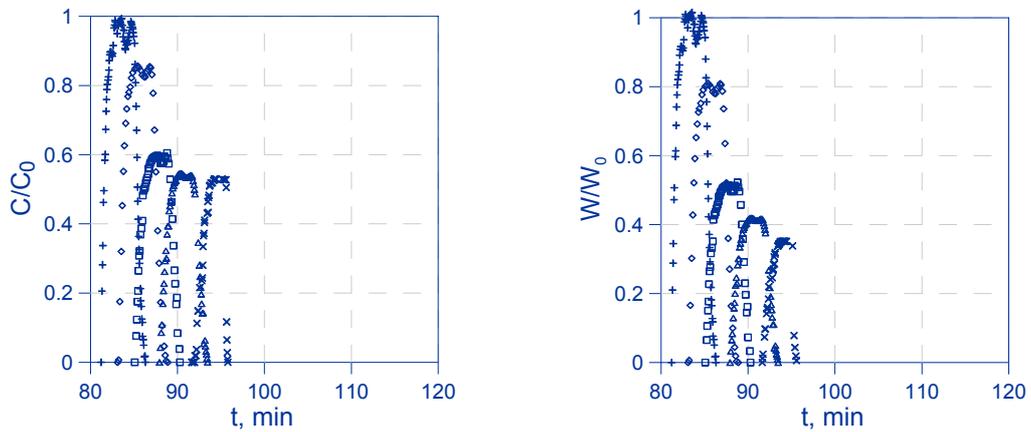


Figura 3.9. Evolución temporal de la concentración y carga de soluto durante el ensayo 1.
 + Estación 1, \diamond estación 2, \square estación 3, Δ estación 4, x estación 5

Aplicación 1



Aplicación 2



Aplicación 3

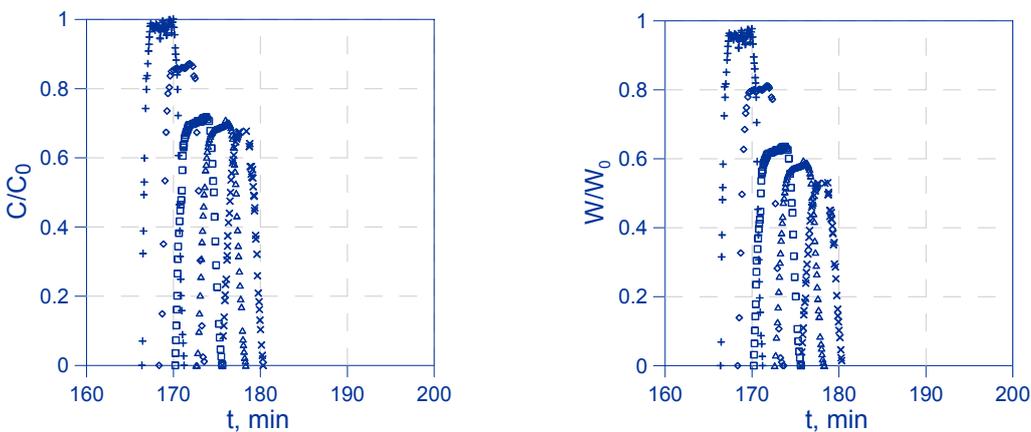


Figura 3.10. Evolución temporal de la concentración y carga de soluto durante el ensayo 2.

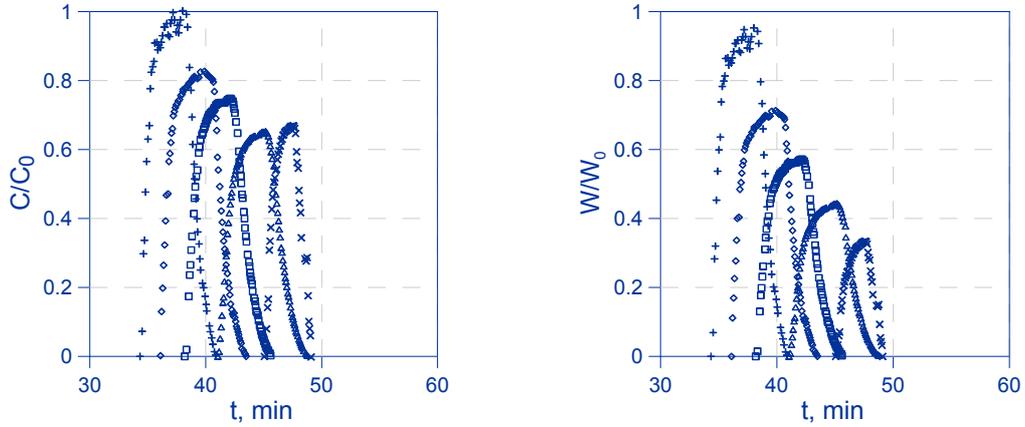
+ Estación 1, \diamond estación 2, \square estación 3, \triangle estación 4, \times estación 5

Las figuras 3.9 y 3.10 muestran la evolución temporal de la concentración y de carga en los ensayos correspondientes a primer riego. Se puede observar que la concentración disminuye de forma pronunciada entre la segunda estación y la tercera, en la segunda aplicación de ambos ensayos. La tercera aplicación del segundo ensayo también presenta esta tendencia, mientras que en la primera aplicación la disminución de concentración se produce de forma gradual entre las cinco estaciones. En la última aplicación del primer ensayo la disminución de la concentración entre las estaciones es muy pequeña.

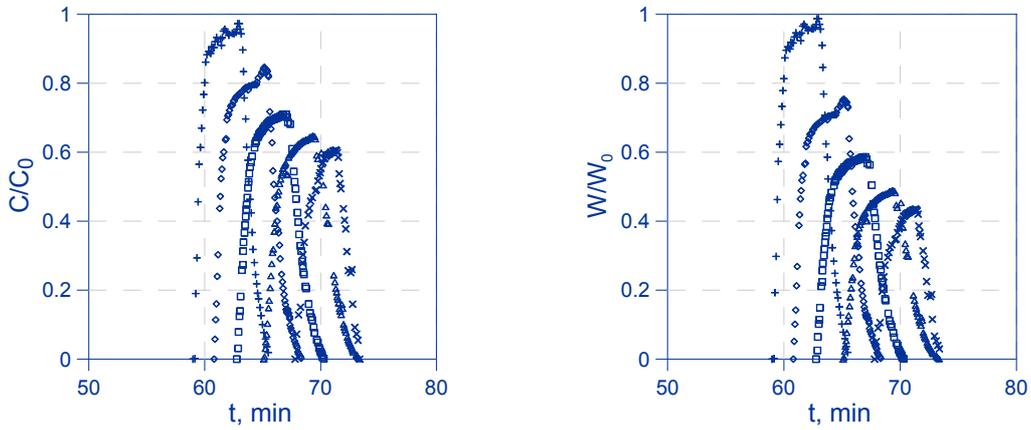
En los ensayos correspondientes a segundo riego que se presentan en las figuras 3.11 y 3.12, se observan unas tendencias parecidas, aunque más suaves, por ejemplo, todas las aplicaciones del tercer ensayo y la primera aplicación del ensayo 4 presentan una disminución gradual de la concentración entre las cinco estaciones. No es así en las aplicaciones correspondientes al cuarto ensayo, en las que existe una disminución pronunciada entre las dos primeras estaciones, aunque de un orden de magnitud menor que las presentadas en los casos de primer riego.

Se puede observar que los efectos difusivos son más significativos en el primer riego que en el segundo, esto se puede deber a que estos ensayos al ser más lentos, la tasa de infiltración es mayor, y la influencia de la velocidad media del flujo para que el transporte sea advectivo es menor. Los ensayos realizados en segundo riego al tener el lecho más compactado y una mayor humedad inicial en el suelo, tienen un flujo de agua más rápido que favorece el transporte advectivo (de ahí que en la práctica el caudal aplicado en cabecera en 2º riego y sucesivos disminuya).

Aplicación 1



Aplicación 2



Aplicación 3

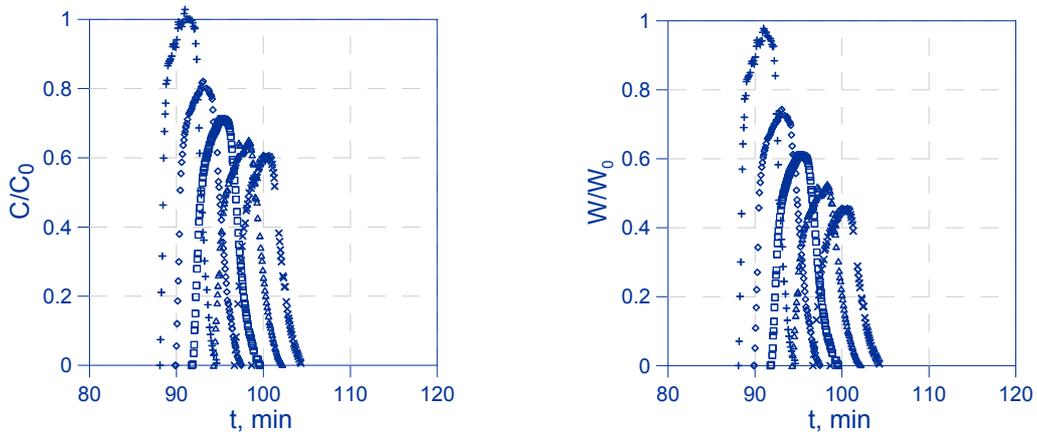
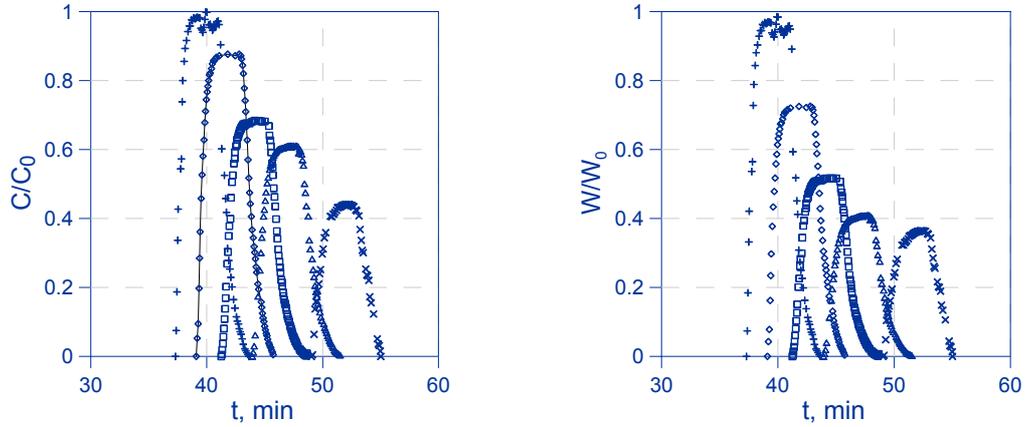


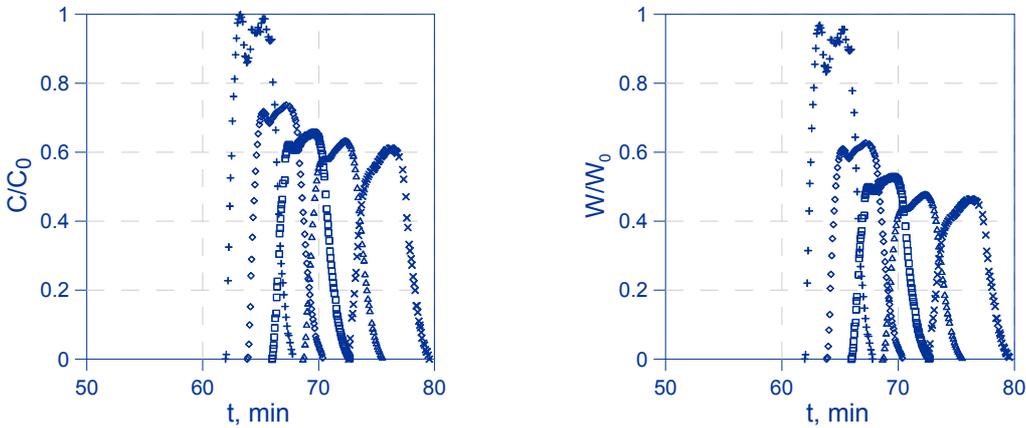
Figura 3.11. Evolución temporal de la concentración y carga de soluto durante el ensayo 3.

+ Estación 1, ◇ estación 2, □ estación 3, △ estación 4, x estación 5

Aplicación 1



Aplicación 2



Aplicación 3

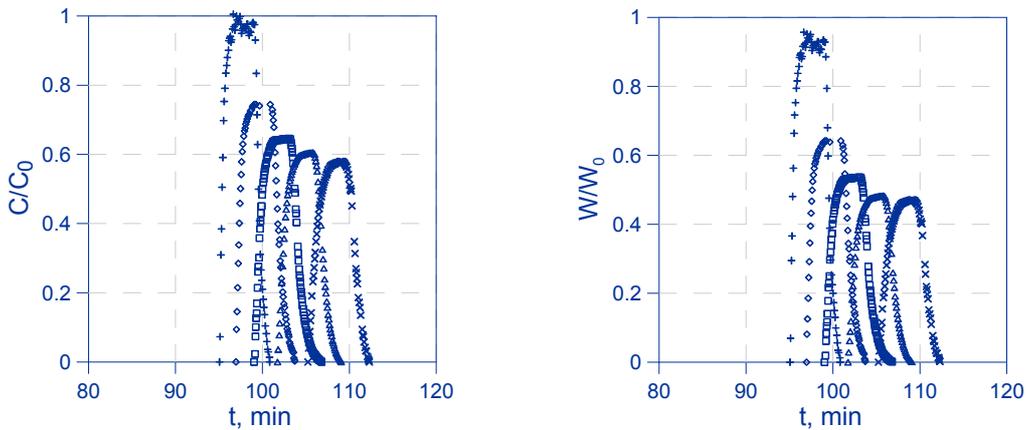


Figura 3.12. Evolución temporal de la concentración carga de soluto durante el ensayo 4.

+ Estación 1, \diamond estación 2, \square estación 3, Δ estación 4, x estación 5

Asimismo, para un mismo ensayo se observa cómo, a medida que la aplicación de soluto se retrasa con respecto al inicio del riego, la disminución del valor máximo de concentración es menos marcada; esto se debe al mayor tiempo de oportunidad para infiltrarse el flujo de agua con soluto en las aplicaciones más tempranas, aun en condiciones transitorias (flujo de agua) con velocidad superficial del agua menor. Esto, a su vez condiciona la cantidad final de soluto que se infiltra en cada sección transversal del mismo y, con ello, los valores de uniformidad de distribución de soluto en cada caso (orden de riego y tiempo de inicio de la aplicación). El área encerrada bajo las curvas de carga en cada estación permite estimar la cantidad de soluto infiltrada en dicha sección.

3.3.2. Rendimiento de aplicación de agua y de soluto

Para realizar una buena operación de fertirrigación, hay que combinar simultáneamente un buen manejo del agua y del fertilizante. Este trabajo se ha centrado en el estudio del flujo de solutos, sin embargo se presentan los resultados de rendimiento de aplicación de agua que servirán para completar las conclusiones generales.

El cálculo del rendimiento de aplicación de agua es muy sencillo si se dispone de los hidrogramas de entrada y de esorrentía. Así, utilizando la ecuación 1.1 para el agua se obtienen los resultados de la tabla 3.7; en la tabla 3.8 se recogen los correspondientes al trazador. Se observa que para el caso del agua los rendimientos son bajos, por debajo del 50 % excepto para el ensayo 1 que es del 69%. Una programación completa de fertirriego ha de tener en cuenta agua y fertilizante.

Tabla 3.7. Rendimiento de aplicación de agua.

<i>Ensayo</i>	<i>Ra (%)</i>
1	69
2	45
3	46
4	41

Tabla 3.8. Rendimiento de aplicación de soluto.

Ensayo	Ra (%)		
	Ap. 1	Ap. 2	Ap. 3
1	–	65.5	58.5
2	68.1	65.7	62.1
3	50.7	43.6	49.0
4	69.0	48.7	50.5

Se puede observar que los mejores resultados de rendimiento de aplicación se producen en las primeras aplicaciones de cada ensayo; esto no sorprende ya que en estos casos la infiltración es mayor que en las últimas aplicaciones, en las que la velocidad media del flujo en el surco es mayor y la infiltración menor, por lo que se perderá más cantidad de trazador por escorrentía al final del surco, a igualdad de otras condiciones.

3.3.3. Estimación de la masa de trazador infiltrada a partir de muestreos de suelo

Como se ha descrito en el apartado 3.1.5, se muestreó el suelo correspondiente al ensayo 4. Estos resultados son necesarios para cerrar el balance de masa y compararlo con el resultado obtenido a partir de las medidas de concentración en superficie. Para integrar la masa infiltrada a lo largo del surco se interpola linealmente entre los datos de las estaciones de muestreo. En la figura 3.13 se puede observar la longitud asignada a la estación de muestreo intermedia entre las estaciones 2 y 3.

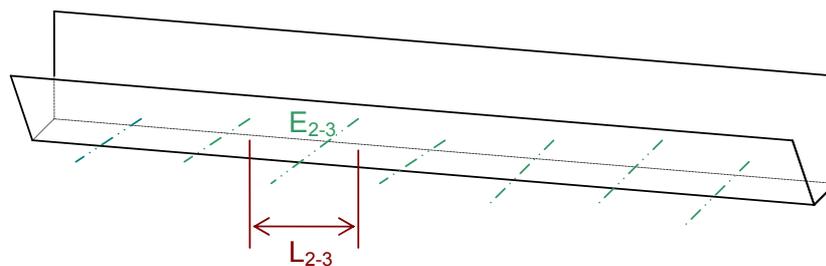


Figura 3.13. Ejemplo de la longitud asignada a cada estación de muestreo.

A partir de las medidas geométricas de los surcos tomadas en campo, se estima que el perímetro medio del surco ronda los 0.5 m. Con los datos de superficie asignados a cada estación de muestreo, se calcula la masa total infiltrada en el surco. En la tabla 3.9 se presenta la cantidad de bromuro por unidad de superficie correspondiente a cada estación de muestreo.

Tabla 3.9. Resultado del análisis de las muestras de suelo.

<i>Estación</i>	<i>1</i>	<i>1-2</i>	<i>2</i>	<i>2-3</i>	<i>3</i>	<i>3-4</i>	<i>4</i>	<i>4-5</i>	<i>5</i>
Br, g m⁻²	15.6	33.5	26.2	40.1	23.4	38.6	36.3	38.8	51.5

El rendimiento de aplicación para el ensayo 4 obtenido a partir de estos análisis es del **63 %**. Este resultado concuerda con el obtenido en el apartado anterior y corrobora experimentalmente el análisis de rendimiento de aplicación realizado con los valores de concentración en el flujo superficial, que es muy sensible a variaciones en la estimación la misma.

Estos resultados no son adecuados para evaluar la distribución final de soluto en el suelo una vez finalizado el riego, ya que el muestreo se realizó una semana después de los ensayos y durante esos días es normal que se produzca la redistribución no sólo de agua sino de sustancias en el suelo debido a la evaporación desde la superficie del suelo (Abbasi *et al.*, 2003c).

3.3.4. Uniformidad de distribución longitudinal de soluto en el suelo

La uniformidad de distribución, UD, es el segundo índice que se usa para describir la calidad de los resultados de la fertirrigación. Se puede representar gráficamente a partir de la masa infiltrada acumulada por unidad de longitud normalizada con respecto a la media, M^* . En las gráficas que se presentan a continuación se han representado los valores experimentales y los calculados con el modelo. La masa infiltrada en cada estación obtenida de forma experimental se estima a partir de los valores de infiltración y de la concentración

registrada en superficie en los ensayos. L^* es la distancia a cabecera en relación a la longitud total de surco, X/L .

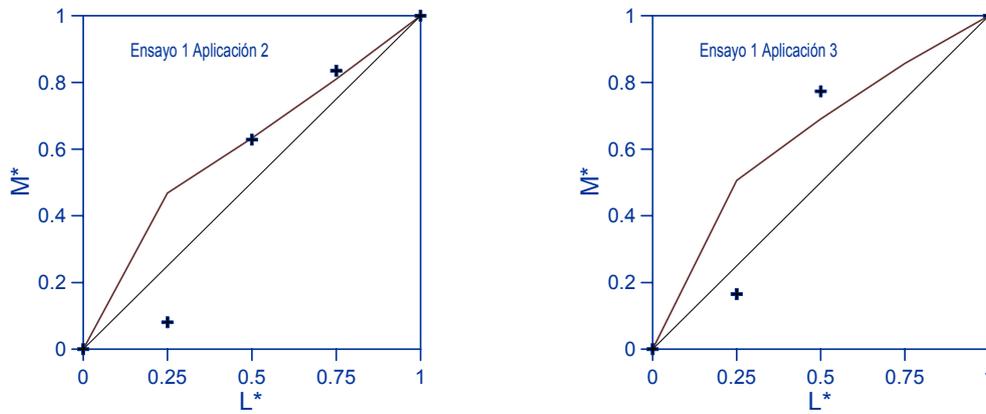


Figura 3.14. Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 1.

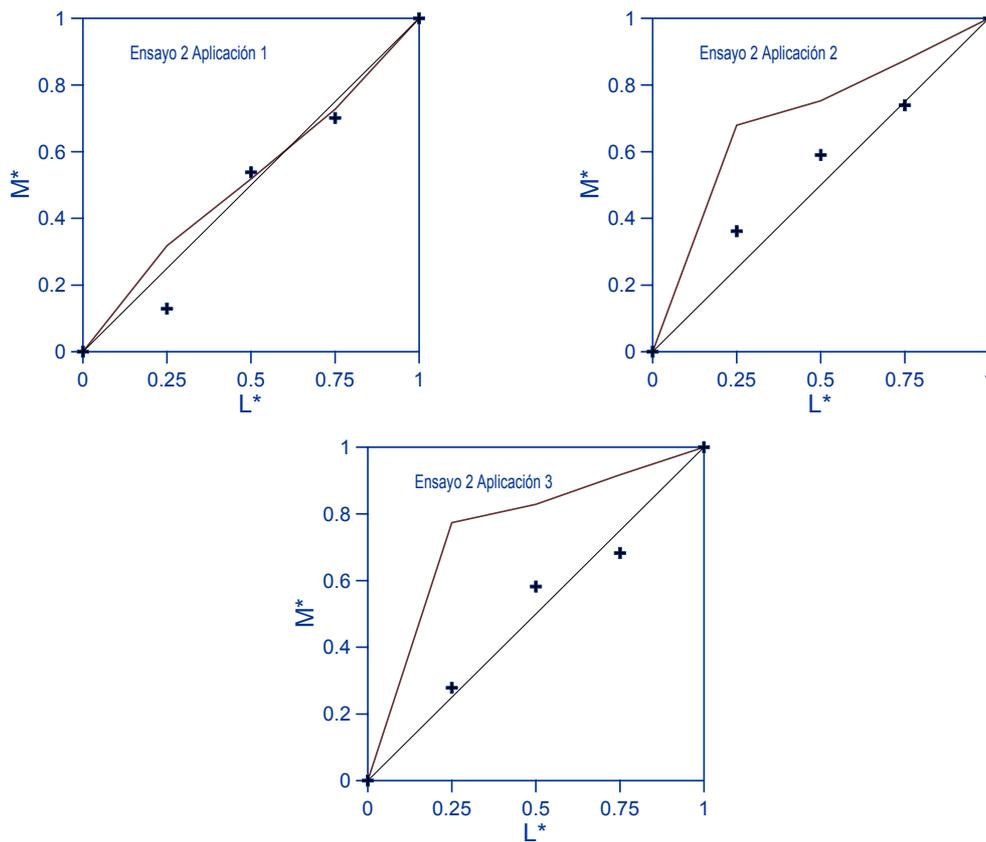


Figura 3.15. Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 2.

3. Ensayos de campo: Diseño, calibración del modelo de flujo de agua y resultados experimentales

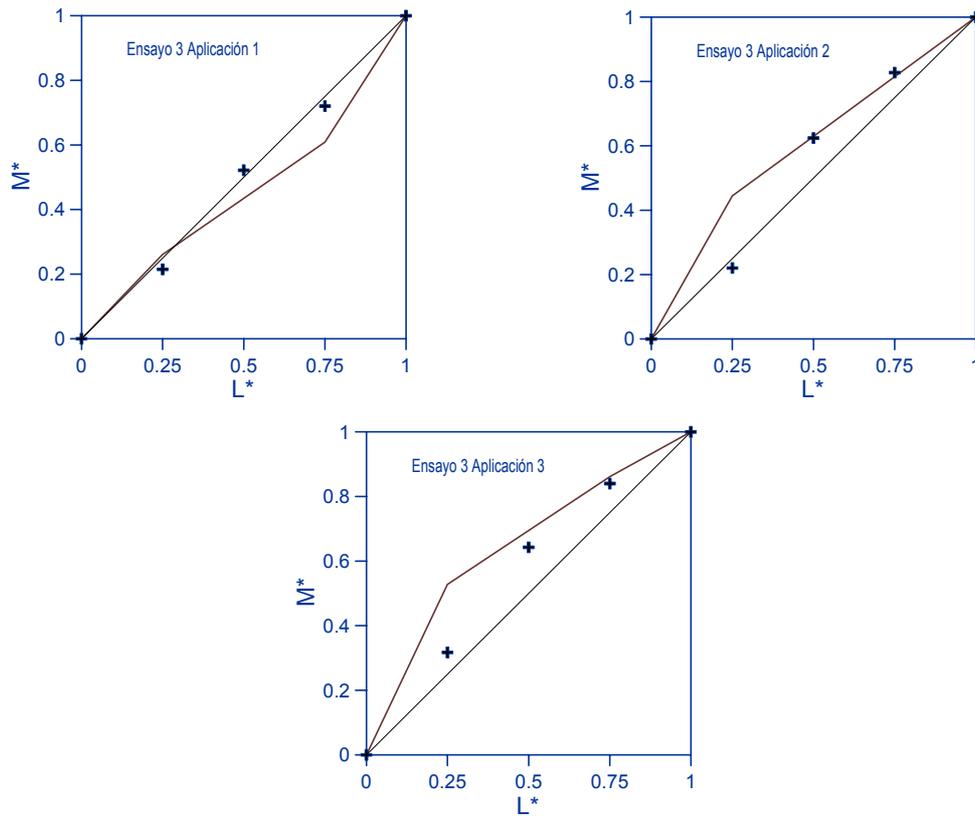


Figura 3.16. Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 3.

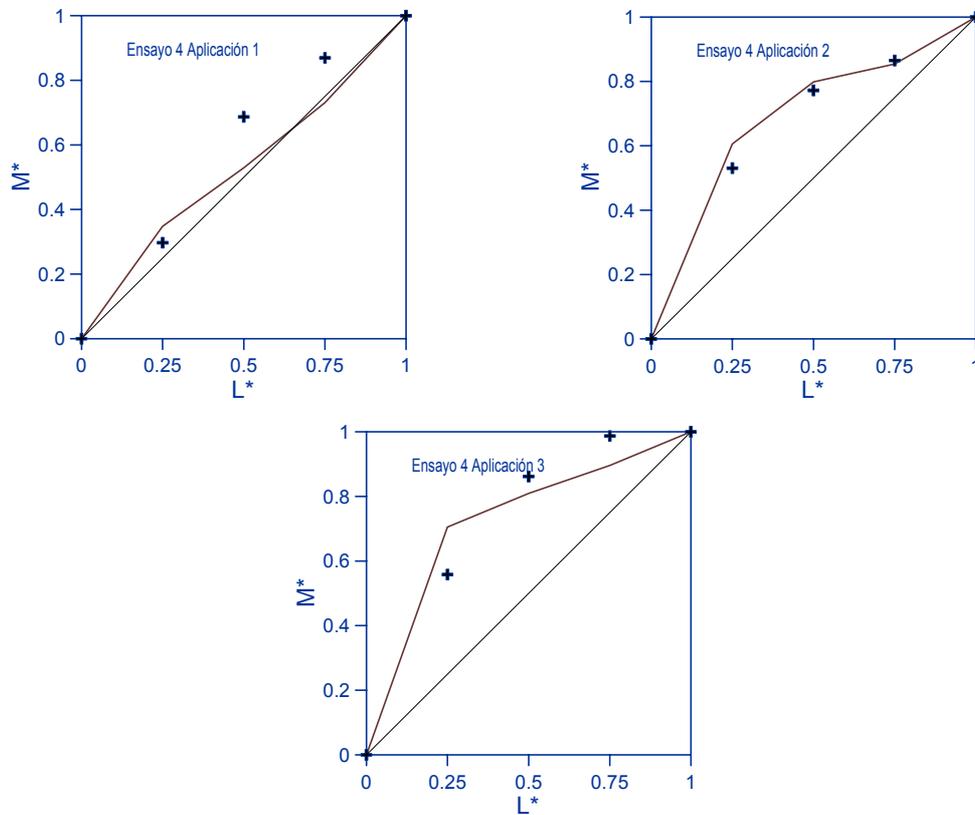


Figura 3.17. Masa relativa acumulada infiltrada en el ensayo 4.

En general el modelo recoge la tendencia observada en los resultados experimentales, aunque en algunos casos como las dos últimas aplicaciones del ensayo 2 y la primera del ensayo 4 parece que siguen tendencias diferentes. Esto se puede deber a la variabilidad espacial de la infiltración y de las propiedades del suelo, que tienen gran influencia en los sistemas de riego por superficie (Zapata y Playán, 2000), teniendo en cuenta además, que la distribución espacial de solutos en el suelo tiene mayor variabilidad espacial que el agua, por lo que su modelado resulta más complicado (Abbasi *et al.*, 2003d). En la tabla 3.10 se muestran los valores de UD obtenidos para cada caso con la ecuación 2.

Tabla 3.10. Uniformidad de distribución de soluto de soluto.

<i>Ensayo</i>	<i>UD</i>					
	<i>Ap. 1</i>		<i>Ap. 2</i>		<i>Ap. 3</i>	
	Medido	Calculado	Medido	Calculado	Medido	Calculado
1	–	–	0.77	0.83	0.91	0.94
2	0.76	0.97	0.75	0.97	0.88	0.96
3	0.89	0.95	0.94	0.97	0.82	0.97
4	0.91	0.91	0.88	0.96	0.90	0.97

Las mayores uniformidades de distribución se producen, como cabía esperar, en las últimas aplicaciones de cada ensayo, dadas las condiciones permanentes del flujo de agua. Los valores proporcionados por el modelo son en general bastante buenos para todas las aplicaciones. En algunas aplicaciones, sin embargo, el valor calculado es mayor que el experimental, esto también sucede en los resultados obtenidos en el trabajo de Abbasi *et al.* (2003b) para el caso de circulación en surco con escorrentía libre. Esto muestra una de las limitaciones del modelo 1-D utilizado, que tiene menor repercusión en las variables del flujo de agua que en las del flujo de soluto y teniendo en cuenta que el movimiento de agua y soluto en surcos es en general bidimensional (Izadi *et al.*, 1993).

3.4. Conclusiones

En el análisis de los datos experimentales se observa que el tipo de transporte del soluto en el flujo superficial es distinto entre los ensayos realizados en el primer riego y los realizados en el segundo riego. Las figuras 3.9 a 3.12 muestran estas diferencias, ya que el transporte se produce de forma más suave en los ensayos correspondientes al segundo riego. Esto influirá en el resultado final de la fertirrigación.

Los mejores resultados de rendimiento de aplicación se producen en las primeras aplicaciones de cada ensayo, no siendo así con los valores obtenidos de uniformidad de distribución, que se producen para las aplicaciones en condiciones permanentes del flujo de agua.

El modelo utilizado caracteriza de forma muy satisfactoria el movimiento en superficie, no siendo así para el subsuperficial; esto se justifica por el movimiento bidimensional del flujo en el surco, a lo que hay que sumar el carácter empírico de la ecuación de infiltración, que se asume constante en todo el surco, obviando la variabilidad espacial del suelo, todo esto hace que el modelo utilizado no proporcione una información completa de la distribución de soluto en el suelo. Esto se puede contrastar con los resultados obtenidos por Abbasi *et al.* (2003b), en los que el modelo proporciona unos resultados de uniformidad que están por encima de los medidos para el caso ensayado de surcos con escorrentía.

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

La optimización de la fertirrigación implica mejorar los resultados tanto de rendimiento de aplicación como de uniformidad de distribución del fertilizante. Estos resultados dependen del orden de riego, el momento y la duración de la aplicación, para una operación del riego dada. En el capítulo anterior se presentaron los resultados experimentales y su análisis, en los que se observaron diferencias en el resultado final de la fertirrigación, dependiendo de cuando se realice la aplicación de soluto. En este trabajo se intenta ahondar en las razones que marcan estas diferencias, para ello se procederá a la calibración del modelo de transporte de solutos utilizando como parámetro de calibración el coeficiente de dispersión longitudinal. En segundo lugar se busca una función que relacione este coeficiente con las variables de operación del fertirriego, para usar en simulaciones que abarquen un intervalo amplio de las mismas sin perder confianza en sus resultados. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones efectuadas con el tiempo de inicio y la duración de la aplicación de fertilizante como variables de diseño tanto en primer como segundo riego. Por último, se generan curvas de operación del fertirriego en surcos a partir de los resultados anteriores, y se extraen conclusiones referentes al manejo óptimo de este sistema.

4.1 Calibración del modelo de transporte de solutos

Una vez calibrado el modelo del flujo de agua, se procede a la calibración del modelo de transporte de solutos utilizando como parámetro de calibración el coeficiente de dispersión longitudinal, considerándolo constante, tanto en el tiempo como en el espacio para cada aplicación de soluto. Como en este trabajo se busca optimizar la fertirrigación, el criterio seguido en la calibración fue encontrar un valor del coeficiente de dispersión que proporcione unas condiciones de transporte similares a las ensayadas, obteniendo el mismo valor de rendimiento de aplicación que el obtenido en el análisis experimental. En las figuras que se muestran a continuación, se ha representado la evolución temporal, experimental y calculada, de soluto para todos los ensayos y aplicaciones, donde C^* es la concentración relativa (C/C_0) y t^* el tiempo relativo (t/t_{riego}). Cada figura contiene una tabla con el caudal de entrada de cada caso, la velocidad media del flujo de agua en el surco durante la circulación de soluto, desde que entra en el surco hasta que lo abandona, la concentración inicial de soluto y el valor del coeficiente de dispersión longitudinal resultado de las calibraciones. El error del balance de masa varía entre el 1-5%.

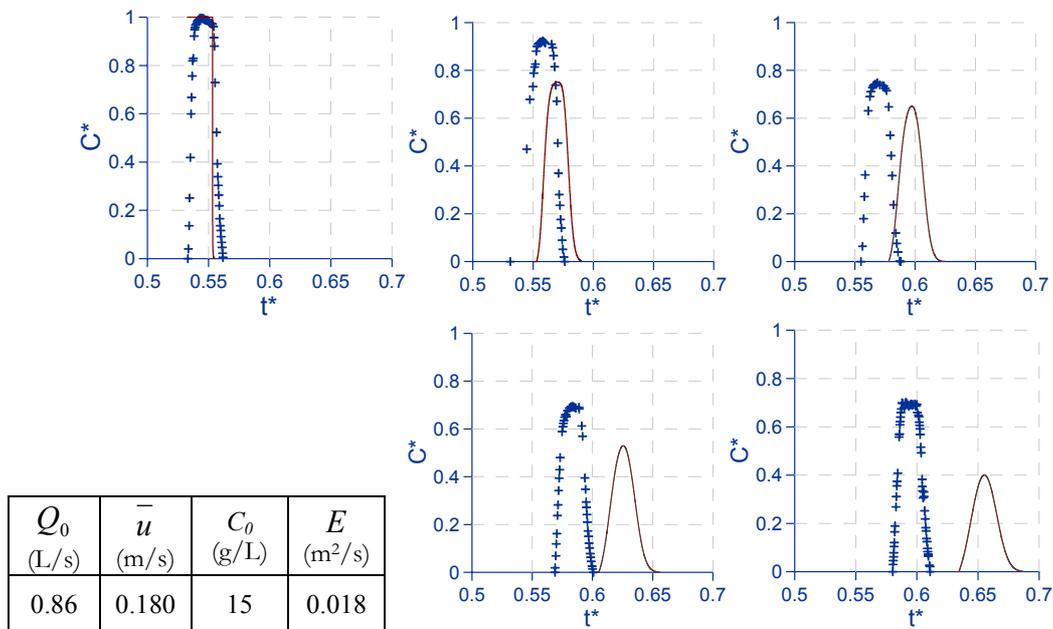


Figura 4.1. Ensayo 1 (primer riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental + y — calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente

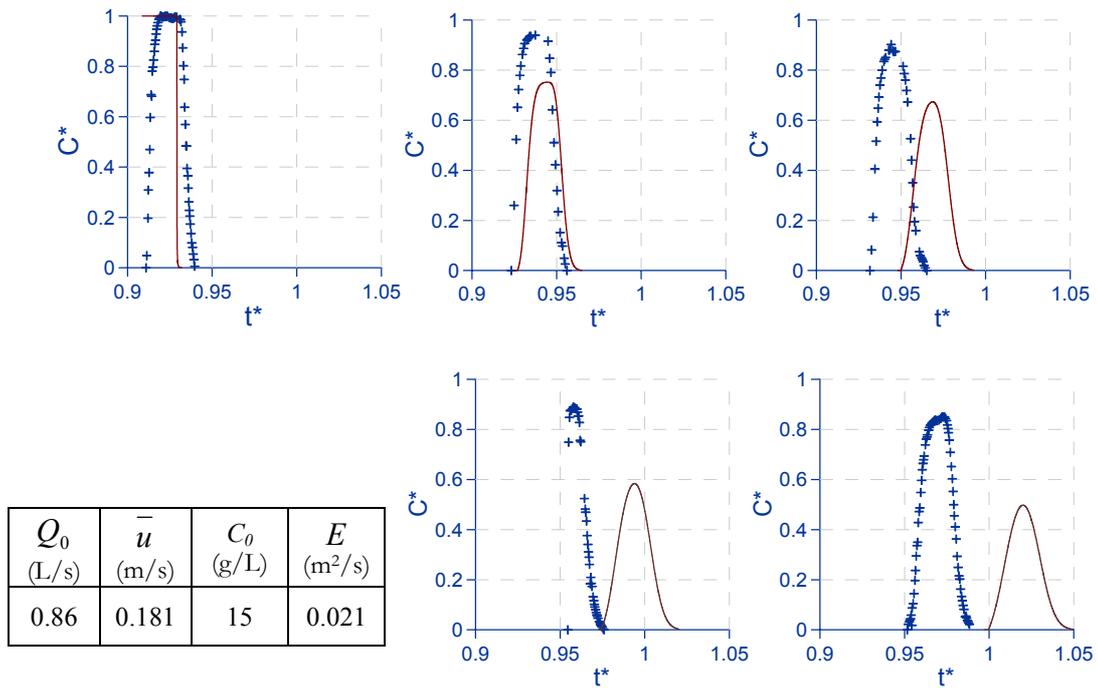


Figura 4.2. Ensayo 1 (primer riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental + y — calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

La distribución de soluto en el espacio se produce en términos generales de forma adecuada, esto es, la amplitud de las curvas experimentales y calculadas se mantiene. En el ensayo 4, por el contrario las curvas simuladas prácticamente coinciden con las experimentales. Esto puede indicar que en este caso el lecho del surco está más estabilizado, y la función de infiltración es más representativa en este caso de todos los puntos del surco (Abbasi *et al.*, 2003a). Aun así, no hay que olvidar que el proceso se describe en una dimensión está modelando en 1D, por lo que los resultados están sujetos a todas las hipótesis de partida, que en campo a veces pueden reflejar insuficientemente el comportamiento del sistema.

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

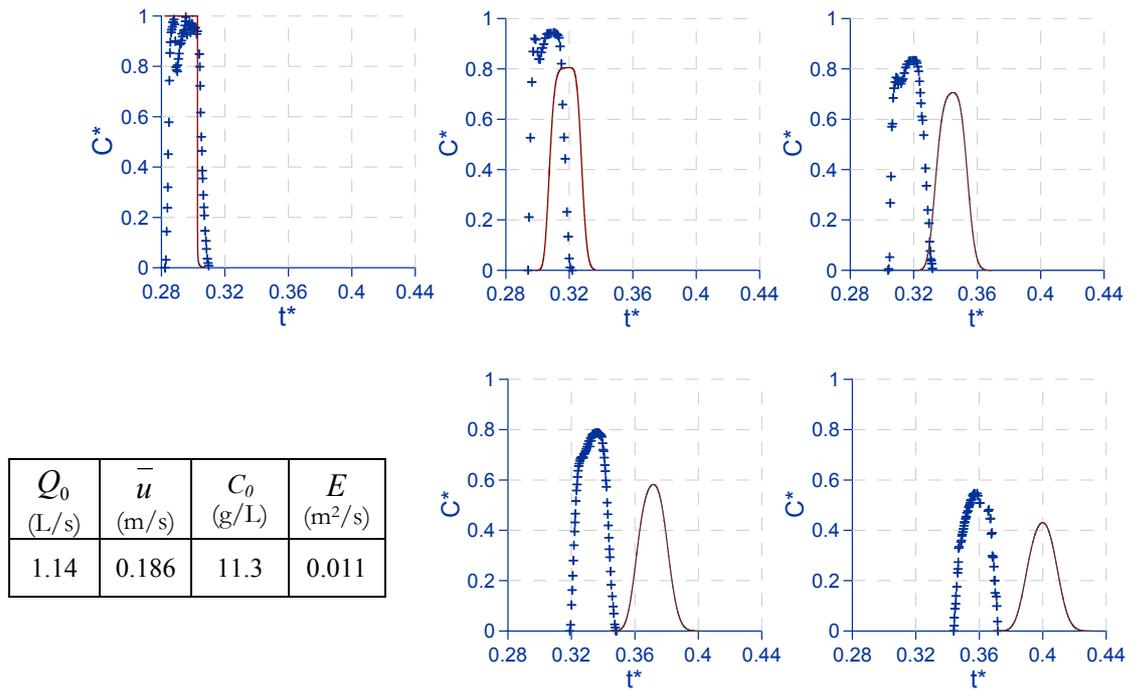


Figura 4.3. Ensayo 2 (primer riego), aplicación 1. Concentración relativa experimental + y — calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

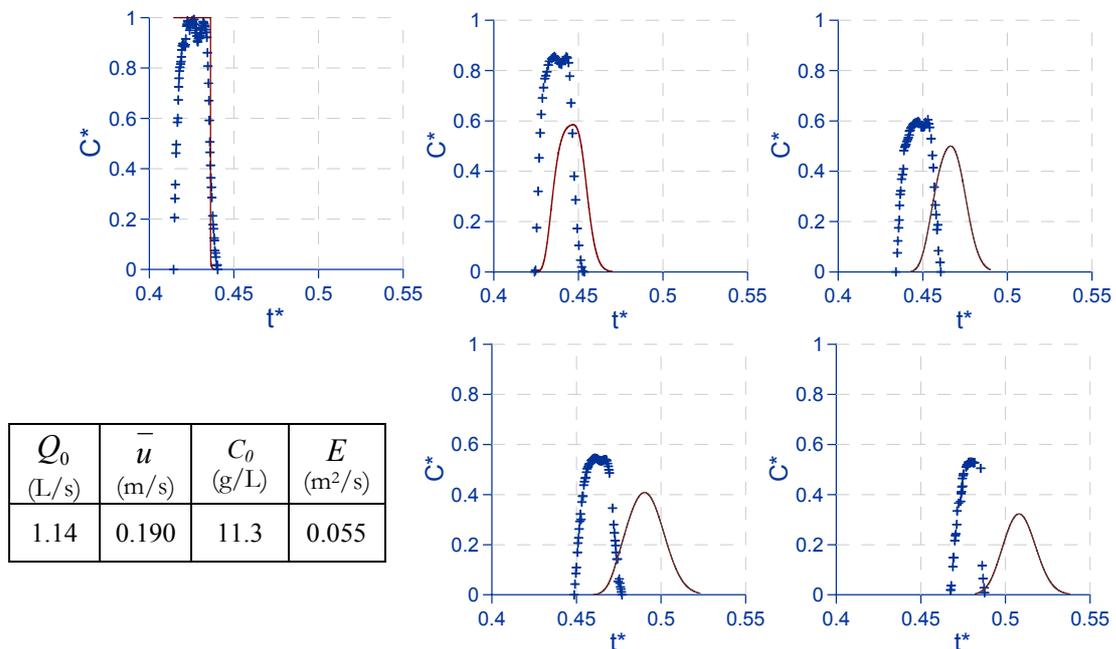


Figura 4.4. Ensayo 2 (primer riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental + y — calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

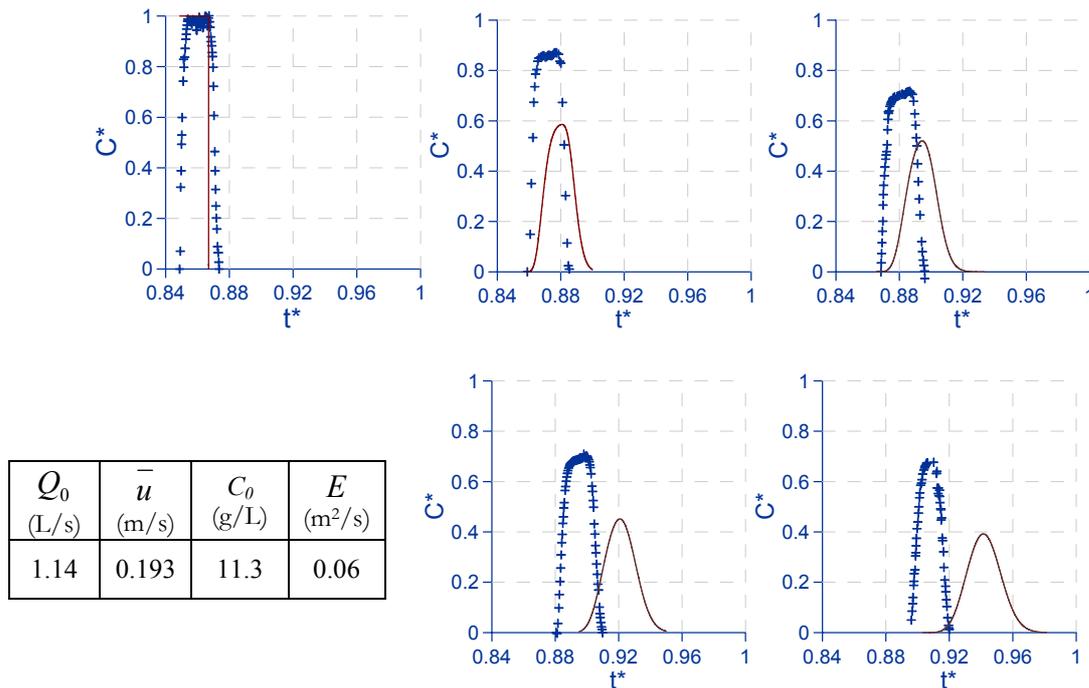


Figura 4.5. Ensayo 2 (primer riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental + y — calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

A continuación se presentan las figuras con los resultados de la calibración de los ensayos correspondientes al segundo riego. Se puede observar que el diferente estado inicial del suelo se refleja en el valor de la velocidad media del flujo de agua durante el transporte del soluto con respecto a los ensayos realizados en primer riego, que pasa de 0.18 – 0.19 a 0.24 – 0.29.

Los valores obtenidos del coeficiente de dispersión longitudinal, muestran el efecto del orden de riego en el que se realiza cada aplicación, pudiendo diferenciarse dos grupos de resultados: los correspondientes a riego 1 y a riego 2, como se había planteado al inicio del trabajo. Si se comparan los ensayos correspondientes a primer y segundo riego realizados en el mismo grupo de surcos, es decir, comparando el ensayo 1 con el 3 y el ensayo 2 con el 4, se ve que los mayores valores del coeficiente de dispersión corresponden al primer riego. Esto puede explicarse por un mayor grado de turbulencia del flujo en estos casos, ya que los ensayos de segundo riego parten de un lecho más consolidado, con menor aspereza, que favorece la estabilización del flujo de agua.

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

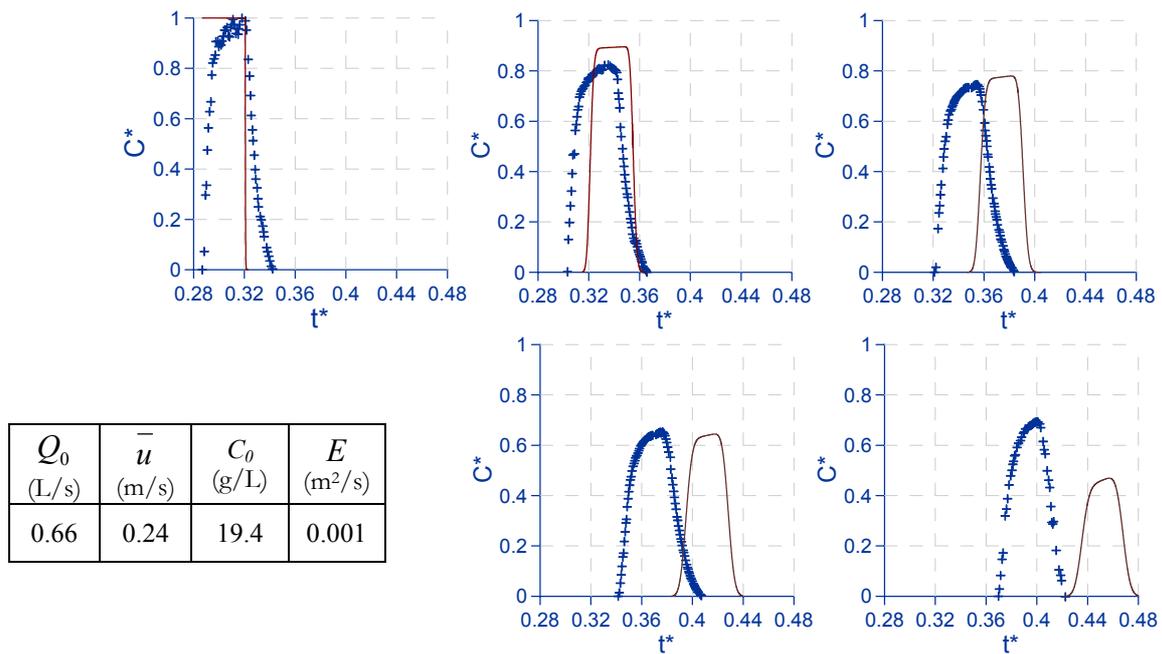


Figura 4.6. Ensayo 3 (segundo riego), aplicación 1. Concentración relativa experimental + γ - calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

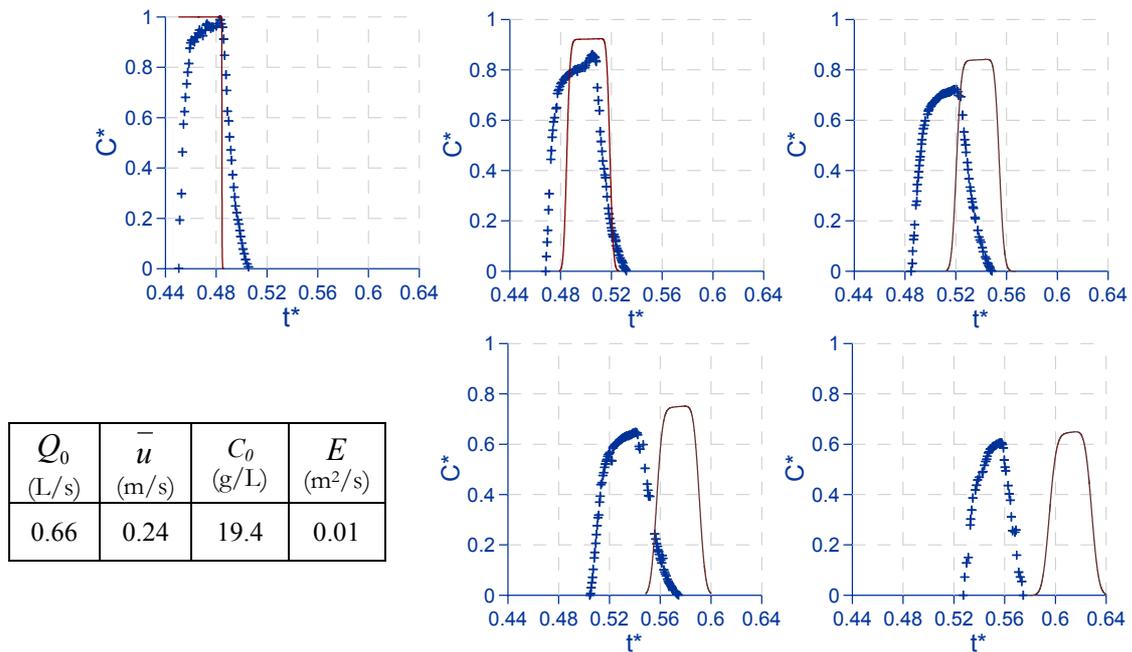


Figura 4.7. Ensayo 3 (segundo riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental + γ - calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

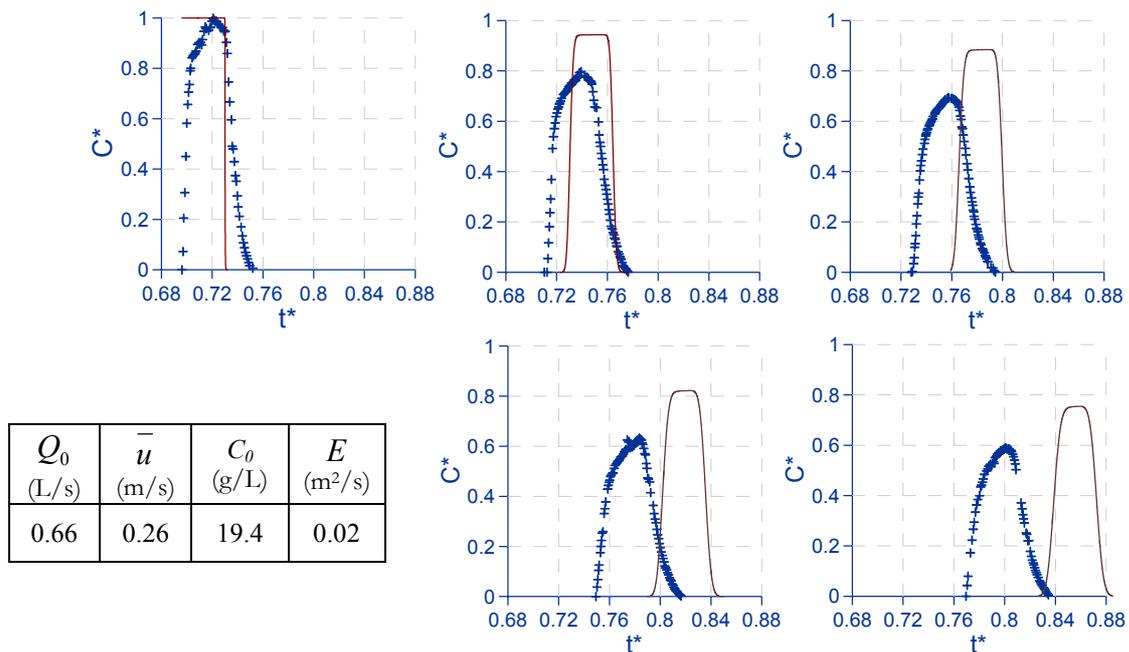


Figura 4.8. Ensayo 3 (segundo riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental + y — calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

Se puede observar en las aplicaciones de los ensayos 1 a 3 cómo las curvas calculadas se van desfasando con respecto a las experimentales, tardando más tiempo en llegar al final del surco. Este desfase es más acusado en las últimas estaciones de medida. El ensayo 1 presenta un desfase de 10 minutos en la última estación de las dos aplicaciones. Este hecho que ha sido observado en casos de simulaciones 1-D similares (Playán y Faci, 1997b; Zapata *et al.*, 2005) se puede deber a la gran variabilidad espacial de la infiltración en el surco, que no se tiene en cuenta en el modelo, ya que se usa una ecuación única de infiltración para todo el surco. Por tanto, la mayor discordancia entre los valores simulados y observados se produce en la velocidad de desplazamiento del frente de soluto.

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

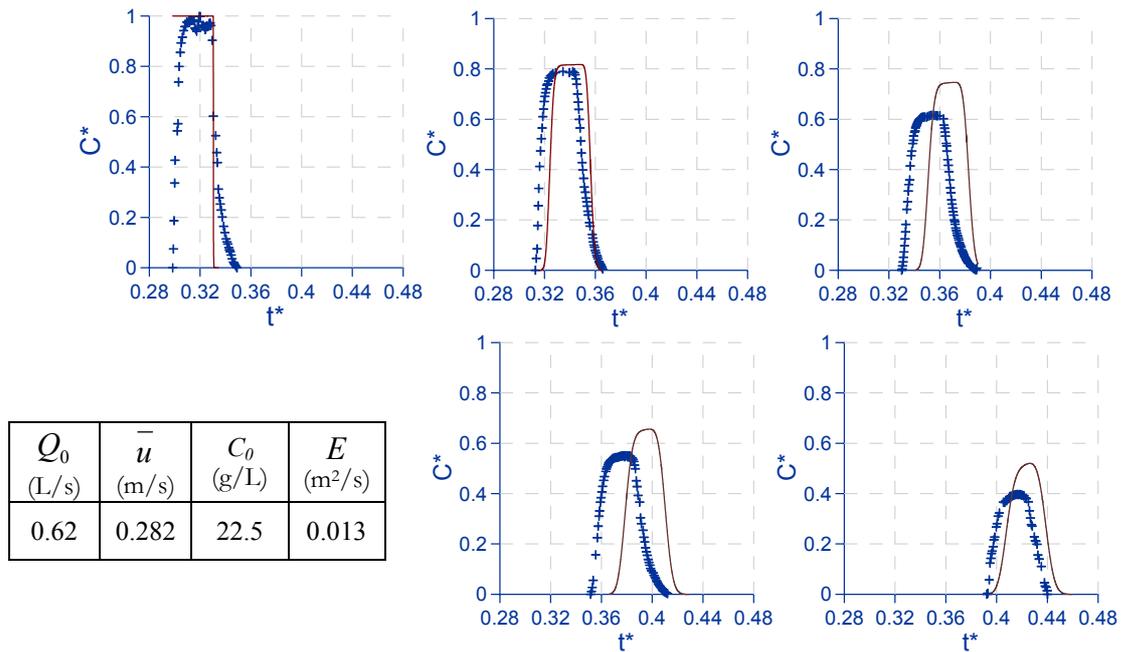


Figura 4.9. Ensayo 4 (segundo riego), aplicación 1. Concentración relativa experimental + y - calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

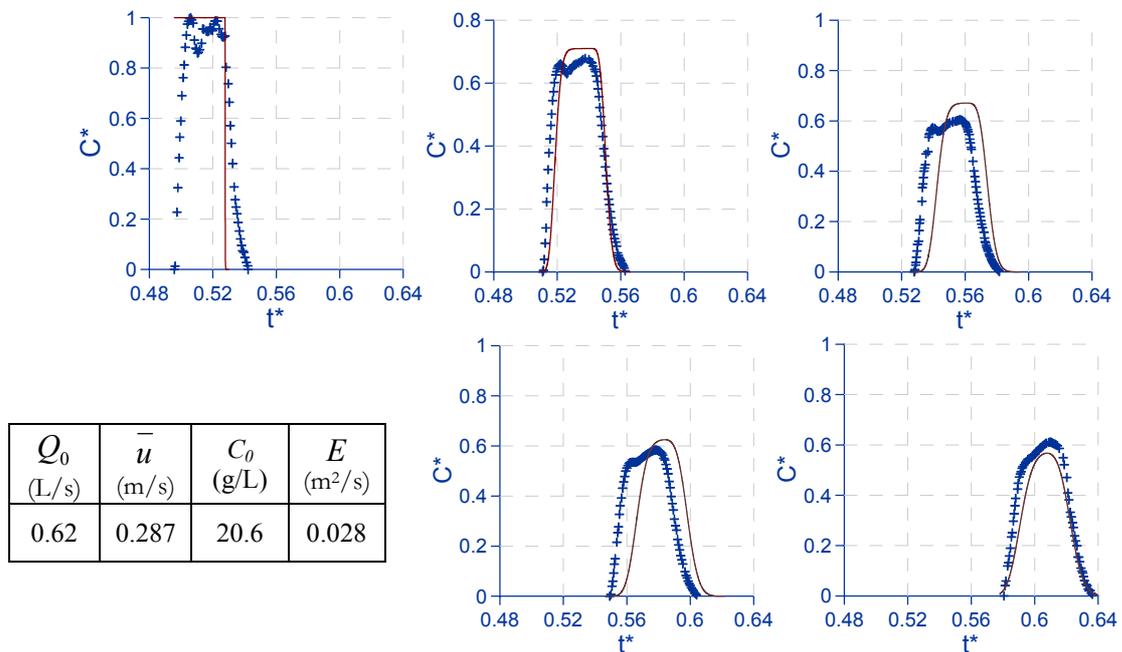


Figura 4.10. Ensayo 4 (segundo riego), aplicación 2. Concentración relativa experimental + y - calculada y características de la aplicación en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

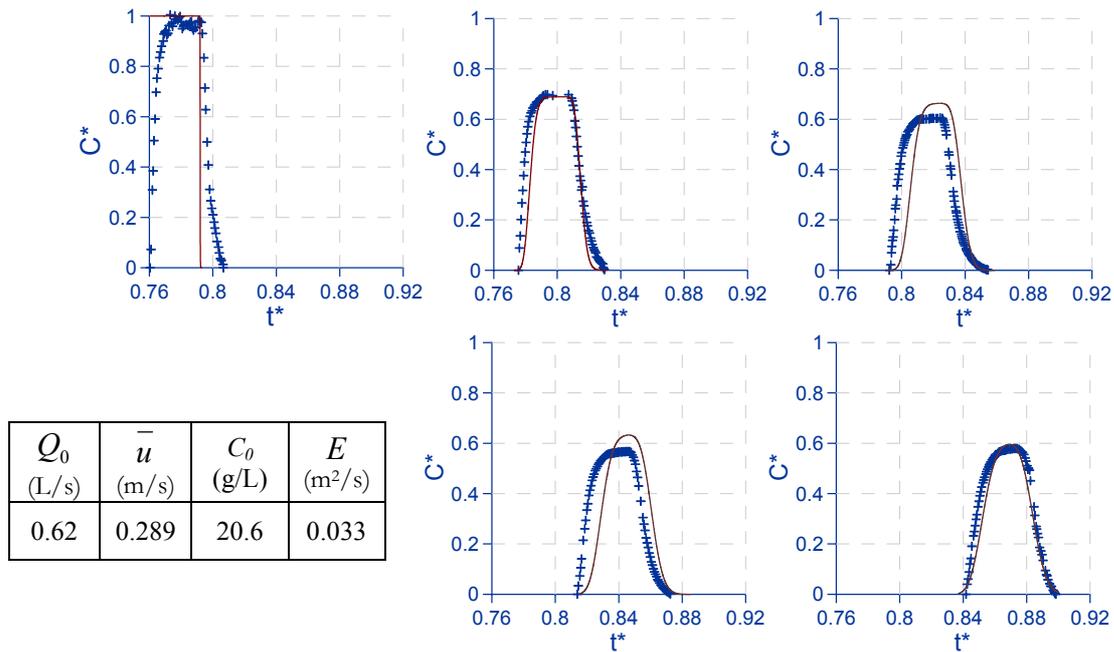


Figura 4.11. Ensayo 4 (segundo riego), aplicación 3. Concentración relativa experimental + \times calculada y características de la calibración en la tabla asociada. Estaciones 1 a 5, respectivamente.

La evolución de E en las distintas aplicaciones de un mismo ensayo muestra cómo aumenta su valor conforme lo hace la velocidad media del flujo, incluso para pequeñas variaciones de ésta, sobre todo, si se compara la primera aplicación con la última. Esto demuestra cómo el valor que se adopte de E influye considerablemente en los resultados de la distribución final de solutos. Por lo tanto, es importante poder estimar el valor de este coeficiente con precisión para poder simular el proceso de forma fiable en casos en los que no se disponga de datos experimentales. En la tabla 4.1 se recogen los valores del coeficiente de dispersión calculados en la calibración del modelo para cada aplicación.

Tabla 4.1. Valores del coeficiente de dispersión longitudinal.

<i>Ensayo</i>	<i>E (m² s⁻¹)</i>		
	<i>Ap. 1</i>	<i>Ap. 2</i>	<i>Ap. 3</i>
1		0.018	0.021
2	0.011	0.055	0.060
3	0.001	0.010	0.020
4	0.013	0.028	0.033

Como se ha comentado previamente, el valor de este coeficiente varía en función de las condiciones del flujo; los resultados obtenidos en la calibración del modelo de transporte con los datos de campo ponen de manifiesto la influencia de este coeficiente en el resultado final de cualquier simulación para unas características de flujo concretas.

En riego por surcos, en el que el flujo es gradualmente variado, el momento de aplicación de fertilizante es crucial para obtener los mejores resultados, y para simular los efectos de este momento con el modelo explicado, es necesario tener bien acotado el valor del coeficiente de dispersión longitudinal. Es interesante por tanto, relacionar este coeficiente con las características del flujo de agua y poder estimar de forma adecuada su valor para introducirlo en el modelo de simulación bajo condiciones no ensayadas. El obtener una función que relacione el valor de E con las características del flujo no es sencillo, debido a la necesidad de gran número de datos experimentales.

4.1.1. Distribución vertical de solutos en el suelo

Otro aspecto a tener en cuenta en los resultados del fertirriego es la profundidad a la que quedaría el fertilizante una vez finalizado el riego, ya que si se aplica al principio del riego, y éste es muy largo, los nutrientes quedan fuera de la zona radical e incluso pueden perderse por infiltración profunda, pudiendo llegar a los acuíferos, y por supuesto el cultivo no captaría nutriente alguno, por lo que este efecto habría que considerarlo en el resultado final del rendimiento de aplicación. Una programación adecuada debe tener en cuenta el estado fenológico del cultivo, y poder estimar la profundidad de las raíces, muy variable según la especie cultivada.

En las figuras 4.12 a 4.15 se ha representado la distribución vertical de la concentración de soluto, normalizada con respecto a la concentración inicial C_0 , calculada en cada uno de los ensayos; como era de esperar, se puede observar que las franjas de soluto más superficiales corresponden a las últimas aplicaciones. La profundidad a la que se presenta el soluto en estas figuras no es la que se alcanzaría en la realidad, ya que falta incluir la lámina de agua que se infiltra durante la fase de receso y que aquí no se ha tenido

en cuenta, por lo que la profundidad que alcanzaría el soluto en el suelo sería un poco mayor.

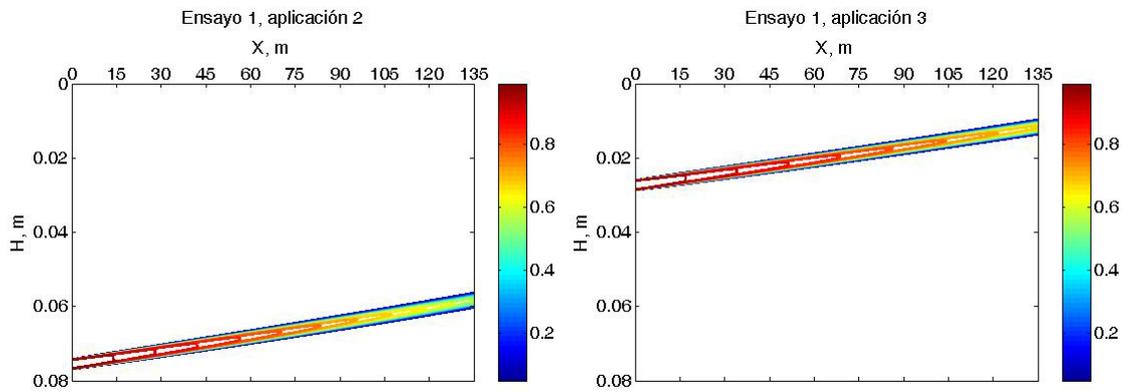


Figura 4.12. Distribución vertical del soluto en el suelo en el primer ensayo.

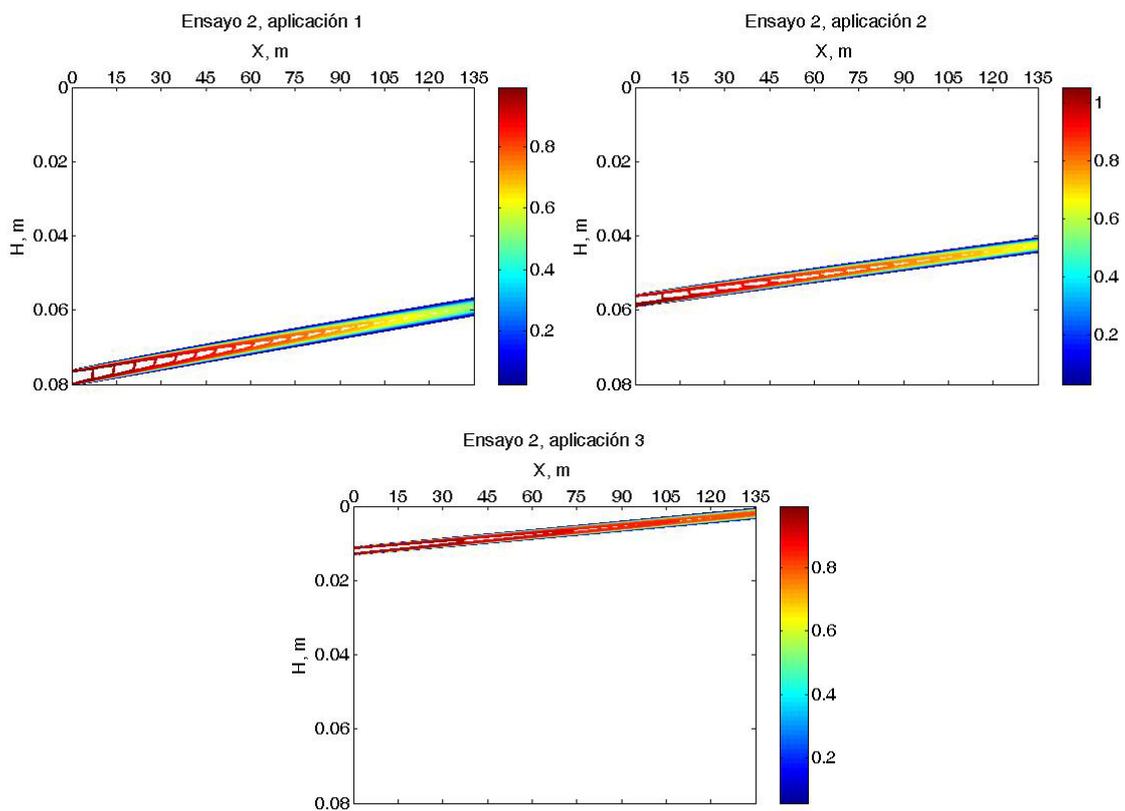


Figura 4.13. Distribución vertical del soluto en el suelo en el segundo ensayo.

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

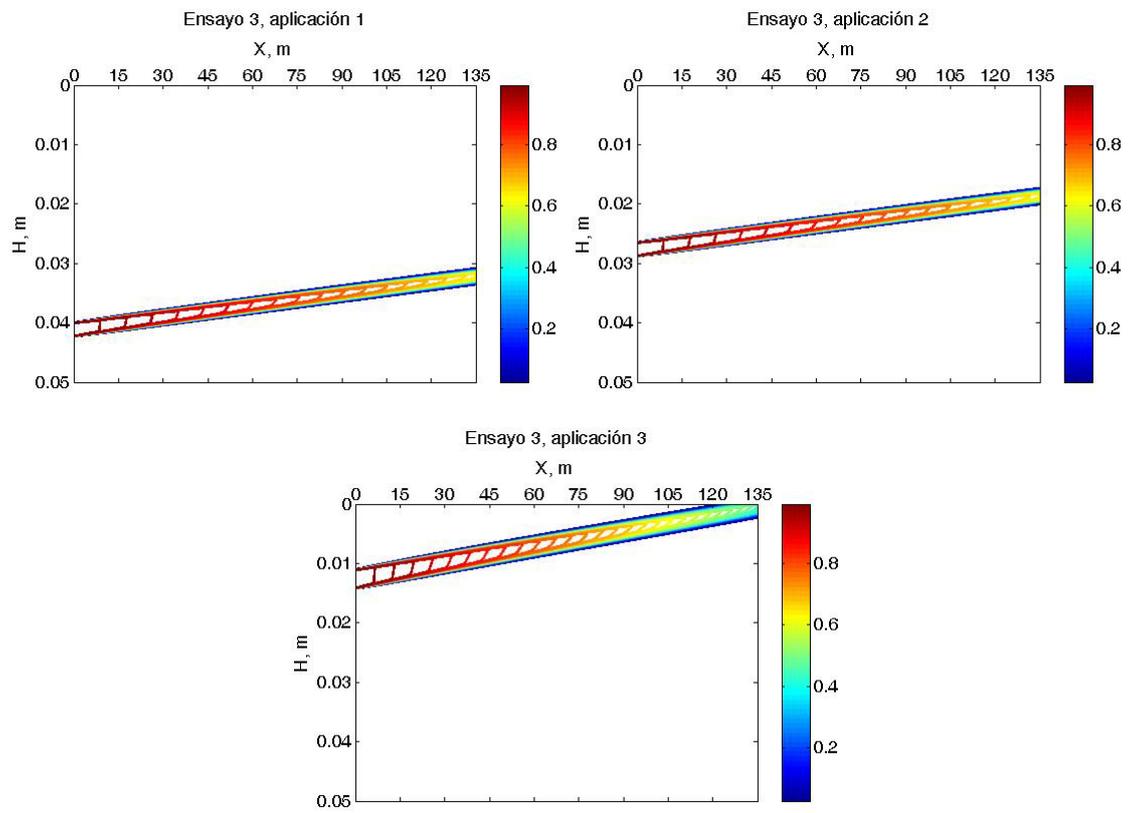


Figura 4.14. Distribución vertical del soluto en el suelo en el tercer ensayo.

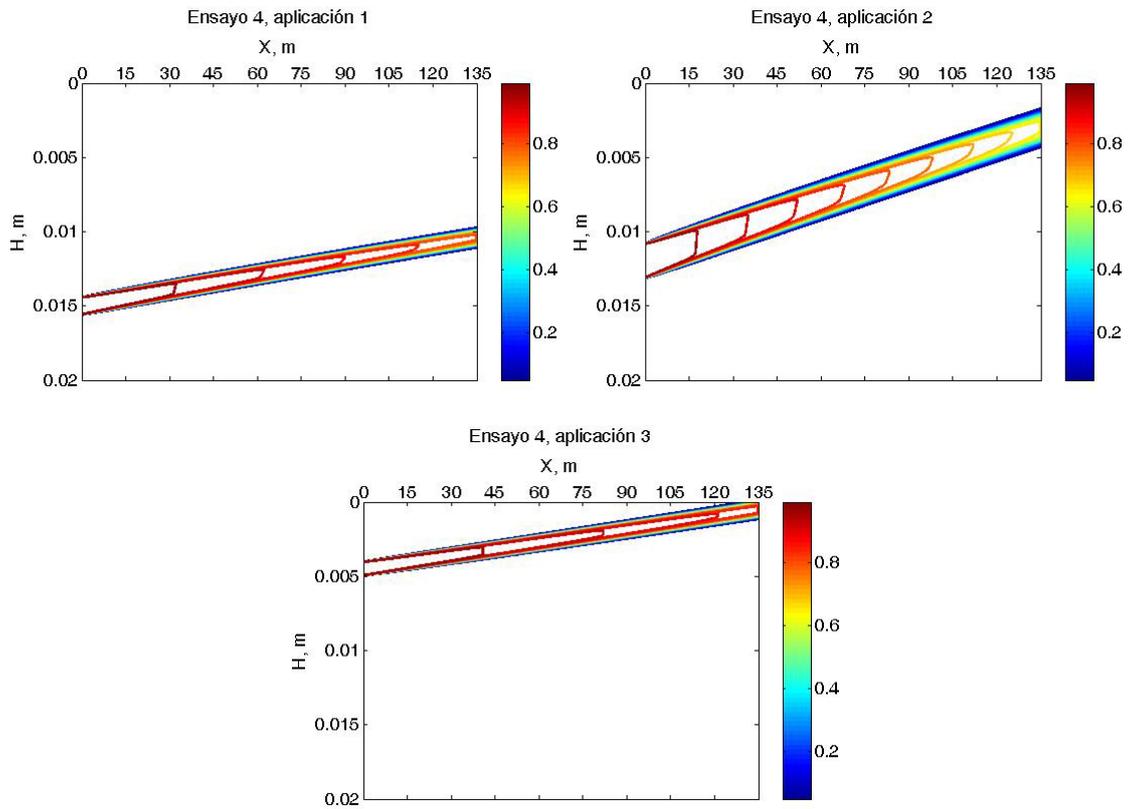


Figura 4.15. Distribución vertical del soluto en el suelo en el cuarto ensayo.

El momento en que se inicie la aplicación de fertilizante en cabecera, es una variable importante a tener en cuenta en la programación de la fertirrigación, ya que, como se ha ido comentando a lo largo de este trabajo, influye en el tipo de transporte superficial, debido a las condiciones del flujo de agua (superficial y subsuperficial) que condicionan a su vez los resultados obtenidos de rendimiento de aplicación y uniformidad de distribución, además de situar en el perfil del suelo la franja de soluto a diferente profundidad. Para realizar una buena operación de fertirrigación en un cultivo concreto hay que tener en cuenta los tres resultados.

4.2. Relación del coeficiente de dispersión longitudinal con las variables de operación del fertirriego

En el apartado anterior se puso de manifiesto la importancia del efecto del coeficiente de dispersión longitudinal en el transporte de solutos. En los resultados de la calibración se apreció una tendencia clara (tabla 4.1) de aumento de su valor efectivo para aplicaciones efectuadas cuando el régimen se hace permanente. Esta tendencia es, a su vez, mayor en los ensayos correspondientes al primer riego con respecto a los del segundo riego en el mismo grupo de surcos (ver figura 4.16), por lo que su variación no depende exclusivamente de variaciones en el patrón de velocidad en el flujo superficial de agua. Obtener una relación de este coeficiente en función del tiempo y el espacio sería lo deseable, pero para ello se necesitaría gran número de medidas de distintas variables, lo que dificulta la puesta en práctica de ensayos dirigidos con este fin.

Abbasi *et al.* (2003b) y Zerihun *et al.* (2005a, b) proponen el uso de la expresión de Elder (1959) que permite incluir la variabilidad espacial y temporal de la velocidad superficial del agua, ajustando en el modelo de transporte un parámetro adimensional y la dispersividad longitudinal en dicha ecuación en lugar de un valor efectivo del coeficiente de dispersión, aunque García-Navarro *et al.* (2000) comprobaron en su trabajo que esta ecuación proporciona valores bajos de E . La expresión sugerida por Rutherford (1994), al igual que las propuestas por Fischer (1966, 1968a, 1968b en Fischer *et al.*, 1979) y otras similares (Sayre *et al.*, 1968; Sayre *et al.*, 1973 en Fischer *et al.*, 1979), son relaciones empíricas obtenidas a partir de medidas en laboratorio o en cauces para diferentes regímenes hidráulicos, y permiten una primera aproximación si no se dispone de datos experimentales con los que efectuar una calibración específica.

4.2.1. Obtención de una función paramétrica que relacione el coeficiente de dispersión con las variables de operación del fertirriego.

García-Navarro *et al.* (2000) y Abbasi *et al.* (2003b) concluyeron que, a pesar de las diferencias encontradas en el valor efectivo del coeficiente de dispersión, para diferentes momentos de aplicación del fertilizante, para unas condiciones dadas de aplicación del agua de riego en una misma parcela puede adoptarse un valor constante del parámetro para diferentes operaciones de fertirriego, el correspondiente a aplicaciones de condiciones de flujo permanente de agua. Los resultados obtenidos en los ensayos presentados en este trabajo apoyan esta conclusión, pues las mayores diferencias se obtienen para aplicaciones tempranas de trazador, en condiciones transitorias del flujo de agua, cuya uniformidad de distribución no es aceptable y, por tanto, que no se llevarían a cabo en un manejo adecuado del fertirriego.

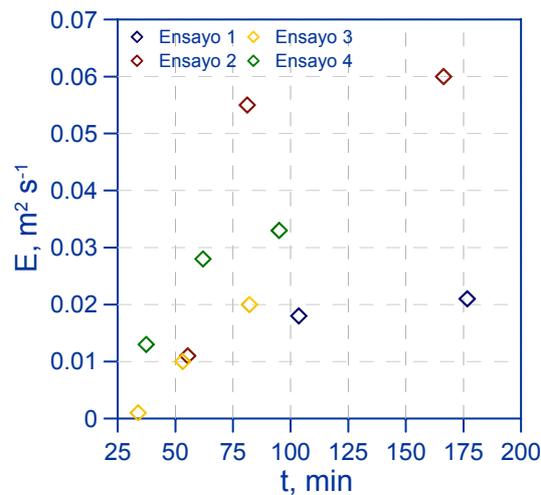


Figura 4.16. Valores de E calibrados frente al tiempo de aplicación. Ensayos 1 y 3, primer y segundo riego en el primer grupo de surcos; ensayos 2 y 4, primer y segundo riego en el segundo grupo de surcos.

Con el fin de realizar un abanico amplio de simulaciones que permitan generar curvas de operación del fertirriego por surcos, parece oportuno usar los resultados obtenidos a partir de los ensayos para obtener una relación del coeficiente de dispersión con las variables de operación del fertirriego, y poder así efectuar los cálculos del modelo de transporte de agua y solutos con mayor confianza. Se adopta un valor del coeficiente de

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

dispersión uniforme y constante durante el proceso de transporte en el surco, para cada caso simulado.

En la figura 4.16 es difícil apreciar la relación de E con el orden de riego, debido a que el avance de agua en cada caso se produce a tiempos diferentes, las condiciones de infiltración varían de unos ensayos a otros, y las aplicaciones realizadas en cada ensayo se sucedieron para posiciones dadas del frente de avance en el surco. La velocidad del flujo superficial de agua en el surco depende, para un caudal dado en cabecera y unas condiciones concretas de suelo, de la distancia y el tiempo en que se evalúe. El valor medio en el surco, una vez alcanzado flujo permanente, depende de la relación entre el caudal en cabecera y la velocidad de infiltración estabilizada. Con el fin de obtener una expresión que integre estas relaciones y que permita un uso más generalizado, se ha buscado una representación adimensional de la figura 4.16, que permita comparar con mayor claridad los resultados y extraer conclusiones más acotadas.

Se probaron diferentes monomios que relacionen el coeficiente de dispersión y el tiempo de aplicación del fertilizante expresados sin dimensiones E^* y T^* . Los mejores resultados se obtuvieron con el caudal de entrada (Q_0), la velocidad de infiltración estabilizada (f_0), el tiempo que tarda el flujo de agua en alcanzar el régimen permanente ($t_{permanente}$), el tiempo durante el que se aplica fertilizante ($t_{duración}$) y el tiempo que tarda el flujo en alcanzar el final del surco (t_{avance}) como valores característicos de la relación anterior.

$$E^* = \frac{E \cdot t_{avance} \cdot t_{duración} \cdot f_0}{Q_0 \cdot t_{permanente}} \quad (4.1)$$

$$T^* = \frac{t_{aplicación}}{t_{permanente}} \quad (4.2)$$

Se ha adoptado como valor de $t_{permanente}$ el tiempo transcurrido desde el comienzo del riego hasta que la velocidad media del flujo en el surco es el 95% de la velocidad media del flujo en el surco en régimen permanente. Este momento coincide con el tiempo en el que

se produce el cambio de pendiente en las curvas representadas en la figura 4.17, en donde se muestra la evolución temporal de la velocidad media del flujo de agua en el surco, en la que se puede apreciar con claridad el paso de régimen transitorio a permanente.

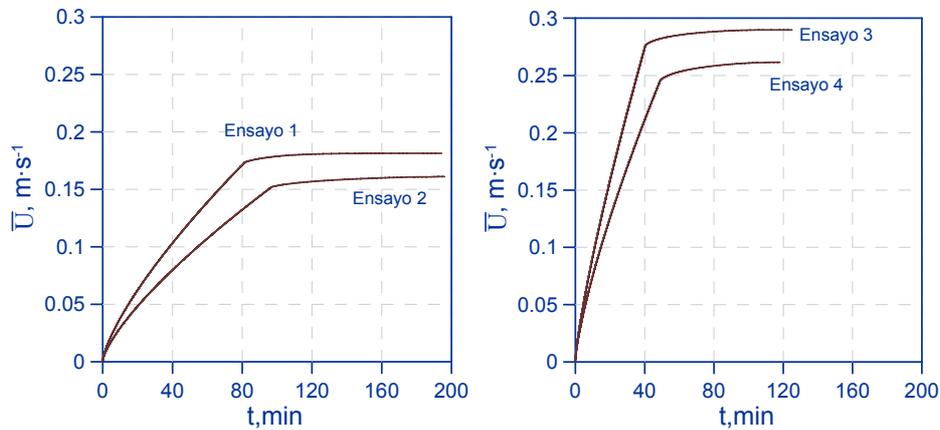


Figura 4.17. Evolución temporal a lo largo del riego de la velocidad media superficial del agua en el surco para los ensayos 1 y 2 (primer riego), y 3 y 4 (segundo riego).

La figura 4.18 muestra los valores del coeficiente de dispersión y tiempo de aplicación adimensionales. Se ha ajustado una función sigmoideal expresada por la ecuación 4.3.

$$E^* = \frac{a_1}{a_2 + e^{(-a_3 \cdot (T^* - a_4))}} \quad (4.3)$$

Los parámetros a_1 , a_2 , a_3 y a_4 se estimaron mediante iteración lineal por el algoritmo de Rosenbrock. Los valores de los parámetros ajustados se presentan en la tabla 4.2, con un valor de R^2 y proporción de varianza explicada de 0.83 y 0.7, respectivamente.

Tabla 4.2. Coeficientes ajustados de la ecuación 4.3.

a_1	a_2	a_3	a_4
0.13	2.25	3.12	1.22

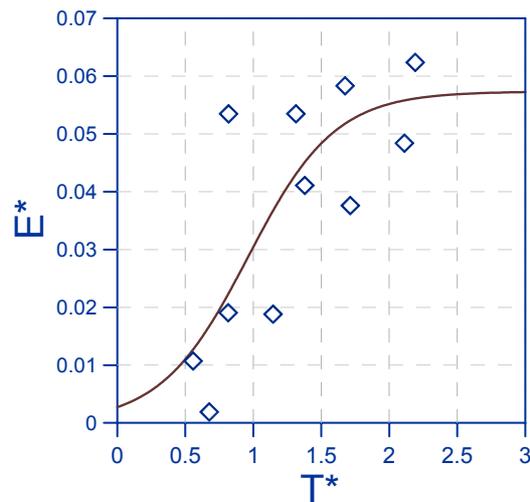


Figura 4.18. Función paramétrica adimensional que relaciona el coeficiente de dispersión longitudinal efectivo en un riego con el tiempo de aplicación del fertilizante.

Ciertamente no hay que olvidar que los datos experimentales provienen de ensayos de campo en los que las características del suelo, en particular, su mayor o menor proximidad a la hipótesis admitida de uniformidad, y que un modelo 2D del movimiento de agua y solutos en el flujo superficial permitiría una representación espaciotemporal más ajustada del proceso real. No obstante, la relación obtenida permite escoger diferentes valores de E en función del momento de aplicación del fertilizante y la duración de la aplicación que se adopte, que incide en cómo es el régimen dominante en el surco durante el transporte de esta sustancia, lo cual hace que mejore el resultado del modelo en comparación con el obtenido cuando se adopta un valor de E constante para un caudal en cabecera y suelo dados, el correspondiente a régimen permanente, cualquiera que sea el momento de aplicación del fertilizante. Las diferencias encontradas son más acusadas cuando las aplicaciones simuladas se efectúan al principio del riego.

4.2.2. Validación

Se ha considerado necesario validar la función paramétrica adimensional (E^*-T^*) dada por la ecuación 4.3 y los valores de la tabla 4.1. Para ello se han usado datos de unos ensayos previos realizados en la misma parcela durante el verano de 2002 no usados para la

calibración del modelo de transporte de agua y solutos. El diseño experimental fue el mismo que el aplicado en los ensayos de 2003, presentados en el capítulo anterior, con excepción del número de estaciones de medida de la CE a lo largo del surco, que fueron 4 en lugar de 5. En los ensayos de 2002 no se registró la evolución temporal de soluto en la estación situada en cabecera del surco, como se hizo en los ensayos de 2003.

Los ensayos empleados en la validación han sido dos, denominados 0.1 y 0.2 en este apartado, correspondiendo ambos a primer riego, por lo que se realizaron en grupos de surcos diferentes, y con dos aplicaciones de trazador en cada caso. En la tabla 4.3 se recogen sus características. Observando el tiempo de avance del agua, se puede concluir que la variabilidad espacial del suelo es muy grande en la parcela, por lo que aunque en los dos ensayos el caudal de entrada sea el mismo, las características del flujo serán muy diferentes.

Tabla 4.3. Características de los ensayos utilizados en la validación de la función E^*T^*

<i>Ensayo</i>	<i>Orden de riego</i>	Q_0 (L/s)	t_{avance} (min)	$t_{inicio\ aplicación\ trazador}\ (min)$	
				<i>Ap. 1</i>	<i>Ap. 2</i>
0.1	1	0.97	118.5	95.3 *	156
0.2	1	0.97	56	48.7	68

* BrK como trazador; NO₃K en el resto.

4.2.2.1. Calibración del flujo de agua

Procediendo tal y como se explicó en el capítulo 3 con los ensayos de fertirriego, el modelo de flujo de agua se ha calibrado utilizando los parámetros de la ecuación de infiltración y el coeficiente de aspereza de Manning. Los resultados se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Parámetros ajustados de la ecuación de infiltración.

<i>Ensayo</i>	$k\ (m\ s^{-a})$	a	$f_0\ (m\ s^{-1})$	$n\ (S.I.)$
0.1	0.025	0.300	$3.00\ 10^{-5}$	0.04
0.2	0.021	0.255	$1.30\ 10^{-5}$	0.04

El criterio de calibración adoptado fue el mismo que en los casos anteriores, a partir de las curvas de avance y el hidrograma de salida, que se muestran en la figura 4.19.

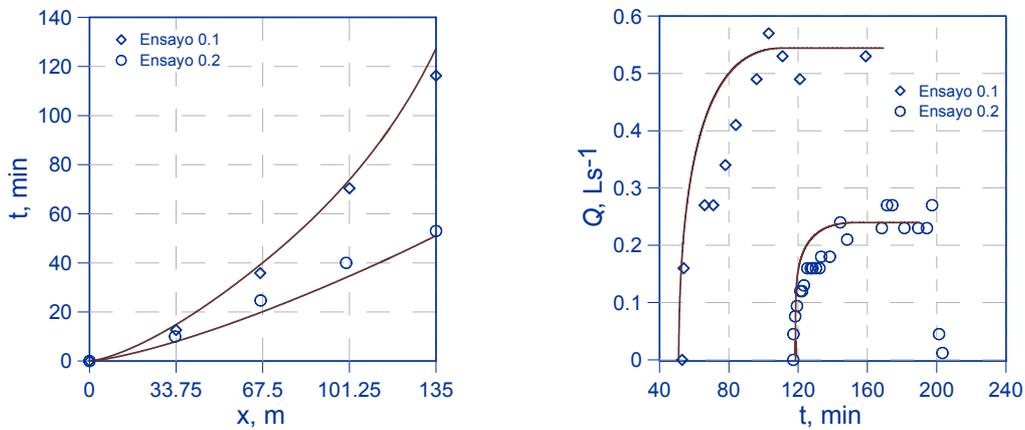


Figura 4.19. Tiempos de avance e hidrogramas de escorrentía, experimentales y calculados.

En la tabla 4.5 se presentan los valores de los errores calculados con los tiempos de avance. Se presenta también el error del balance de masa que proporciona el modelo, estando los valores obtenidos en un orden de magnitud aceptable.

Tabla 4.5. Errores en la calibración de los ensayos de agua.

<i>Ensayo</i>	<i>Error relativo</i>	<i>Error balance de masa (%)</i>
0.1	0.10	0.1
0.2	0.05	0.0

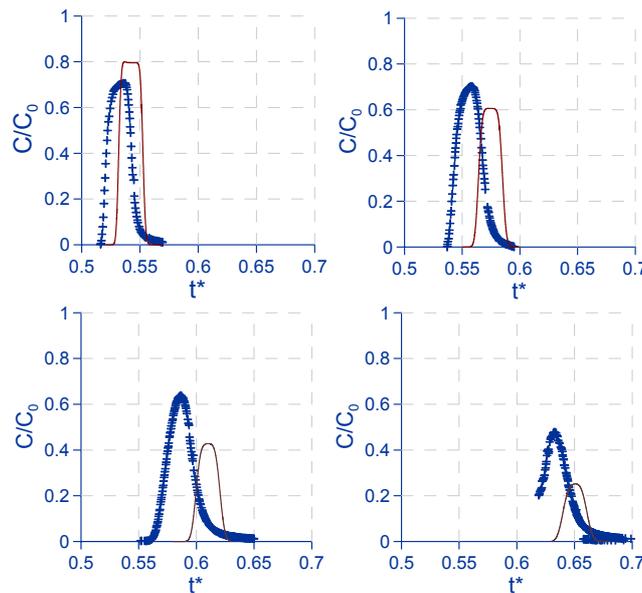
4.2.2.2. Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal y validación de la función E^*-T^* .

Una vez caracterizado el flujo, se puede estimar el valor del coeficiente de dispersión longitudinal a adoptar en la simulación de ambos ensayos utilizando la ecuación 4.3. Para ello, sólo se necesita calcular T^* a partir del valor del tiempo de inicio de condiciones permanentes del flujo de agua, $t_{permanente}$, en cada caso, una vez calibrado el modelo de circulación de agua. La tabla 4.6 recoge estos valores junto con el consiguiente valor calculado para E^* utilizando la ecuación 4.3, y su correspondiente valor de E .

Tabla 4.6. Valores estimados del coeficiente de dispersión longitudinal.

<i>Ensayo</i>	<i>Aplicación</i>	T^*	E^*	E (m ² s ⁻¹)
0.1	1	0.656	$1.35 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
	2	1.070	$2.85 \cdot 10^{-2}$	$5.3 \cdot 10^{-2}$
0.2	1	0.454	$0.97 \cdot 10^{-2}$	$5.8 \cdot 10^{-3}$
	2	1.080	$1.52 \cdot 10^{-2}$	$9.0 \cdot 10^{-2}$

Para comprobar la bondad del valor de E calculado, se ha comparado la evolución temporal de trazador medida en los ensayos para cada estación de medida, y la calculada, usando los parámetros de la tabla 4.6, con el modelo de transporte de agua y solutos utilizado en este trabajo (figuras 4.20 a 4.23), así como los correspondientes resultados de rendimiento de aplicación del trazador experimentales y simulados (tabla 4.7).

**Figura 4.20.** Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.1, aplicación 1.

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

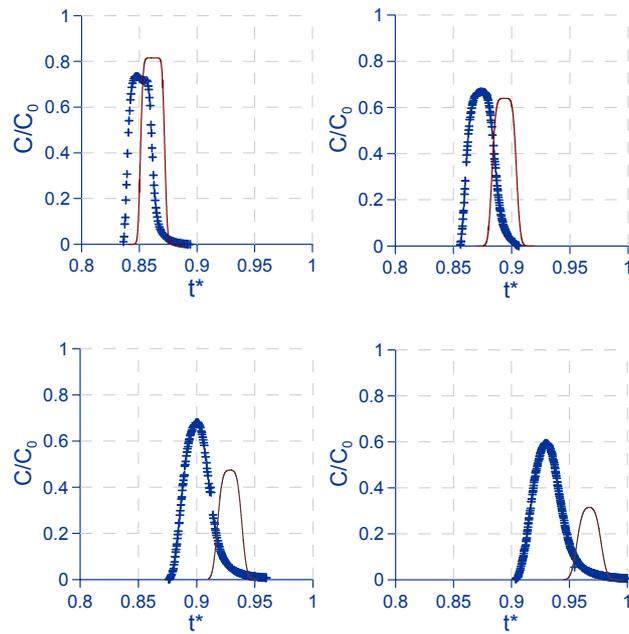


Figura 4.21. Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.1, aplicación 2.

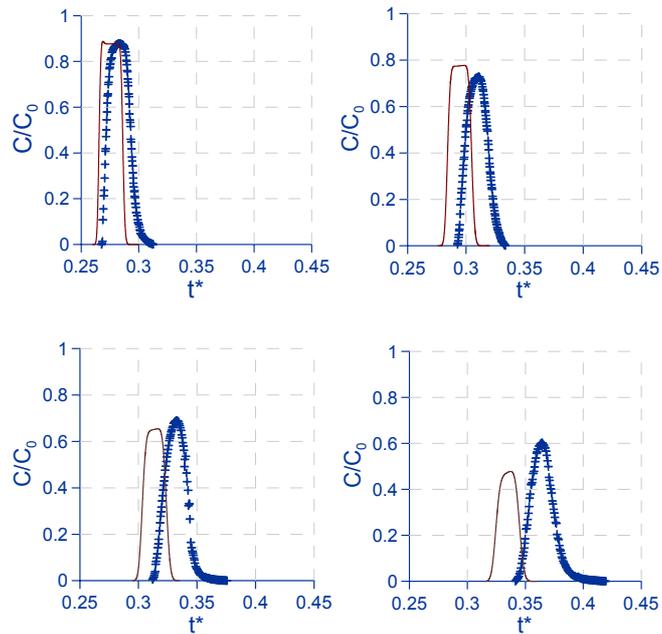


Figura 4.22. Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.2, aplicación 1.

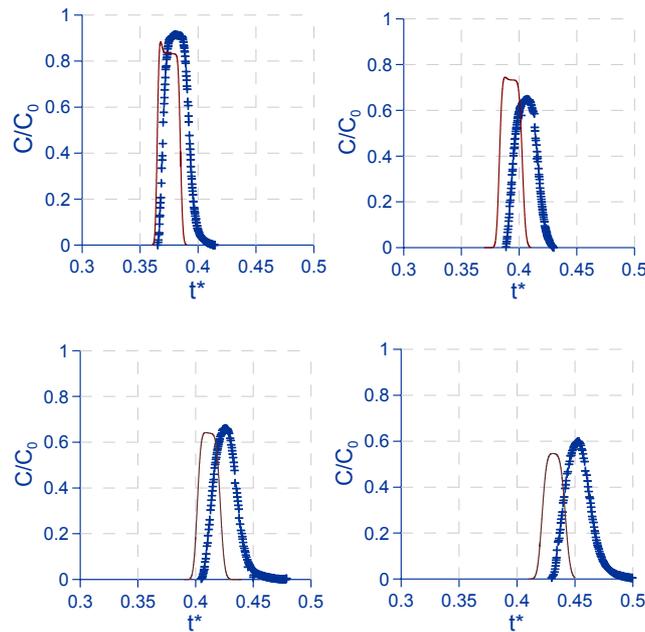


Figura 4.23. Evolución temporal de soluto experimental y calculada. Ensayo 0.2, aplicación 2.

En estos ensayos se observa también el efecto de la variabilidad de la infiltración a lo largo del surco, de ahí el desfase entre las curvas experimentales y calculadas. Las diferencias encontradas son de igual o menor magnitud que para los casos usados en la calibración de la relación E^*-T^* obtenida. Exceptuando las dos últimas curvas de la figura 4.21, la distribución espacial de soluto se reproduce adecuadamente. Se observa que las curvas calculadas correspondientes al ensayo 0.1 se retrasan con respecto a las observadas, sucediendo lo contrario en el ensayo 0.2, en el que las curvas calculadas se adelantan a las observadas, esto se puede deber a que el coeficiente de aspereza de Manning no representa adecuadamente las condiciones de todo el surco, esta ley puede inducir a errores cuando los caudales de entrada son bajos y las fuerzas viscosas relevantes (Zapata *et al.*, 2007).

En la tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos de la función objetivo, rendimiento de aplicación del trazador, experimental y calculado. Se puede observar que los resultados calculados no se alejan de los experimentales, sobre todo los correspondientes al ensayo 0.2. Se puede decir que la estimación del valor de E a partir de la función paramétrica es válida para realizar simulaciones de operaciones de fertirriego con caudales en cabecera y características del suelo diferentes a los utilizados en los ensayos de

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

calibración, y obtener resultados con un grado de aproximación a la realidad semejante a los de estos.

Tabla 4.7. Comparación de los valores de rendimiento de aplicación, experimental y calculado.

<i>Ensayo</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Rendimiento experimental %</i>	<i>Rendimiento calculado %</i>
0.1	1	**88.0	93
	2	78.0	90
0.2	1	75.0	75
	2	66.6	69

** En este ensayo el frente de soluto alcanzó al frente de agua, por lo que cuando el agua llegó a la última estación de medida ya llevaba consigo soluto, por lo que primera medida de concentración en esa estación no es cero, como se puede observar en la figura 4.6; por lo tanto la estimación de la masa que abandona el surco en este caso es de tipo orientativo.

4.3. Simulación de operaciones de fertirriego

Tanto el momento de aplicación de fertilizante como la duración de la misma determinan, para unas condiciones de manejo del agua de riego dadas, la calidad de la fertirrigación. Existe abundante trabajo que permite establecer pautas óptimas de operación de fertirriego en riego en tablares, siendo más escasas las conclusiones referentes a riego en surcos. Así Playán y Faci (1997b) concluyeron que en tablares las aplicaciones de soluto de pequeña duración empeoran en general los resultados de uniformidad alcanzados, aunque si se ha de aplicar fertilizante en pulsos cortos convendrá hacerlo cuando el frente de agua haya recorrido entre el 33% y el 50% de la longitud total. Abbasi *et al.* (2003a) se inclinaban por aplicar el fertilizante de forma continua durante todo el riego en surcos con escorrentía libre, y durante la primera mitad o segunda mitad del riego en surcos bloqueados (sin escorrentía final por cierre de los mismos). De esta forma obtuvieron una uniformidad experimental aceptable, que alcanzaba un 57.8, 32.2 y 83.0 %. En todos estos trabajos el riego estaba confinado, sin escorrentía libre al final de la parcela, por lo que los rendimientos de aplicación eran siempre del 100% (sin tener en cuenta las pérdidas por percolación profunda) y la optimización se basaba únicamente en la uniformidad de distribución final. En el sistema de riego en surcos con escorrentía libre al final del surco analizado en este trabajo, una aplicación continua de fertilizante implicaría rendimientos de aplicación bajos, con elevadas pérdidas aguas abajo del sistema. Su optimización pasa por optimizar ambos criterios, uniformidad y rendimiento, buscando la combinación de variables de la operación del fertirriego más adecuada.

Este apartado presenta las simulaciones de diferentes alternativas de operación del fertirriego, para el manejo del riego empleado en los ensayos de campo descritos en el capítulo 3. Se han escogido las características de los ensayos 2 y 4.

Las variables de operación del fertirriego y su intervalo de variación simulado han sido:

- Orden del riego en que se realiza la aplicación del fertilizante: 1º o 2º

- Inicio de la aplicación del fertilizante: $t_{aplicación}$, comprendido entre 4 y 104 minutos desde el inicio del riego
- Duración del período de aplicación de fertilizante: 2, 4 y 6 minutos

4.3.1. Resultados de las simulaciones

Para cada valor analizado de duración de la aplicación de fertilizante, se han simulado diferentes elecciones del tiempo de inicio de la aplicación, con intervalos de variación de 4 minutos en cada simulación. Se han calculado los casos para las aplicaciones en primer o segundo riego. En los casos de primer riego se ha adoptado un valor del coeficiente de aspereza de Manning de 0.04 y para segundo riego, de 0.017.

El coeficiente de dispersión longitudinal adoptado en cada caso se ha estimado utilizando la ecuación 4.1 propuesta en este trabajo. En las tablas 4.8 y 4.9 se presentan los valores de este coeficiente para distintos tiempos de aplicación de fertilizante, distinguiendo si se hace en primer o segundo riego. Se puede observar que conforme se retrasa el momento de aplicación el valor del coeficiente de dispersión es mayor, y que para un mismo tiempo de aplicación de fertilizante, el valor de E disminuye cuando la aplicación se realiza durante más tiempo, esto es razonable, ya que a medida que se prolonga la aplicación de fertilizante al flujo de agua, el efecto de la dispersión en el transporte disminuye, ya que el gradiente de concentración es menor. Abbasi *et al.* (2003b) observaron en sus resultados que cuando realizaban la aplicación de fertilizante durante todo el tiempo de riego, el transporte se producía de forma advectivo. El valor de este coeficiente es mayor en primer riego.

Tabla 4.8. Valores estimados de E en las simulaciones correspondientes a primer riego

$t_{\text{aplicación}}$ (<i>min</i>)	E ($m^2 s^{-1}$)		
	<i>2 min</i>	<i>4 min</i>	<i>6 min</i>
4	0.0064	0.0031	0.0021
8	0.0072	0.0036	0.0024
12	0.0081	0.0040	0.0027
16	0.0091	0.0045	0.0030
20	0.0102	0.0051	0.0034
24	0.0114	0.0057	0.0038
28	0.0128	0.0064	0.0042
32	0.0143	0.0079	0.0048
36	0.0159	0.0088	0.0053
40	0.0177	0.0099	0.0060
44	0.0197	0.0109	0.0065
48	0.0219	0.0121	0.0073
52	0.0242	0.0134	0.0081
56	0.0267	0.0147	0.0088
60	0.0294	0.0161	0.0098
64	0.0323	0.0176	0.0120
68	0.0353	0.0192	0.0130
72	0.0385	0.0209	0.0140
76	0.0418	0.0226	0.0150
80	0.0453	0.0240	0.0160
84	0.0489	0.0263	0.0170
88	0.0525	0.0281	0.0190
92	0.0562	0.0300	0.0200
96	0.0599	0.0318	0.0210
100	0.0637	0.0337	0.0220
104	0.0673	0.0360	0.0240

Tabla 4.9. Valores estimados de E en las simulaciones correspondientes a segundo riego.

$t_{aplicación}$ (<i>min</i>)	E ($m^2 s^{-1}$)		
	<i>2 min</i>	<i>4 min</i>	<i>6 min</i>
4	0.0045	0.0024	0.0015
8	0.0059	0.0029	0.0020
12	0.0079	0.0039	0.0026
16	0.0104	0.0052	0.0035
20	0.0135	0.0067	0.0045
24	0.0172	0.0085	0.0057
28	0.0215	0.0108	0.0072
32	0.0264	0.0132	0.0088
36	0.0317	0.0159	0.0106
40	0.0372	0.0186	0.0124
44	0.0425	0.0213	0.0142
48	0.0475	0.0238	0.0158
52	0.0520	0.0260	0.0173
56	0.0558	0.0279	0.0186
60	0.0590	0.0295	0.0197

En las tablas 4.10 y 4.11 se presentan los valores obtenidos de Ra y UD en las simulaciones efectuadas para primer y segundo riego, respectivamente. Cuando se retrasa el momento de aplicación, el rendimiento de aplicación disminuye. Lo contrario ocurre cuando se compara la uniformidad de distribución final. Al aumentar la duración de la aplicación, disminuye el rendimiento de aplicación, pero aumenta la uniformidad de distribución. Los dos índices de calidad de la fertirrigación se mueven en sentidos opuestos, cuando uno aumenta disminuye el otro. El resultado óptimo, en general, lo darán las condiciones que maximicen estos índices, salvo en los casos en los que interese uno de ellos de forma prioritaria (por ejemplo, máxima uniformidad de distribución para rendimientos superiores a un umbral dado). Se realizaron simulaciones hasta que los valores del inicio de la aplicación inducían resultados de rendimiento de aplicación del 40% o menores, casos no admisibles en la práctica por criterios económicos y ambientales.

Tabla 4.10. *Ra* y *UD* en las simulaciones correspondientes a primer riego.

<i>t</i> _{aplicación} (min)	<i>Ra</i> %			<i>UD</i> %		
	<i>2 min</i>	<i>4 min</i>	<i>6 min</i>	<i>2 min</i>	<i>4 min</i>	<i>6 min</i>
4	100	100	100	0	0	0
8	100	100	100	0	0	0
12	100	100	100	0	0	0
16	100	100	100	0	0	0
20	100	100	100	0	0	0
24	100	100	100	17.0	17.0	30.0
28	100	100	100	42.0	50.0	60.0
32	100	100	100	70.0	72.0	75.0
36	100	100	100	80.0	82.0	83.0
40	99.0	98.0	96.0	89.0	91.0	93.0
44	92.0	90.0	88.0	91.0	93.0	94.0
48	85.0	83.0	82.0	93.0	95.0	96.0
52	77.0	76.0	75.0	94.0	95,8	96.0
56	73.0	72.0	75.0	95.0	96,4	96,9
60	69.0	68.0	67.0	95,4	96,8	97,3
64	66.0	65.0	64.0	95,8	97,1	97,6
68	63.0	62,5	62.0	96.0	97,4	97,8
72	60.7	60,1	59.0	96,3	97,6	98.0
76	58.4	57,9	57.0	96,5	97,8	98,2
80	55.7	55.0	55.0	98,20	98,27	98,28
84	53.8	53.0	53.0	98,25	98,33	98,3
88	52.0	51,7	51.0	98,31	98,38	98,4
92	50.0	50.0	50.0	98,37	98,43	98,44
96	49.0	48,7	48.0	98,42	98,47	98,48
100	47.6	47,4	47.0	98,46	98,50	98,51
104	46.4	46,1	45,8	98,49	101,16	99,9

Tabla 4.11. *Ra* y *UD* en las simulaciones correspondientes a segundo riego.

<i>t</i> _{aplicación} (min)	<i>Ra</i> %			<i>UD</i> %		
	2 min	4 min	6 min	2 min	4 min	6 min
4	100	100	100	0	0	0
8	100	100	100	0	0	0
12	100	100	100	0	0	0
16	100	100	100	0	0.63	50.46
20	100	100	95.30	72.50	74.90	77.42
24	99.15	93.41	80.20	74.37	79.94	80.00
28	80.27	75.92	68.10	76.74	82.02	85.16
32	66.44	66.30	60.90	79.00	83.66	88.14
36	62.30	59.65	55.00	82.00	85.77	89.00
40	56.90	54.53	50.00	83.70	87.17	90.00
44	52.60	50.36	47.00	84.50	88.19	91.70
48	48.90	46.90	44.00	85.00	89.00	92.40
52	45.80	43.92	41.60	85.70	89.72	93.00
56	43.10	41.39	39.00	86.30	90.36	93.50
60	40.60	39.06	37.40	87.00	90.97	94.00

Los valores nulos de *UD* corresponden a aquellos casos en los que el fertilizante no alcanza el tramo de surco correspondiente al último 25% de su longitud, por lo que en este no se infiltra fertilizante en cantidad alguna (ver ec. 1.2). En estos casos, el rendimiento de aplicación es máximo, ya que todo el fertilizante aplicado queda en el suelo del surco.

En ambos riegos, se puede observar lo rápido que la uniformidad de distribución alcanza valores deseables conforme se retrasa el momento de aplicación, comportándose de forma inversa el *Ra*. Por el que estos resultados permiten seleccionar una combinación óptima de ambos parámetros.

Parece que la duración de aplicación simulados no ejerce gran influencia en el resultado final, pues no se ha estimado oportuno utilizar valores muy diferentes a los 4 minutos utilizados en los ensayos de campo en los que se basa la relación $E^* \cdot T^*$ utilizada

en las simulaciones. Aun así se puede observar que cuando esta variable aumenta, el rendimiento de aplicación tiende a disminuir, no siendo así el comportamiento de la uniformidad de distribución, que tiende a aumentar, por lo que para aplicaciones muy largas en el tiempo no se obtendría una buena combinación de ambos índices como ya se ha mencionado previamente.

Los resultados aquí obtenidos de *UD* concuerdan con los resultados obtenidos en el trabajo presentado por Playán y Faci (1997b) sobre fertirrigación en tablares, que obtienen un valor óptimo de *UD* para aplicaciones de soluto breves efectuadas durante la fase de avance del flujo; Sabillón y Merkle (2004), después de realizar numerosas simulaciones con un modelo 1D, obtuvieron conclusiones similares optimizando ambos índices con aplicaciones cortas cuando el frente de avance de agua ha recorrido entre el 85 y 95% de la longitud total del surco.

4.3.2. Influencia del orden del riego en que se realice la aplicación

El orden del riego condiciona el momento óptimo de la aplicación de soluto, dependiendo de las condiciones iniciales de humedad del suelo, ya que el flujo de agua tendrá unas características diferentes en cada caso. En la figura 4.24 se presenta el rendimiento de aplicación en relación al tiempo de aplicación para todos los casos simulados en primer el riego y segundo riego recogidos en las tablas 4.24 y 4.25. Se puede observar que se obtienen valores del rendimiento de aplicación del 100% en un intervalo más amplio del momento de inicio de la aplicación cuando esta se efectúa en primer riego: el agua tarda más en llegar al final del surco, por lo tanto hay mayor oportunidad para que el fertilizante aplicado se infiltre completamente en el surco sin alcanzar su tramo final.

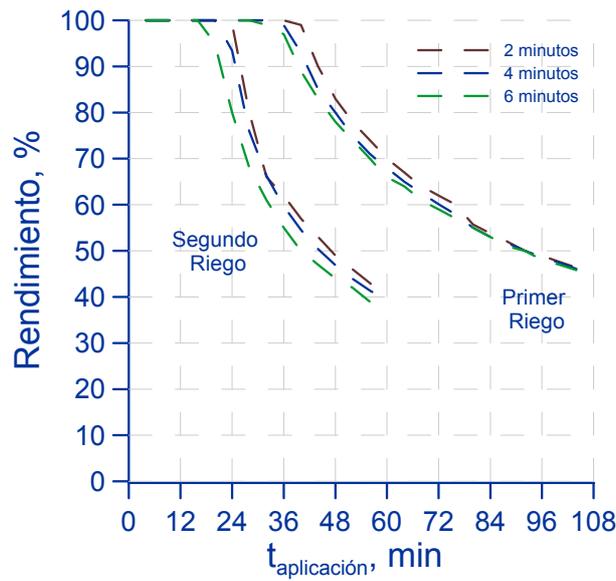


Figura 4.24. Influencia del orden del riego en el rendimiento de aplicación.

La figura 4.25 representa UD frente al momento de inicio de la aplicación y, como cabía esperar, el comportamiento es contrario al de R_a , observándose que cuando las aplicaciones están más próximas al comienzo del riego UD es inferior a los casos en que se retrasa la aplicación de fertilizante. Además, en el segundo riego se obtienen mejores resultados en las aplicaciones cercanas al comienzo del riego que en el primer riego, ya que el agua alcanza antes el final del surco y el flujo se estabiliza antes, lo que favorece una mayor UD .

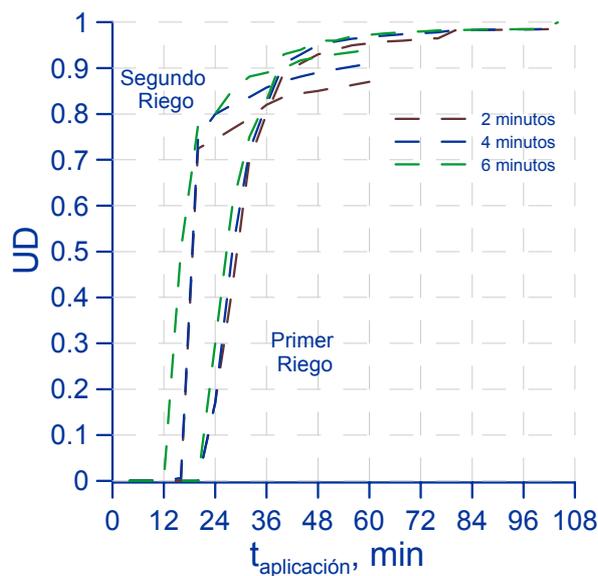


Figura 4.25. Influencia del orden de riego en la uniformidad de distribución.

4.4. Curvas de operación del fertirriego

La combinación de las curvas recogidas en las figuras 4.24 y 4.25 constituye el diagrama de operación del fertirriego correspondiente a las condiciones de riego analizadas. La duración de la aplicación no influye considerablemente en el resultado final de la operación, pero sí el momento en el que se realice ésta. La intersección entre el Rendimiento de aplicación y la Uniformidad de Distribución muestra el momento óptimo de aplicación, si el criterio adoptado es maximizar ambos parámetros de forma conjunta.

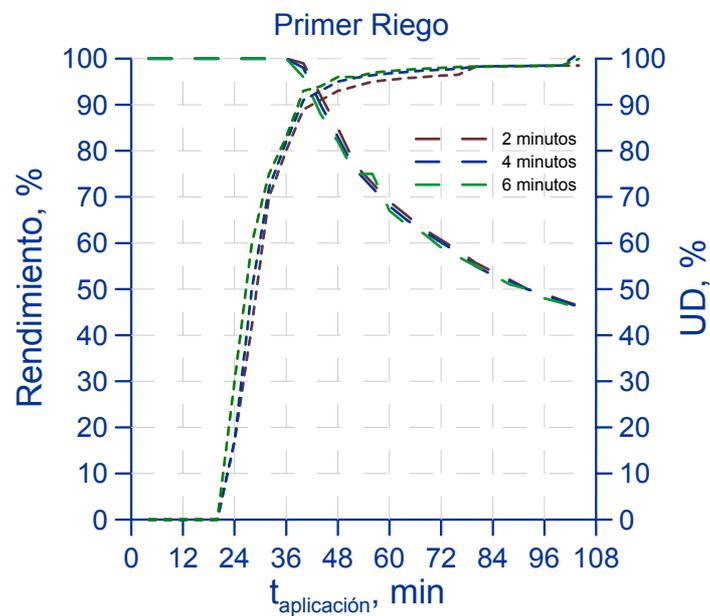


Figura 4.26. Curva de operación de fertirriego en primer riego.

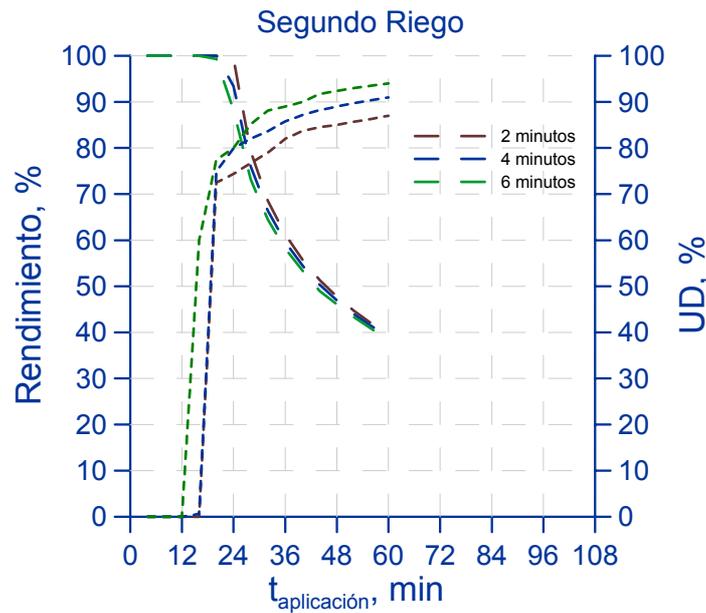


Figura 4.27. Curva de operación de fertirriego en segundo riego.

Los resultados muestran claramente el efecto de las condiciones iniciales del suelo, ya que para los casos de segundo riego, en los que el lecho está consolidado y el suelo contiene cierta humedad inicial, el momento de aplicación de fertilizante que proporciona los mejores resultados, se encuentra más cerca del comienzo del riego. Los momentos óptimos de aplicación se sitúan a 44 y 26 minutos del comienzo del riego para los casos de primer y segundo riego, respectivamente. Para estos casos concretos y una duración de aplicación, se presentan en las figuras 4.28, 4.29 y 4.30 la evolución temporal de concentración a lo largo del surco (en $X= 0, 33.75, 67.5, 101.25$ y 135 m, respectivamente) y su distribución longitudinal y vertical final en el suelo.

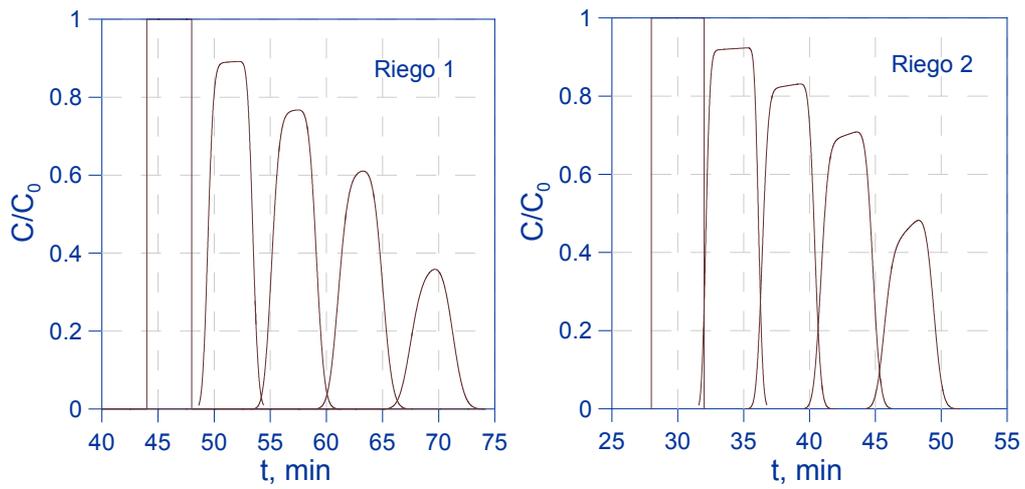


Figura 4.28. Evolución temporal de la concentración de fertilizante en el agua de riego a lo largo del surco.

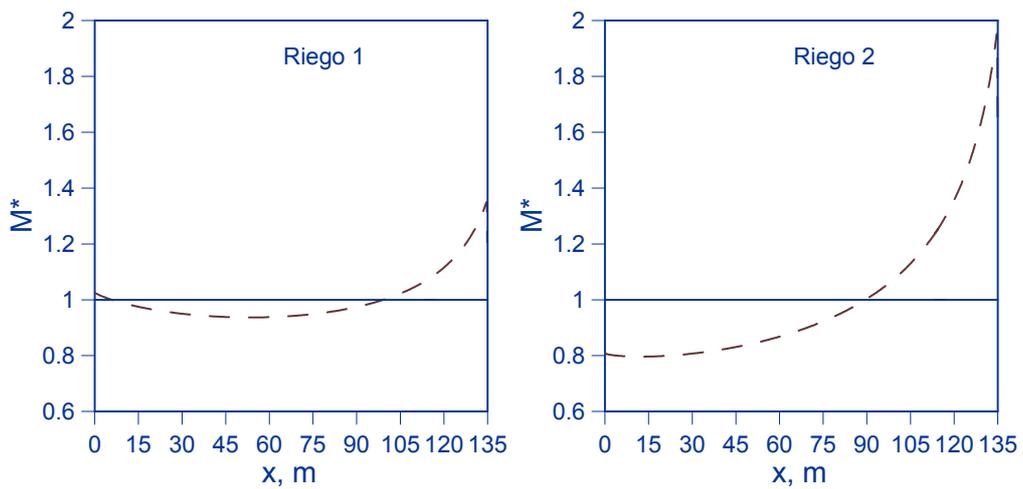


Figura 4.29. Distribución longitudinal final de fertilizante en el suelo.

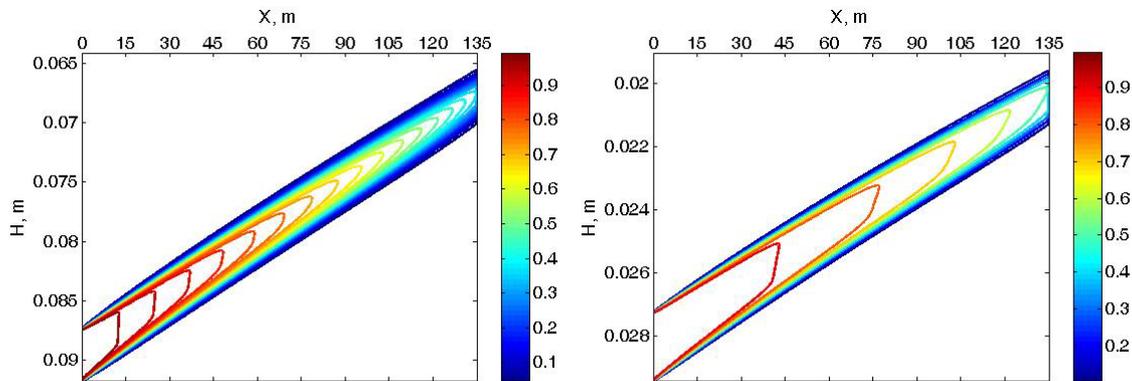


Figura 4.30. Distribución vertical final de fertilizante en el suelo.

El valor del coeficiente de dispersión longitudinal estimado para cada caso, y los valores de Rendimiento de aplicación y Uniformidad de Distribución se presentan en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Valores del Coeficiente de Dispersión Longitudinal, *Ra* y *UD*.

<i>Caso</i>	<i>E (m²s⁻¹)</i>	<i>Ra</i>	<i>UD</i>
Primer riego	1.0 10 ⁻²	0.85	0.93
Segundo riego	1.1 10 ⁻²	0.76	0.82

Se puede observar claramente que los mejores resultados se obtienen para los casos de primer riego, la decisión de fertilizar con unas condiciones u otras de humedad inicial en el suelo sería una necesidad agronómica debido a las necesidades del cultivo en los distintos ciclos de crecimiento, en donde habría que tener en cuenta la profundidad de las raíces para intentar que el fertilizante quedase a su alcance.

En este trabajo se obtienen los mejores resultados cuando el frente de avance ha recorrido el 80% y el 74% para primer y segundo riego respectivamente, esta diferencia con el resultado de Sabillón y Merkley (2004) puede deberse a que el modelo que utilizan para realizar las simulaciones es advectivo, y aunque produzca unos resultados satisfactorios, quedó de manifiesto en el trabajo de García-Navarro *et al.* (2000) la influencia del coeficiente de dispersión longitudinal en el transporte de solutos.

4.5. Conclusiones

Una vez calibrado el modelo de transporte de solutos para los distintos casos experimentales, se pudo observar que el valor del coeficiente de dispersión longitudinal influye notablemente en el resultado final de la fertirrigación, ya que varía según la aplicación de fertilizante se realice en primer o segundo riego, dependiendo a su vez del momento que se realice dicha aplicación. Por lo que para simular con el modelo distintas situaciones de fertirriego es interesante acotar adecuadamente el valor de este coeficiente.

Se ha propuesto una función paramétrica para estimar el valor del coeficiente de dispersión longitudinal en función de las características del flujo de agua y del momento en que se efectúe la aplicación de fertilizante; los resultados obtenidos son satisfactorios, como se puede ver en la tabla 4.7. No hay que olvidar que los ensayos utilizados son de campo, en los que acotar la heterogeneidad del suelo y admitir la validez de una ecuación de infiltración uniforme para todo el surco acarrea muchas simplificaciones, así como la representación 1D de un sistema complejo como es el medio poroso asurcado. Aun así, la ecuación proporciona unos valores del coeficiente de dispersión que reproducen de forma fiable la operación de fertirrigación.

Se han simulado diferentes estrategias de fertirrigación: que se realice en primer o segundo riego, y para cada situación se han realizado varias simulaciones variando el inicio de aplicación de fertilizante y su duración. Los resultados obtenidos de Uniformidad de Distribución en función de estas variables para ambas situaciones de riego concuerdan con los obtenidos en la bibliografía por diferentes autores.

Si la aplicación se realiza durante un intervalo de tiempo corto en la fase de avance del agua, se obtienen unos resultados satisfactorios que, en combinación con el rendimiento de aplicación obtenido, que en estos ensayos en surcos con escorrentía libre hay que controlar. Los mejores resultados los proporcionan las aplicaciones realizadas durante la fase de avance, siendo los momentos de aplicación de 44 y 28 minutos para primer y segundo riego, respectivamente, por lo que se pone de manifiesto la importancia

4. Optimización de la fertirrigación en surcos

de esta variable, orden del riego en que se realiza la fertilización, ya que como se ha podido observar en las figuras 4.26 y 4.27 los puntos de intersección que dan el óptimo para R_d y UD están desfasados según el riego en que se realice la operación.

El diagrama de operación obtenido permite aplicar criterios de optimización diferentes, como fijar un mínimo aceptable para el rendimiento de aplicación y maximizar la uniformidad de distribución siempre que se alcance la profundidad del sistema radical. El manejo del agua de riego efectuado (frecuencia de riego frente a lámina de agua aplicada) repercute en la selección final de las variables de operación de la fertirrigación. El modelo presentado permite simular adecuadamente ambas operaciones, riego en surcos y fertilización: fertirriego.

5. Transferencia de solutos desde el suelo al flujo superficial de agua

5.1. Introducción y objetivos

El aporte de sustancias desde el suelo al flujo superficial es un proceso frecuente en el medio natural que, además de constituir en general una fuente potencial de contaminación del agua superficial y subterránea, en el caso de suelos agrícolas puede disminuir significativamente la eficiencia de aplicación de fertilizantes, modificando la distribución espacial de los mismos y condicionando las pérdidas asociadas a la escorrentía que abandona una parcela en caso de cultivos de regadío.

La transferencia de solutos es un proceso complejo en el que interactúan las características del suelo y las condiciones del flujo superficial, que determinan el proceso de infiltración y la generación de escorrentía; los procesos de adsorción y desorción de las sustancias por las partículas de suelo; y el transporte advectivo y difusivo de las sustancias una vez incorporadas al flujo superficial (Ahuja y Lehman, 1983; Wallach *et al.*, 1989; Ahuja, 1990; Zhang *et al.*, 1997; Gao *et al.*, 2005).

La mayoría de los modelos desarrollados parten de la hipótesis de que la transferencia está dominada por un solo proceso, o que los mecanismos implicados en este proceso se pueden caracterizar mediante la difusión. Estos modelos normalmente se

ajustan satisfactoriamente a datos experimentales calibrando varios parámetros, pero no aclaran cómo interactúan los múltiples procesos implicados en la transferencia de solutos desde el suelo al flujo superficial (Gao *et al.*, 2004).

Las dos tendencias seguidas tradicionalmente en el estudio de esta transferencia son: *el modelo de la capa de mezcla*, que acepta que la interacción suelo-superficie se produce en la capa más superficial del suelo, con un espesor inferior a 10 mm, donde el agua de lluvia o riego, y la solución del suelo se mezclan instantáneamente. Esta zona (capa de mezcla) es la única suministradora de sustancia hacia el flujo superficial (Steenhuis y Walker, 1980; Ahuja *et al.*, 1981; Ahuja y Lenhman, 1983; Steenhuis *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1997, 1999). El segundo grupo de modelos parte de la difusión como mecanismo fundamental de transporte; supone *la existencia de una capa de agua estancada* en la interfaz entre el suelo y el agua en superficie produciéndose la transferencia por difusión molecular (Wallach *et al.*, 1989; 1990; 1991).

La mayoría de los estudios realizados se basan en la primera aproximación. Se ha estudiado el proceso cuando la escorrentía se genera por la precipitación, con un periodo previo de pre-encharcamiento que puede durar desde segundos hasta horas, según la intensidad de la lluvia y las características del suelo. Durante este proceso de adsorción-desorción se produce una interacción entre equilibrio químico y el flujo de infiltración sin que aún se haya producido escorrentía en la superficie, y en el que se tiene que tener en cuenta el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre los agregados, no incluido en todos los estudios (Gao *et al.*, 2005).

En este último apartado del trabajo se plantea un primer acercamiento a cómo este proceso podría afectar al resultado final de la fertirrigación en surcos. En concreto, cómo puede afectar a la distribución final del soluto en el suelo no está estudiado en este ámbito y, por lo tanto, no ha sido incluido en ningún modelo. Las características iniciales del proceso varían con respecto a los descritos en los párrafos anteriores para lluvia debido a la generación de la escorrentía por inundación prácticamente instantánea a medida que el frente de avance de agua progresa. El proceso de transferencia dependerá, a igualdad de

otras condiciones (tipo de suelo, concentración inicial, etc.) de las condiciones del flujo de agua que llega a la superficie donde se encuentran los solutos.

Para poder caracterizar este proceso se han llevado a cabo una serie de ensayos en un canal de laboratorio que se rellenó con suelo, en el que se preparó una sección concentrada de trazador, mezclando este en superficie con el suelo en una franja de pequeño espesor y estrecha. Para relacionar este proceso con las características del flujo se realizaron ensayos con diferente caudal de entrada, que se mantuvo constante a lo largo de cada uno de ellos, variando desde 0.5 Ls^{-1} hasta 5 Ls^{-1} . Además de estos casos, con el fin de cuantificar la no linealidad del proceso cuando la superficie del suelo contiene sustancias en una longitud significativa en el eje de avance del agua, se realizó un último ensayo, repitiendo las condiciones de flujo de uno de los ensayos de la serie anterior, pero en este caso con una franja de soluto en el suelo de mayor longitud, pudiendo evaluar el proceso de transferencia cuando el flujo de agua va cargado de soluto adquirido a su paso por zonas aguas arriba del tramo estudiado.

5.2. Ensayos de laboratorio

5.2.1. Descripción de los ensayos

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Castilla la Mancha, en Ciudad Real; para ello se dispuso de zona recta un canal con sección rectangular transversal y pendiente constantes, cuyas dimensiones son de 9 m de longitud, 1m de anchura y 0.5 m de profundidad. Para la realización de los ensayos se redujo la anchura a 0.5 m. Se añadió una capa de 0.10 m de espesor de grava en la base y, sobre ésta, 0.30 m de espesor de un suelo aluvial procedente de la finca Alameda del Obispo en Córdoba, donde se habían efectuado previamente ensayos de fertirriego (Nofuentes *et al.*, 2004).



Figura 5.1. Canal de laboratorio.

Para recoger el suelo de la parcela se delimitó la superficie del canal con una cuerda y se diferenciaron tres capas del mismo a distintas profundidades, guardándolo en bolsas de plástico debidamente etiquetadas. La capa más superficial corresponde a los 0.05 primeros m de suelo, la siguiente al horizonte entre 0.05 y 0.18 m y la más profunda corresponde al intervalo 0.18-0.30 m. El suelo se clasifica como *Typic xerofluvent* (Soil Survey Staff, 1999), o

Eutric fluvisol (FAO, 1988), de clase textural franca con carbonato cálcico y escaso contenido de materia orgánica



Figura 5.2. Preparación y recogida del suelo en campo.

Una vez transportado el suelo de la parcela al laboratorio, se procedió a su colocación en el canal sobre un lecho de grava de 0.05 m de profundidad, que evita el encharcamiento del perfil y favorece la salida del agua. El suelo se colocó diferenciando las tres capas descritas, para reproducir el perfil de la parcela. Se le dio una pendiente uniforme de 0.002. El canal dispone a su entrada de una estructura tranquilizadora del flujo, como se puede observar en la figura 5.3, que evita una entrada rápida del flujo de agua, que en este caso provocaría la erosión del lecho.



Figura 5.3. Canal relleno de suelo y estructura de remanso en el extremo de entrada de agua en la cabecera.

En cada ensayo, se incorporó al suelo un trazador de forma localizada a lo largo de una franja transversal en la superficie del mismo, y se forzó la circulación superficial de agua manteniendo un caudal constante en la cabecera del canal, midiéndose la evolución temporal de la sustancia en el flujo superficial.

Como trazador se utilizó BrK. El trazador en estado sólido se mezcló con el volumen de suelo correspondiente a una franja estrecha de 0.05 m de longitud, 0.5 m de anchura y 0.01 m de profundidad, situada a 4 m de la cabecera del canal. La tabla 5.1 recoge los valores de caudal de entrada junto con la masa de trazador aplicada y la humedad inicial del suelo en los ensayos efectuados. La cantidad de trazador añadida fue tal que no existiesen condiciones limitantes para su aporte durante los mismos.

En el ensayo realizado con franja ancha, se realizó la misma preparación del tramo con existencia de trazador pero a lo largo de un tramo de longitud 0.70 m; se mantuvo la misma distancia a cabecera del inicio de la franja que en los ensayos de franja estrecha, así como la anchura y profundidad de la zona afectada por sustancia.

Tabla 5.1. Caudal de entrada, masa de trazador y humedad inicial del suelo.

<i>Ensayo</i>	Q_0 (Ls^{-1})	<i>BrK</i> (kg)	<i>Humedad</i> <i>inicial</i> ($kgkg^{-1}$)
1	0.54	0.372	0.076
2	1.00	0.672	0.140
3	1.90	0.372	0.076
4	2.50	0.372	0.150
5	3.22	0.372	0.155
6	4.72	0.372	0.180
7*	2.50	5.000	0.160

* ensayo de franja ancha; resto, franja estrecha

La evolución de la concentración de BrK en el flujo superficial se estimó midiendo la conductividad eléctrica, CE , del agua en tres estaciones de muestreo a lo largo del canal y usando las relaciones CE -concentración de BrK calibradas previamente a partir de soluciones patrón. La primera estación de medida se situó a 0.03 m aguas arriba de la franja, para evaluar la importancia de los efectos de la dispersión longitudinal; la segunda estación, situada a 0.03 m aguas debajo de la franja, detecta la transferencia de trazador desde el suelo al flujo. La tercera estación permite evaluar el movimiento de éste en el seno del fluido; situada a 6 m de cabecera, se encuentra a 2 m aguas abajo del final de la franja en los ensayos de franja estrecha y a 1.30 m del final de la misma en el último ensayo, de franja ancha.

Durante cada ensayo se midieron los tiempos de avance del agua y el calado en 9 secciones, entre las que se incluían las estaciones de muestreo, así como el caudal de salida, usando un depósito de 500 L de capacidad.

Se calculó el caudal instantáneo y la velocidad media en cada estación se calcularon con el modelo numérico, una vez calibrado con los datos experimentales de calado, tiempos de avance y caudal de salida.

5.3. Resultados

5.3.1. Resultados experimentales

La figura 5.4 muestra las curvas de avance del agua para los ensayos calculadas en los ensayos 1 a 6, se observa también el tiempo de llegada del frente de agua al final del canal medido durante cada ensayo; el ensayo 7, de franja ancha, tiene las mismas características que su homólogo de franja estrecha, el ensayo 4.

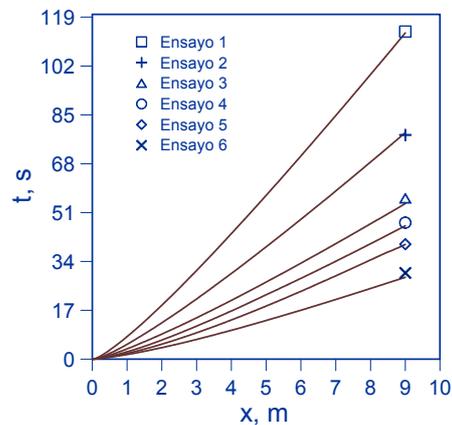


Figura 5.4. Tiempo de avance medido y tiempos calculados en los ensayos.

En la tabla 5.2 se presentan los valores de los parámetros de la ecuación de infiltración y el coeficiente de aspereza de Manning, ajustados con el modelo para todos los ensayos.

Tabla 5.2. Valores ajustados de los parámetros de la ecuación de infiltración y el coeficiente de aspereza de Manning en todos los ensayos de laboratorio.

<i>Ensayo</i>	<i>k (m s^{-a})</i>	<i>a</i>	<i>f₀ (m s⁻¹)</i>	<i>n (S.I.)</i>
1	0.0031	0.17	1.3 10 ⁻⁵	0.021
2	0.0042	0.17	2.6 10 ⁻⁵	0.018
3	0.0060	0.12	8.8 10 ⁻⁶	0.018
4	0.0059	0.22	5.1 10 ⁻⁵	0.012
5	0.0053	0.30	1.3 10 ⁻⁵	0.013
6	0.0067	0.17	1.5 10 ⁻⁵	0.014

Para poder caracterizar adecuadamente el proceso de transferencia y analizar las posibles diferencias encontradas es necesario conocer las condiciones del flujo de agua, para lo que se ha calculado la evolución del número de Reynolds y número de Froude para todos los ensayos. En la figura 5.5 se puede observar que en los dos primeros ensayos el flujo se podría considerar laminar. Todos los ensayos presentan condiciones supercríticas sólo en los primeros instantes, ya que el régimen subcrítico se alcanza rápidamente.

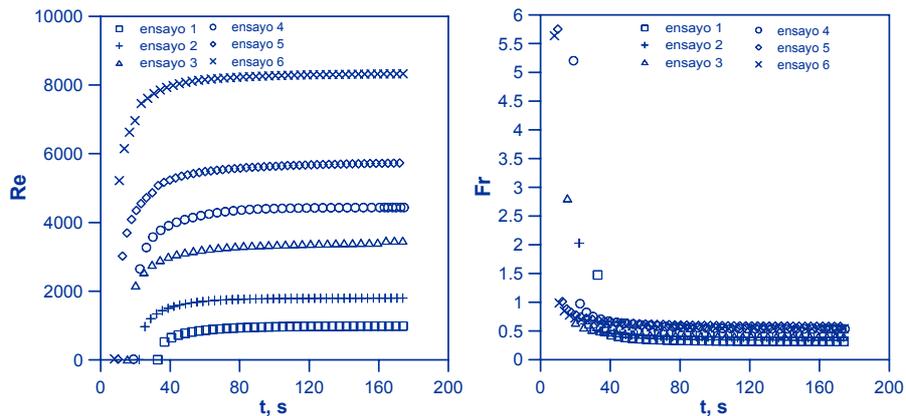


Figura 5.5. Evolución temporal de los números de Reynolds y Froude.

A continuación, se presentan las curvas de concentración medidas en todos los ensayos en cada estación (figuras 5.6 a 5.8, franja estrecha; figura 5.9, franja ancha); se puede observar que la primera estación prácticamente no registra concentración en ningún caso, por lo que se puede despreciar el efecto de dispersión longitudinal en sentido contrario al avance del flujo de agua.

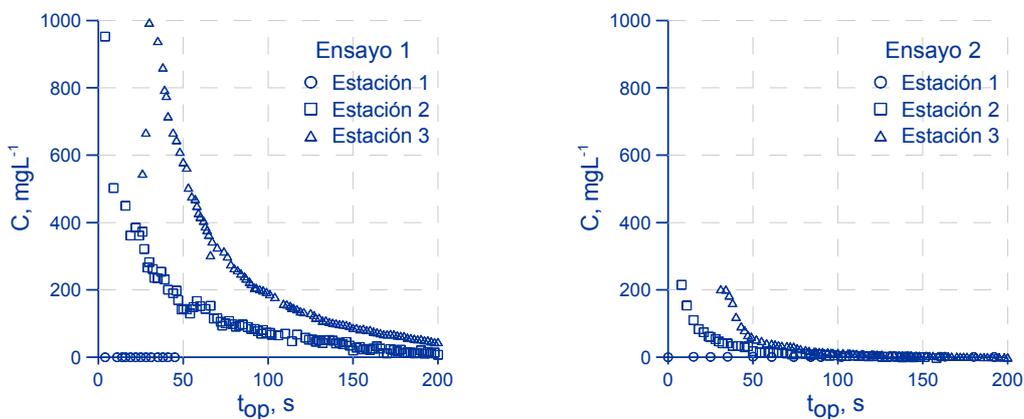


Figura 5.6. Evolución temporal de soluto en los ensayos 1 y 2 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)

5. Transferencia de solutos desde el suelo al flujo superficial de agua

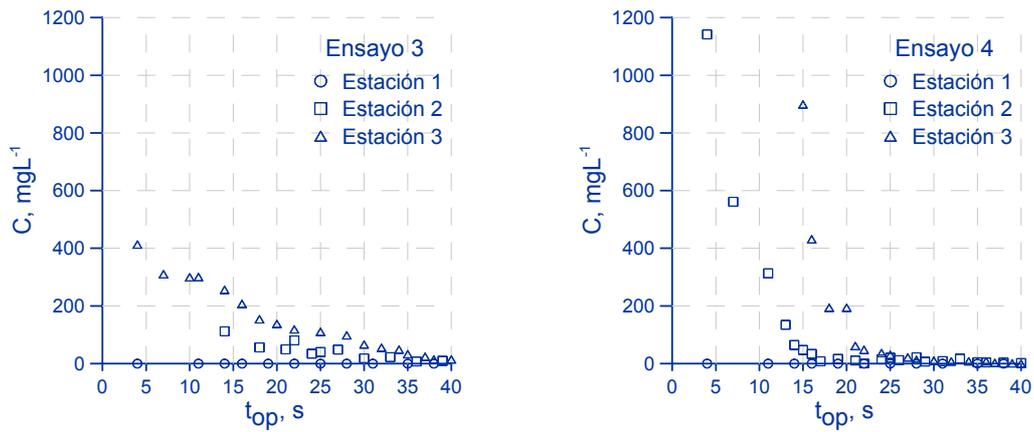


Figura 5.7. Evolución temporal de soluto en los ensayos 3 y 4 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)

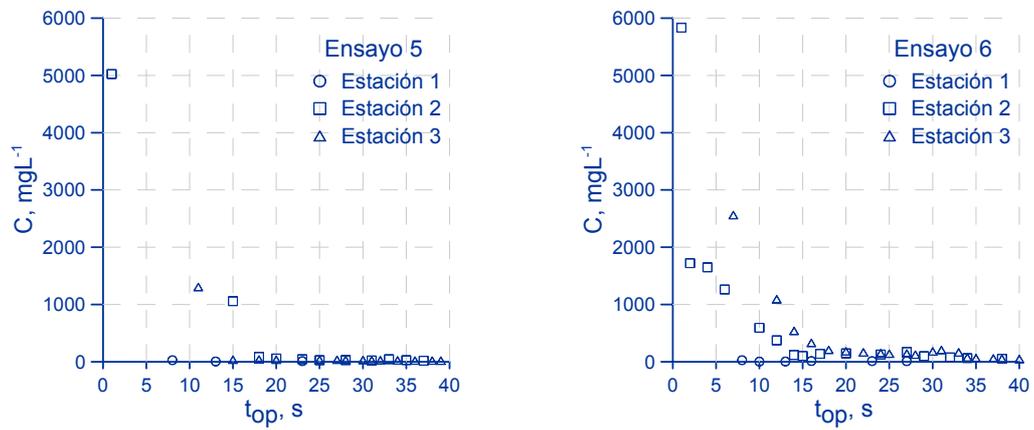


Figura 5.8. Evolución temporal de soluto en los ensayos 5 y 6 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)

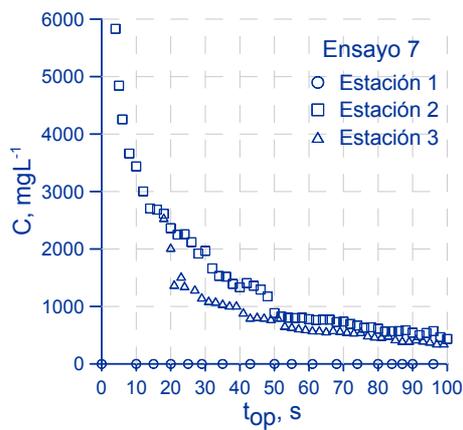


Figura 5.9. Evolución temporal de soluto en el ensayo 7 (est. 2 sobre la franja; est. 1 y est. 3 aguas arriba y aguas abajo, respectivamente)

De forma general, se observa que los valores de concentración correspondientes a los seis primeros ensayos aumentan conforme lo hace el caudal de entrada, siendo el aporte en estos casos un proceso rápido, que podría relacionarse con la velocidad del flujo. Esta tendencia se puede observar en los resultados obtenidos por Ahuja y Lehman (1983), Havis *et al.* (1992), Zhang *et al.* (1999) y Gao *et al.* (2004), en donde los valores más altos de concentración en el flujo de escorrentía se producen a intensidades de lluvia mayores, disminuyendo a su vez la duración del aporte.

Hay que destacar que el proceso de transferencia es mucho más lento cuando la generación de escorrentía depende de la precipitación, en el trabajo de Havis *et al.* (1992) se puede observar que para un caudal medio de escorrentía de 3 L s^{-1} , el aporte dura unos 30 minutos aproximadamente, mucho mayor que la duración del aporte del ensayo 5 aquí presentado con un caudal de entrada similar.

El ensayo 2 representa una excepción a esta tendencia dentro del grupo de los ensayos lentos. Esto podría deberse a la humedad inicial del suelo, siendo el doble en el ensayo 2, por lo que la entrada de agua en la capa de mezcla estaría limitada.

En el ensayo 3 no se registraron los primeros valores de concentración de la segunda estación debido a la obturación momentánea del sensor.

Los resultados obtenidos en el ensayo 7, de franja ancha, en comparación con el ensayo 4, de franja estrecha y con las mismas características de flujo, permiten observar que el intervalo durante el cual se aporta soluto desde el suelo es mayor, y que el proceso se produce de forma más lenta.

5.3. 2. Dinámica del proceso de transferencia: obtención de una función de carga desde el suelo

A partir de las medidas de concentración y los valores de caudal para los instantes de medida, se puede calcular el valor de la carga correspondiente como el producto de

ambas variables. La evolución espaciotemporal del caudal de agua en este proceso se ha calculado utilizando el modelo descrito en el capítulo 2, con los mismos criterios de calibración del flujo de agua. Las figuras 5.10 a 5.12 muestran, para cada ensayo, la evolución del caudal y la carga en la sección donde se situó la franja de trazador, observándose que los valores más altos de carga se producen en los primeros instantes de llegada del flujo,

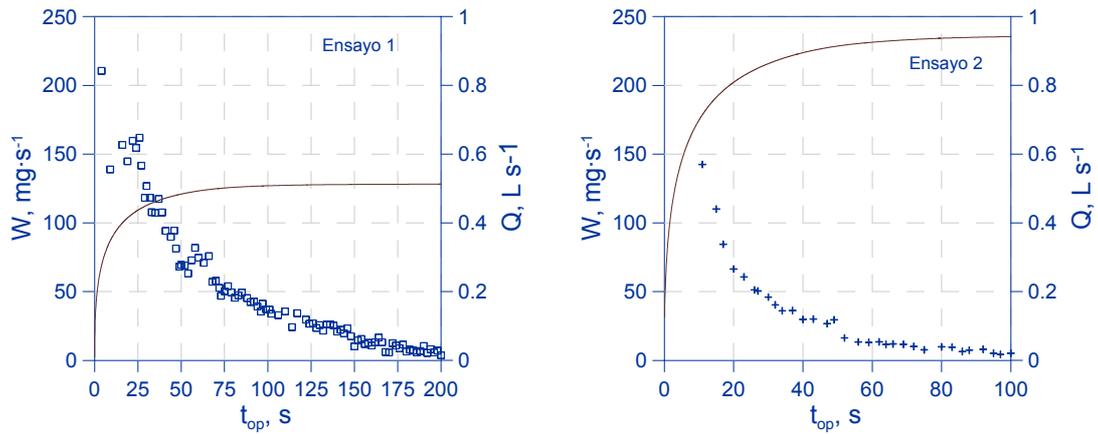


Figura 5.10. Evolución temporal de la carga de soluto y el caudal en la sección donde se situó el trazador en los ensayos 1 y 2 respectivamente.

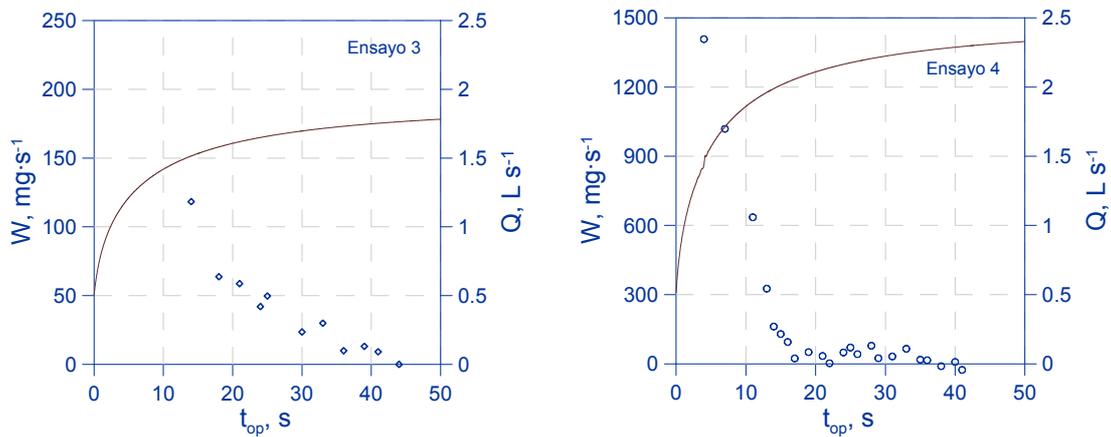


Figura 5.11. Evolución temporal de la carga de soluto y el caudal en la sección donde se situó el trazador en los ensayos 3 y 4 respectivamente.

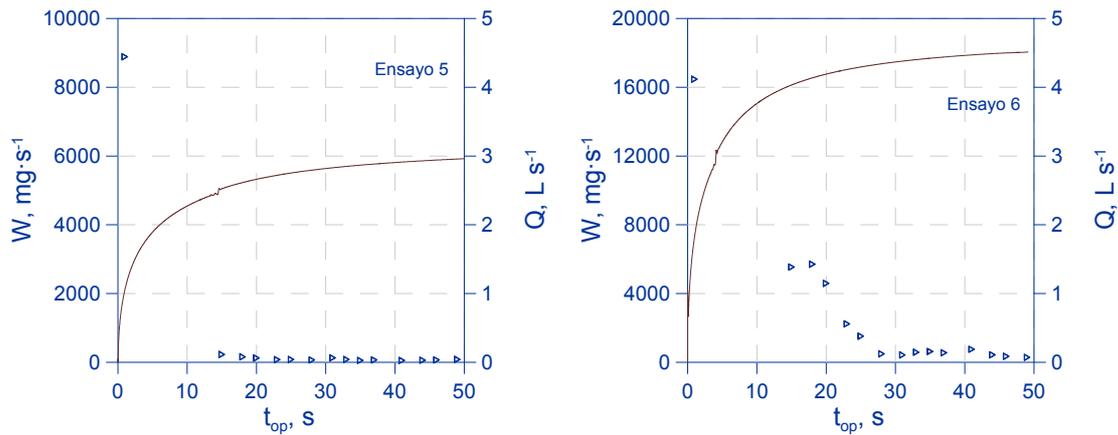


Figura 5.12. Evolución temporal de la carga de soluto y el caudal en la sección donde se situó el trazador en los ensayos 5 y 6 respectivamente.

La evolución de la transferencia de solutos desde un punto del suelo (en este caso, en el suelo base de una sección transversal) al agua de escorrentía se puede describir de forma simple, a la vista de la evolución de resultados, mediante una función de carga de tipo exponencial $W(t)$ $[MT^{-1}]$ (e.g., Chapra, 1997),

$$W(t) = W_0 \cdot \exp(-\beta \cdot t_{op}) \quad (5.1)$$

donde W_0 representa la masa aportada por unidad de tiempo en el instante inicial, β es un coeficiente de transferencia $[T^{-1}]$ y t_{op} el tiempo transcurrido, en este caso desde la llegada del frente de avance del agua.

Una vez ajustados los parámetros W_0 y β de la función de carga descrita con la ecuación 5.1, a partir de los datos experimentales, se obtiene una expresión particular para cada caso, que se puede incluir como condición de contorno en el modelo de transporte de solutos descrito en capítulos previos. El ajuste se realizó por regresión lineal y sus resultados se muestran en la tabla 5.3, junto con la masa de trazador aportada en cada caso (M) y el intervalo de tiempo durante el cual se produce el proceso de transferencia ($T_{0,99}$), considerado para una proporción de recuperación de la masa aportada del 99%.

Tabla 5.3. Parámetros de la función de carga ajustada para los ensayos de franja estrecha.

Ensayo	W_0 (kg s^{-1})	β (s^{-1})	R^2	$T_{0.99}$ (s)	M (kg)
1	$0.214 \cdot 10^{-3}$	0.018	0.98	200	$1.5 \cdot 10^{-3}$
2	$0.220 \cdot 10^{-3}$	0.051	0.99	100	$4.2 \cdot 10^{-3}$
3	$0.413 \cdot 10^{-3}$	0.093	0.96	45	$4.4 \cdot 10^{-3}$
4	$2.418 \cdot 10^{-3}$	0.157	0.98	40	$15.4 \cdot 10^{-3}$
5	$11.360 \cdot 10^{-3}$	0.245	0.99	22	$46.1 \cdot 10^{-3}$
6	$21.860 \cdot 10^{-3}$	0.335	0.95	20	$65.2 \cdot 10^{-3}$

En la tabla 5.3 se observa cómo los parámetros de la función de carga aumentan con mayores valores de caudal. El parámetro β se relaciona linealmente tanto con el caudal de entrada como con la velocidad media del flujo durante el intervalo de tiempo que se registra soluto en a estación 2 ($T_{0.99}$), con mejor correlación en la relación con el caudal. Para el parámetro W_0 la relación con las variables es exponencial donde la mejor correlación se produce con la velocidad.

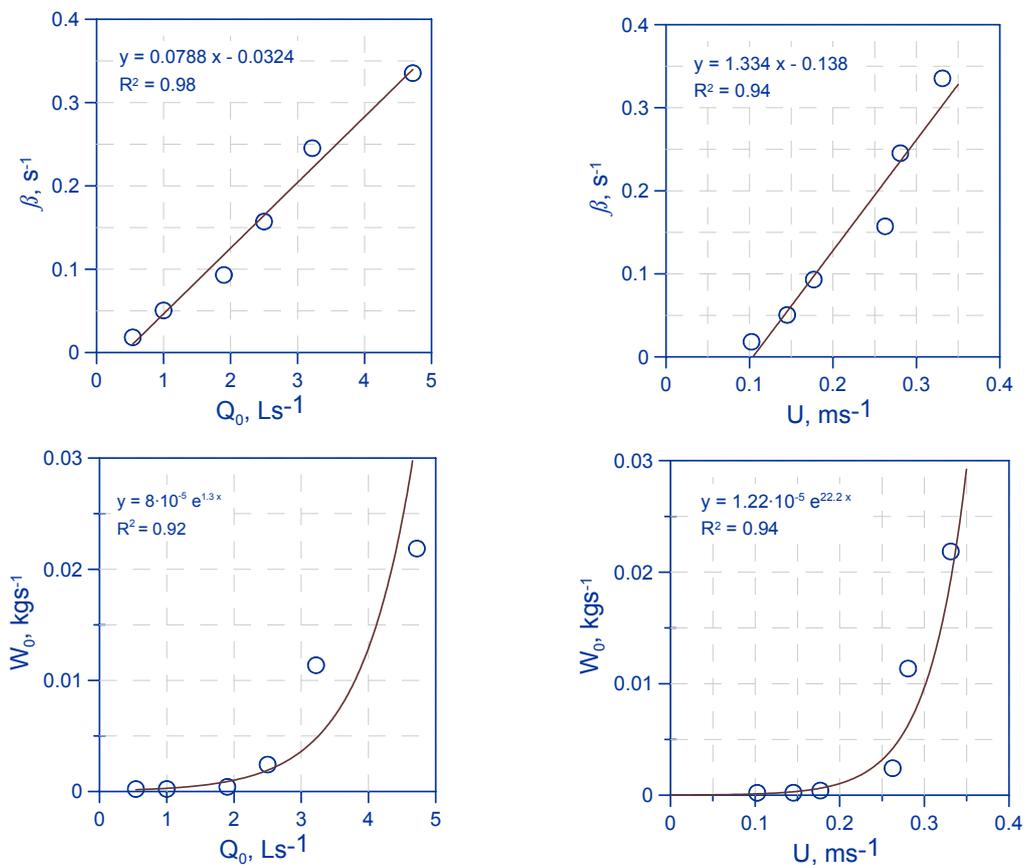


Figura 5.13. Velocidad media del flujo y caudal de entrada frente a frente a β y W_0 .

A continuación se presenta la función de carga experimental y ajustada (fig. 5.14); la figura 5.15 muestra el detalle ampliado de los primeros 50 segundos.

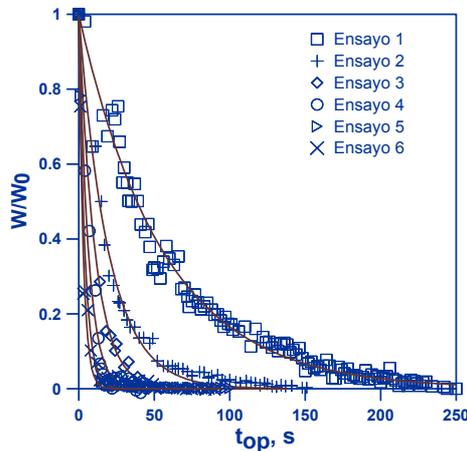


Figura 5.14. Función de carga experimental (puntos) y ajustada (línea).

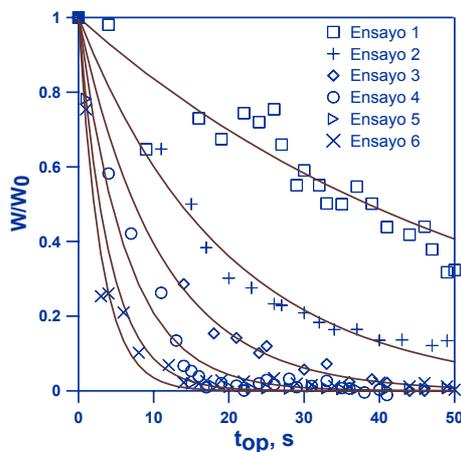


Figura 5.15. Ampliación de la figura 80 correspondiente a los 50 primeros segundos.

En estas figuras se puede observar que en los ensayos lentos (ensayos 1, 2 y 3) el soluto permanece accesible al flujo de escorrentía durante más tiempo, por eso los descensos de las curvas son menos acusados, los valores de β son menores en estos ensayos; mientras que para los ensayos más rápidos (ensayos 4, 5 y 6) pasa lo contrario, aunque el flujo tiene inicialmente una mayor capacidad de adquirir sustancia por la mayor velocidad, de ahí el mayor valor de W_0 en estos casos.

5.3.3. Modelo de transporte de solutos en superficie: casos de franja estrecha

La función de carga ajustada para cada ensayo se utiliza como condición de contorno en la posición donde se localiza la franja, para utilizar el modelo 1D explicado en este trabajo a la hora de caracterizar el transporte del trazador transferido desde el suelo a lo largo del canal. Una vez acoplada la función de carga al modelo se procedió a su calibración siguiendo las indicaciones descritas en el apartado 5.2. Se adopta, de nuevo, un valor de E constante para todo el intervalo durante el cual se produce el transporte.

Durante la calibración de los ensayos se observó que para valores de E menores o iguales a $0.0001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ los resultados con el modelo no variaban, siendo además los que más se aproximaban a los resultados experimentales. Las curvas simuladas de evolución de la concentración de trazador en el flujo superficial se muestran a continuación, junto con los valores medidos (figuras 5.16 a 5.21).

Es necesario hacer notar que los bajísimos valores de E encontrados ponen de manifiesto cómo, al producirse la transferencia desde el suelo a la vez que llega el frente de agua e ir infiltrándose aguas abajo el flujo más concentrado, el proceso en superficie es predominantemente advectivo en los instantes en que habría más concentración en el flujo superficial si el contorno no fuera poroso. Esto hace que la sensibilidad del modelo a variaciones de E en dicho umbral y por debajo sea prácticamente nula, obteniéndose curvas equivalentes si se adopta un valor nulo de E (modelo advectivo).

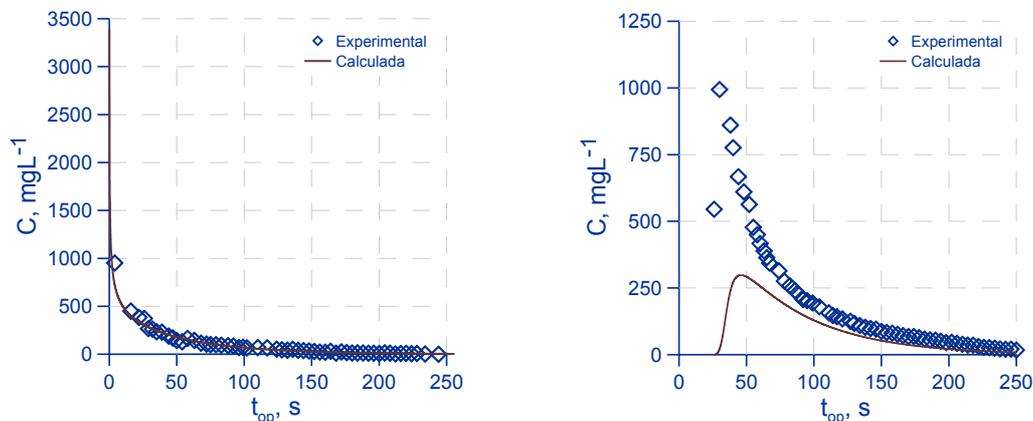


Figura 5.16. Estaciones 2 y 3 del ensayo 1 respectivamente.

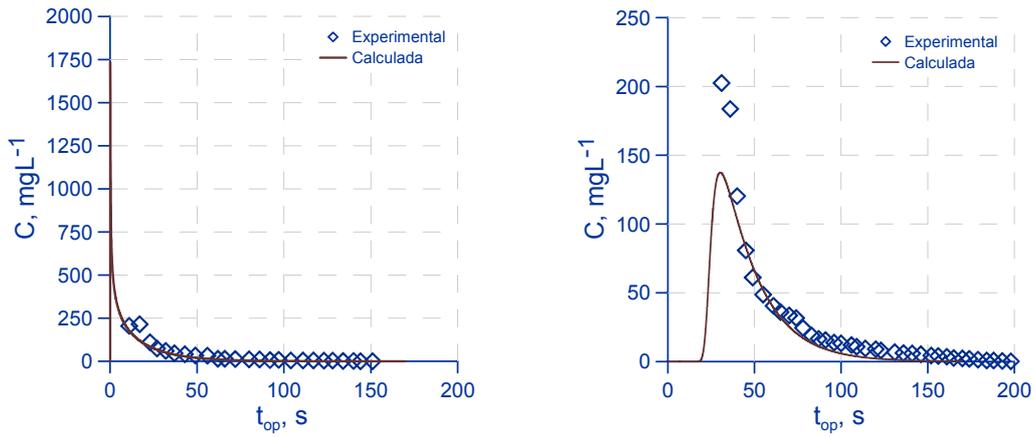


Figura 5.17. Estaciones 2 y 3 del ensayo 2 respectivamente.

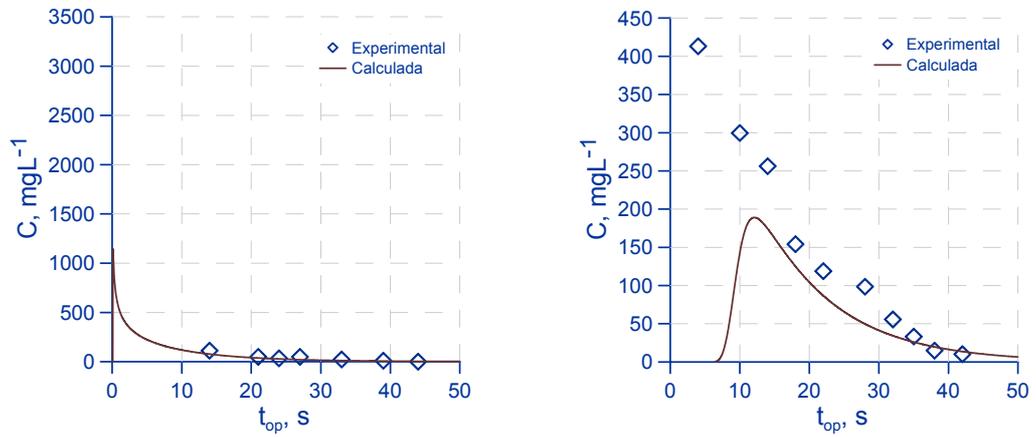


Figura 5.18. Estaciones 2 y 3 del ensayo 3 respectivamente.

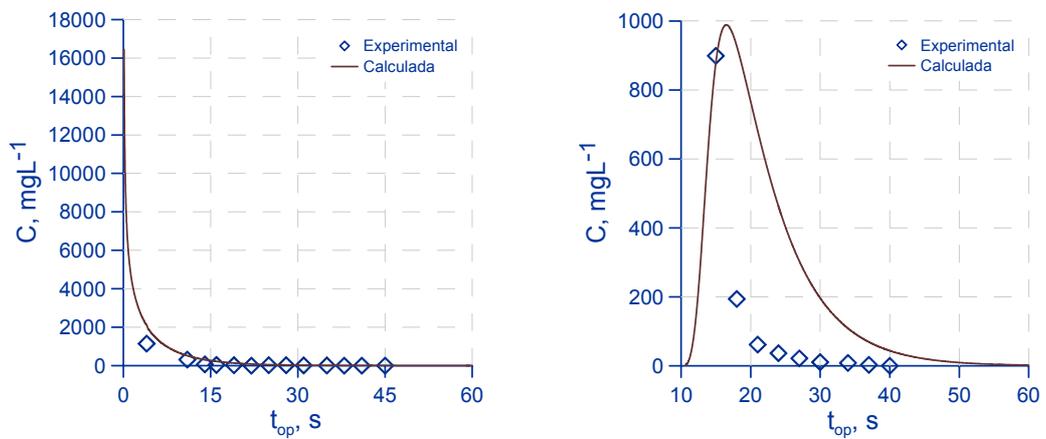


Figura 5.19. Estaciones 2 y 3 del ensayo 4 respectivamente.

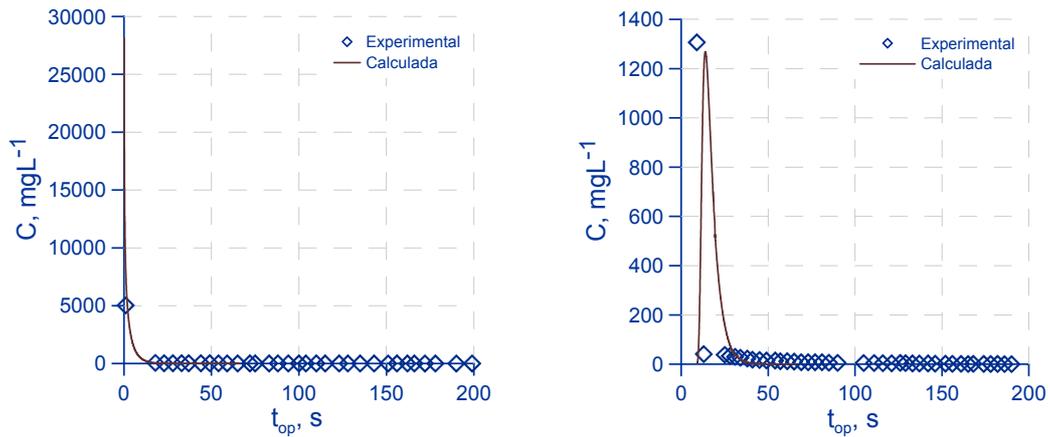


Figura 5.20. Estaciones 2 y 3 del ensayo 5 respectivamente.

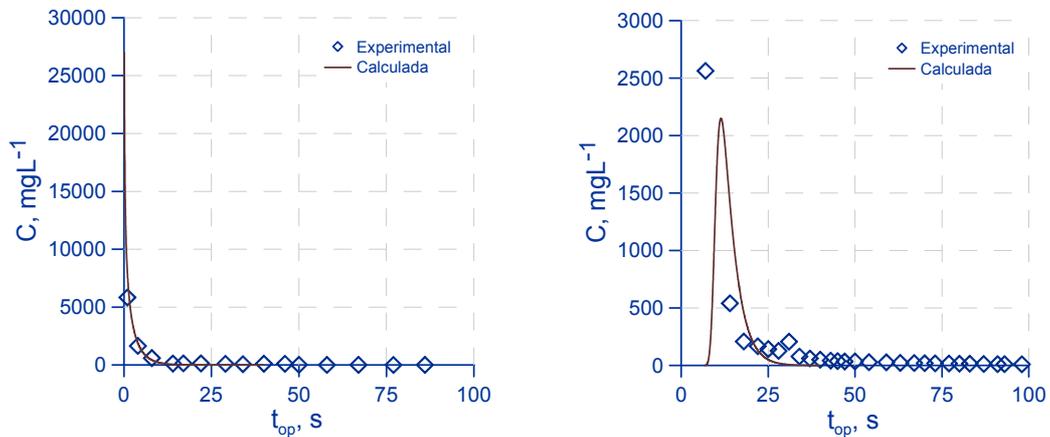


Figura 5.21. Estaciones 2 y 3 del ensayo 6 respectivamente.

Se observa claramente que los mejores resultados son los obtenidos en los ensayos con flujo rápido, ya que el flujo transitorio se supera rápidamente, y el coeficiente de dispersión longitudinal se estabiliza, además de ser un flujo más advectivo. En flujos lentos, en los que el transitorio tiene mayor duración, la evolución temporal real de E tiene más importancia en el proceso y durante cierto intervalo difiere de valores prácticamente nulos; por ello, la hipótesis de E uniforme y constante reproduce peor el comportamiento del sistema en estos casos.

5.3.3.1. Calibración del ensayo correspondiente a la franja de 0.7 m de longitud

Para reproducir este caso correctamente con el modelo se necesita una función que incluya el efecto de la carga de soluto en el flujo de agua, es decir, una vez que el flujo de agua alcanza la franja comienza la transferencia desde el suelo, conforme avanza sobre la franja el flujo se va cargando de soluto y disminuye su capacidad de adquisición con respecto a la que tendría si tuviese concentración nula, por lo que el proceso de transferencia no se produce como en los casos anteriores; para tener en cuenta este efecto se ha propuesto las siguientes ecuaciones,

$$W(x, t_{op}) = W_0(x) \cdot e^{-\beta(x)t_{op}} \quad (5.2)$$

con,

$$W_0(x) = W_0 \cdot e^{-\gamma_1(x-x_0)} \quad (5.3)$$

$$\beta(x) = \frac{\beta}{\gamma_2(x-x_0)} \quad (5.4)$$

en las que los valores de W_0 y β en el punto inicial de la franja (x_0) corresponden a los valores ajustados en el ensayo correspondiente a la franja de 0.05 m de longitud y mismas condiciones de flujo; γ_1 y γ_2 son parámetros que permiten incorporar la menor capacidad del flujo superficial para adquirir sustancia desde el suelo a medida que avanza sobre la franja concentrada. Los valores ajustados de γ_1 y γ_2 son 0.32 y 3.2 m⁻¹, respectivamente. En la figura 5.22 se presentan los resultados obtenidos de esta calibración, utilizando el valor de E que proporciona la ecuación 4.1 (utilizando en la ec. 4.3 para T^* , $t_{aplicación}$ igual al tiempo de avance en el punto inicial de la franja), para las condiciones del ensayo, observándose que las ecuaciones paramétricas propuestas reproducen con satisfacción el proceso, quedando de manifiesto la no-linealidad del proceso si se comparan estos resultados con los obtenidos en el ensayo 4.

5. Transferencia de solutos desde el suelo al flujo superficial de agua

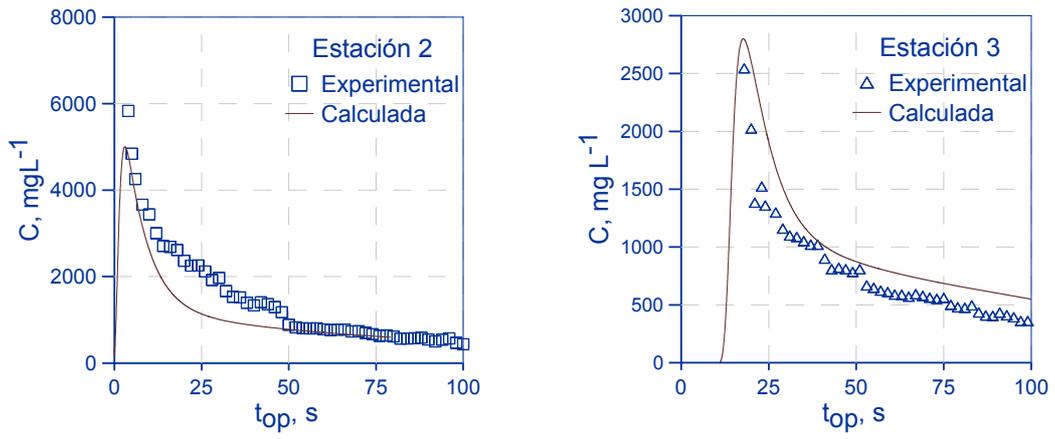


Figura 5.22. Estaciones 2 y 3 del ensayo 7 respectivamente.

5.4. Conclusiones

Los ensayos realizados se han mostrado útiles para realizar una primera caracterización 1D del proceso de transferencia de solutos desde el suelo al flujo de agua superficial en el medio natural.

La función de carga ajustada permite calcular adecuadamente la condición de contorno en el modelo numérico de transporte de agua y solutos utilizado en este trabajo. Los parámetros ajustados, β y W_0 , están relacionados con el caudal de entrada y la velocidad media del flujo durante el proceso de transferencia respectivamente, siendo en el primer caso una relación lineal mientras que para el segundo es exponencial.

El modelo 1-D reproduce satisfactoriamente algunos ensayos, los de flujo de agua más rápido, no siendo así en los ensayos correspondientes a flujos lentos, aunque el proceso parece que está marcado por un transporte advectivo, no se caracteriza suficientemente el periodo inicial marcadamente transitorio que es más largo en los ensayos lentos; se hace necesario por tanto caracterizar específicamente la evolución temporal del coeficiente de dispersión longitudinal, ya que su efecto no se puede obviar.

Se ha demostrado que el proceso de transferencia no es lineal con respecto al espacio (dimensiones de la zona con trazador) cuando la superficie en la que se encuentra el soluto es lo suficientemente grande como para que el flujo de agua se cargue de soluto y siga circulando sobre una superficie concentrada, y se puede describir mediante una función de carga distribuida, que disminuye en el espacio a medida que se avanza aguas abajo del inicio del tramo con sustancia. Las ecuaciones paramétricas de la función de carga $W(x,t)$ propuestas para el caso de concentración inicial uniforme a lo largo de un tramo como condiciones de contorno reproducen satisfactoriamente el proceso.

Las conclusiones de este capítulo constituyen una primera aproximación para un modelado sencillo de un complejo proceso físico-químico como es el analizado. Una mayor disponibilidad de resultados experimentales que abarquen mayor gama de condiciones

5. Transferencia de solutos desde el suelo al flujo superficial de agua

permitirán aquilatar la validez de los resultados obtenidos para casos más generales, que incluyan situaciones donde la concentración inicial de sustancia en el suelo constituya un factor limitante para el proceso de transferencia, así como sustancias con distinta movilidad desde el suelo, ambos casos no abordados en este trabajo.

6. Conclusiones

A. Transporte superficial en el surco de sustancias aplicadas al agua de riego

Los ensayos realizados en campo ponen de manifiesto la influencia del flujo superficial en el transporte de solutos, encontrándose las principales diferencias cuando la fertilización se realiza en el primer o segundo riego. El momento en el que se realice la aplicación de fertilizante influye en el resultado final de la fertirrigación, las razones, como en el caso anterior, se atribuyen a las características del flujo superficial. Estas afirmaciones se comprueban con la calibración del modelo de transporte, cuyos resultados demuestran que las características del flujo influyen notablemente en el tipo de transporte advectivo-dispersivo, y por lo tanto en el resultado final de la fertirrigación.

Se ha comprobado que la elección del coeficiente de dispersión longitudinal según sea el flujo de agua, es crucial para la realización de las simulaciones con el modelo de transporte. Para acotar este valor se propuso una ecuación paramétrica que lo relaciona con las características del agua y del suelo (teniendo en cuenta en este caso la velocidad de infiltración estabilizada). La validación de esta ecuación con unos ensayos de campo similares a los de este trabajo dio resultados satisfactorios, por lo que la ecuación propuesta es válida para simular distintos manejos del fertirriego en surcos.

Las simulaciones realizadas permiten obtener los diagramas de operación de fertirriego, distinguiendo cuando se realice en el primer o segundo riego. La mejor opción resulta cuando la aplicación de fertilizante se realiza durante la fase de avance del agua en ambos casos, concretamente cuando han transcurrido 44 y 28 minutos desde el comienzo del riego, esto supone un recorrido del frente de agua del 81 % y 74 % de la longitud total del surco, respectivamente.

B. Transferencia de sustancias desde la superficie del suelo al flujo superficial de agua

Los ensayos realizados en el laboratorio han dado unos resultados útiles para obtener una primera relación entre el proceso de transferencia y las condiciones del flujo. Se ha ajustado una función de carga que permite calcular adecuadamente la condición de contorno en el modelo numérico de transporte de agua y solutos. Los parámetros ajustados de la función de carga, β y W_0 , se relacionan de forma lineal el primero y exponencial el segundo con el caudal de entrada y la velocidad media del flujo de agua durante el proceso de transferencia, respectivamente.

Los diferentes ensayos realizados para el caso de franja estrecha, permiten concluir que para los casos en los que el flujo es rápido, la transferencia dura poco tiempo comparado en los ensayos lentos., aunque la masa inicial aportada es mayor, esto se puede relacionar con la velocidad del flujo.

El acople de la función de carga como condición de contorno en el modelo 1-D desarrollado en este trabajo, proporciona buenos resultados para los casos en los que el caudal de entrada es mayor. Los resultados obtenidos para los casos de los flujos lentos, indican que el modelo no reproduce satisfactoriamente el transitorio que es más largo en estos ensayos, y que además es el frente de agua es el que va cargado de soluto.

Con el ensayo de la franja ancha se demostró que el proceso de transferencia no es lineal, y las ecuaciones paramétricas propuestas reproducen el proceso satisfactoriamente como se puede observar en la figura 5.21.

7. Bibliografía

Abbasi, F., Feyen, J., Roth, R. L., Sheedy, M. Genuchten, M. Th. 2003a. Water flow and solute transport in furrow-irrigated fields. *Irrig. Sci.*, 22:57-65.

Abbasi, F., Simunek, J., Genuchten, M. Th., Feyen, J., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Strelkoff, T. S., Shouse, P. 2003b. Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis. *J. Irrig Drain. Engng.*, 129(2): 71-81.

Abbasi, F., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Feyen, J., Shouse, P., Genuchten, M. Th. 2003c. Effects of flow depth on water flow and solute transport in furrow irrigation: Field data analysis. *J. Irrig Drain. Engng.*, 129(4): 237-246.

Abbasi, F., Feyen, J., Genuchten, M. Th. 2003d. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: Model calibration and validation. *J. Hydrol.* 290: 63-69.

Ahuja, L. R., Lehman, O. R. 1983. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff. *J. Environ. Qual.*, 12: 34-40.

Ahuja, L.R. 1990. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:312-321.

Akkuzu, E., Unal, H. B., Karatas, B. S., Avci, M., Asik, S. 2007. General irrigation planning performance of water user associations in the Gediz basin in Turkey. *J. Irrig Drain. Engng.*, 133: 17-26.

Alazba, A. A. 1999. Explicit volume balance model solution. *J. Irrig Drain. Engng.*, 125: 273-279.

7. Bibliografía

Boldt, A. L., Watts, D. G., Eisenhauer, D. E., Schepers, J. S. 1994. Simulation of water applied nitrogen distribution under surge irrigation. *Trans. ASAE*, 37:1157-1165.

Brufau, P., García-Navarro, P., 2000. Two dimensional dam break flow simulation. *Int. J. Num. Meth. In Fluid.*, 33: 35-57.

Brufau, P., García-Navarro, P., Playán, E., Zapata, N. 2002. Numerical modeling of basin irrigation with an upwind scheme. *J. Irrig Drain. Engng.*, 128: 212-223.

Burguete, J. 2003. *Modelos unidimensionales de flujos de superficie libre y transporte en geometrías irregulares: aplicación al flujo en ríos*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.

Burguete, J., García-Navarro, P. 2004a. Improving simple explicit methods for unsteady open channel and river flow. *Int. J. Num. Meth. In Fluid.*, 45: 125-156.

Burguete, J., García-Navarro, P. 2004b. Simple numerical methods for one-dimensional flows: source terms, boundaries and conservation. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS*.

Carnahan, B., Luther, H. A., Wilkes, J. O. 1969. *Applied numerical methods*. J. Wiley. Nueva York.

Chapra, S.C. 1997. *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill. Nueva York.

Chow, V. T. 1959. *Open channel flow*. McGraw-Hill. Nueva York.

Clemmens, A. J. 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agric. Water Manag.*, 3(4):251-267.

Clemmens, A. J., Bos, M. G. y Reploge, J. A. 1984. Portable RBC flumes for furrows and earthen channels. *Trans. ASAE*, 27: 1016-1022.

Cunge, J. A., Holly, F. M., Verwey, A. 1980. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman, Londres.

Domínguez, E. M., Jiménez, R. C., Polo, M. J., Giráldez, J. V. Mateos, L. 2003. Búsqueda de buenas prácticas de fertirriego por surcos: resultados preliminares. *Actas XXI Congreso Nacional de Riegos*, B-5, Mérida (Badajoz).

Eisenhauer, D. E., Varner, D. L., Yonts, C. D., Liesemeyer, W. 1991. *Managing furrow irrigation systems*. Univ. de Nebraska. NebGuide G91-1021.

Elliot, R. L. Walker W. R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE*, 25: 396-400.

Esfandiari, M., Maheshwari, B. L. 2001. Field evaluation of furrow irrigation models. *J. Agric. Enging. Res.*, 79:459-479.

Faci, J. M., Bensaci, A., Slatni, A., Playán, E. 2000. A case study for irrigation modernization I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agric. Water Manag.*, 42:313-334.

FAO. 1988. *Soil Map of the World. Revised Legend*. World Soil Resources Report. FAO. Roma.

7. Bibliografía

Fennema, R. J., Chaudhry, M. H. 1986. Explicit numerical Schemes for unsteady free-surface flows with shocks. *Water Resour. Res.*, 22: 1923-1930.

Fernández-Gómez, R., Mateos, L. y Giráldez, J. V. 2004. Furrow irrigation erosion and management. *Irrig. Sci.*, 23:123-131.

Ferziger, J. H., y Perić, M. 2002. Computational methods for fluid dynamics. 3ª ed. Springer, Berlín.

Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H., 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press. New York.

Gao, B., Walter, M. T., Steenhuis, T. S., Hogarth, W. L., Parlange, J. Y. 2004. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: theory and experiments. *J. Hydrol.*, 295: 1-8.

Gao, B., Walter, M. T., Steenhuis, T. S., Parlange, J. Y., Richards, B. K., Hogarth, W. L., Rose, C. W. 2005. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff. *J. Hydrol.*, 38: 313-320.

García-Navarro, P., Saviron, J. M. 1992. McCormack's method for the numerical simulation of one-dimensional discontinuous unsteady open channel flow. *J. Hydr. Res.*, 30: 95-105.

García-Navarro, P., Playán, E., Zapata, N. 2000. Solute transport modeling in overland flow applied to fertigation. *J. Irrig Drain. Eng.*, 126: 33-40.

García-Navarro, P., Brufau, P. 2001. Métodos numéricos para las ecuaciones de flujo transitorio de lámina libre: Aplicación en hidráulica. Apuntes sin publicar. Zaragoza.

García-Navarro, P., Sánchez, A., Clavero, N., Playán, E. 2004. Calibration model for level furrows. II: Description, Validation, and Application. *J. Irrig Drain. Engng.*, 130: 113-121.

Hamming, R. W. 1973. *Numerical methods for scientists and engineers*. Dover Nueva York.

Havis, R. N., Smith, R. E., Adrian, D. D. 1992. Partitioning solute transport between infiltration and overland flow under rainfall. *Water Resour. Res.*, 10:2569-2580.

Hirsch, C. 2001. *Numerical computation of internal and external flows, vol. I: Computational methods of inviscid and flows*. J. Wiley. Nueva York.

Horst, M. G., Shamutalov, S. S., Pereira, L. S., Gonçalves, J. M. 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agric. Water Manag.*, 77:210-231.

Ibragimov, N., Evett, S. R., Esanbekov, Y., Kamilov, B. S., Mirzaev, L., Lamers, J. P. A. 2007. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation. *Agric. Water Manag.*, 90:112-120.

Izadi, B., King, B., Westermann, D., McCann, I. 1997. Field scale transport of bromide under variable conditions observed in a furrow-irrigated field. *Trans. ASAE.*, 36(6):1679-1685.

James, A. 1993. *An Introduction to Water Quality Modelling*. J. Wiley, Chichester.

Jin, M., Fread, D. L. 1997. Dynamics floods routing with explicit and implicit numerical solution schemes. *J. Hydr. Engng.*, 123:166-173.

7. Bibliografía

Kang, S. Z., Shi, P., Pan, Y. H., Liang, Z. S., Hu, X. T., Zhang, J. 2000. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrig. Sci.*, 19:181-190.

Khatri, K. L., Smith, R. J. 2006. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrig. Sci.*, 25:33-43.

Latif, M., Mahmood, A. S. 2004. Field measurement and simulation of advantage rates for continuous and surge irrigated furrows in Pakistan. *Irrig. and Drain.*, 53:437-447.

Maikaka, M. 2004. *Modelos numéricos unidimensionales en riego por superficie*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.

MAPA. 2006. *Análisis de los regadíos españoles*. Subdirección General de Estadísticas Agroalimentarias, Madrid.

Mateos, L., Oyonarte, N. A. 2005. A spreadsheet model to evaluate sloping furrow irrigation accounting for infiltration variability. *Agric. Water Manag.*, 76:62-75.

Merriam, J. L., Keller, J. 1978. *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*, Utah State Univ., Logan, Utah.

Murillo, J., Burguete, J., Brufau, P., García-Navarro, P. 2005. Coupling between shallow water and solute for equations: analysis and management of source terms in 2D. *Int. J. Num. Meth. In Fluid.*, 49: 267-299.

Murillo, J. 2006. *Two-dimensional finite volume numerical models for unsteady free surface flows, solute transport and erosion/deposition processes*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.

Nofuentes, M., Polo, M. J., Giráldez, J. V. and Mateos, L. 2004. Aspectos temporales de la eficiencia del fertirriego por surcos. *Actas XXII Congreso Nacional de Riegos* (Logroño, 15-17 Junio, 2004), B-12, 10 pp. Logroño.

Oyonarte, N. A., Mateos, L. 2002. Accounting for soil variability in the evaluation of furrow irrigation. *Trans. ASAE*, 45: 85-94.

Playán, E. y Faci, J. M. 1997a. Aplicación de fertilizantes con el riego por superficie: análisis y resultados experimentales. *Riegos y Drenajes XXI*, 93:29-36.

Playán, E. y Faci, J. M. 1997b. Border fertigation: field experiments and simple model. *Irrig. Sci.*, 17:163-171.

Playán, E., A.M.ASCE, Rodríguez, J. A., García-Navarro, P., A.M.ASCE. 2004. Simulation model for level furrows I: Analisis of field experiments. *J. Irrig Drain. Engng.*, 130: 106-112.

Rasoulzadeh, A., Sepaskhah, A. R. 2003. Scaled infiltration equations for furrow irrigation. *Biosyst. Eng.*, 86:375-383.

Rutherford, J. C. 1994. *River Mixing*. J. Wiley, Chichester.

Sabillón, G. N., Merkley, G. P. 2004. Fertigation guidelines for furrow irrigation. *Span. J. Agric. Res.*, 2: 576-587.

Sepaskhah, A. R., Afshar-Chamanabad, H. 2002. Determination of infiltration rate for every-other furrow irrigation. *Biosyst. Eng.*, 82:479-484.

7. Bibliografía

Simunek, J., Sejna, M. Th., van Genuchten, M., 1998. *The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0*, United States Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, California.

Simunek, J., Sejna, M. Th., van Genuchten, M., 1999. *The HYDRUS-2D software package for simulating the two dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0*, IGWMC-TPS-70. International Ground Water Modelling Center, Colorado School of Mines, Golden Colorado.

Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy*, USDA Agr. Hbk. no. 436, 2^a ed., Washington.

Steenhuis, T. S., Walker, M. F. 1980. Closed form solution for pesticide loss in runoff water. *Trans. ASAE*, 23: 615-628.

Steenhuis, T. S., Boll, J., Shalit, G., Selker, J. S., Merwin, I. A. 1994. A simple equation for predicting preferential flow solute concentrations. *J. Environ. Qual.*, 23: 1058-1064.

Strelkoff, T. S., Clemmens, A. J., Perea-Estrada, H. 2006. Calculation of non-reactive chemical distribution in surface fertigation. *Agric. Water Manag.*, 86:93-101.

Taconet, O., Ciarletti, V. 2006. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. *Soil Till. Res.*, 93: 64-76.

Walker, W. R., Skogerboe, G. V. 1987. *Surface irrigation: theory and practice*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Walker, W. R. 1989. *Guideline for designing and evaluating surface irrigation systems*. Irrigation and Drainage Paper No. 45. FAO, Roma.

Walker, W. R. 1993. *SIRMOD, Surface irrigation simulation software*. Utah State University, Logan. Utah.

Walker, W. R. 2002. *SIRMOD II, Surface irrigation simulation, evaluation and design*. User's guide and technical documentation. *Utah State Univ.*, Logan. Utah.

Wallach, R., Jury, W.A., Spencer, W.F. 1989. Transfer of chemicals from soil solution to surface runoff: A diffusion-based soil model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:612-618.

Wallach, R., Van Genuchten, M. T. 1990. A physically based model for predicting solute transfer from soil solution to rainfall-induced runoff water. *Water Resour. Res.*, 26:2119-2126.

Wallach, R. 1991. Runoff contamination by soil chemicals, time scales approach. *Water Resour. Res.*, 27:215-223.

Zangh, X.C., Norton, D., Nearing, M.A. 1997. Chemical transfer from soil solution to surface runoff. *Water Resour. Res.*, 33:809-815.

Zangh, X.C., Norton, D., Nearing, M.A. 1999. Coupling mixing zone concept with convection-diffusion equation to predict chemical transfer to surface runoff. *Trans. ASAE*, 42: 987-994.

Zapata, N. y Playán, E. 2000. Elevation and infiltration in a level basin. I. Characterizing variability. *Irrig. Sci.*, 19:155-164.

Zapata, N., García-Navarro, P., Burguete, J., Maikaka, M., González, S. 2005. Calibración y validación de un modelo de fertirriego en surcos. Primeros resultados. *Actas XXIII Congreso Nacional de Riegos* (Elche, 14-16 Junio, 2005), C-07. Elche.

7. Bibliografía

Zapata, N., Burguete, J., Santos, E. P., Playán, E., García-Navarro, P. 2007. Furrow fertigation simulation model, calibration, validation and application. *International Workshop on Numerical modelling of hydrodynamics for water resources* (18-21 Junio, 2007), pp.: 339-343. Zaragoza.

Zerihun, D., Sánchez, C. A., Farrell-Poe, K. L., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J. 2003. Performance indices for surface N fertigation. *J. Irrig Drain. Engng.*, 129: 173-183.

Zerihun, D., Furman, A., Warrick, A. W., Sánchez, C. A. 2005a. Coupled surface-subsurface solute transport model for irrigation borders and basins. I. Model development. *J. Irrig Drain. Engng.*, 131: 396-406.

Zerihun, D., Furman, A., Warrick, A. W., Sánchez, C. A. 2005b. Coupled surface-subsurface solute transport model for irrigation borders and basins. II. Model evaluation. *J. Irrig Drain. Engng.*, 131: 407-419.

Anejos

Anejo I.

Calibración de los conductímetros.

Se presentan en este anejo el ajuste de las curvas que relacionan la Conductividad Eléctrica, medida con los conductímetros, con la concentración del trazador utilizado en los ensayos. Cada conductímetro tiene su curva característica y diferente para cada trazador.

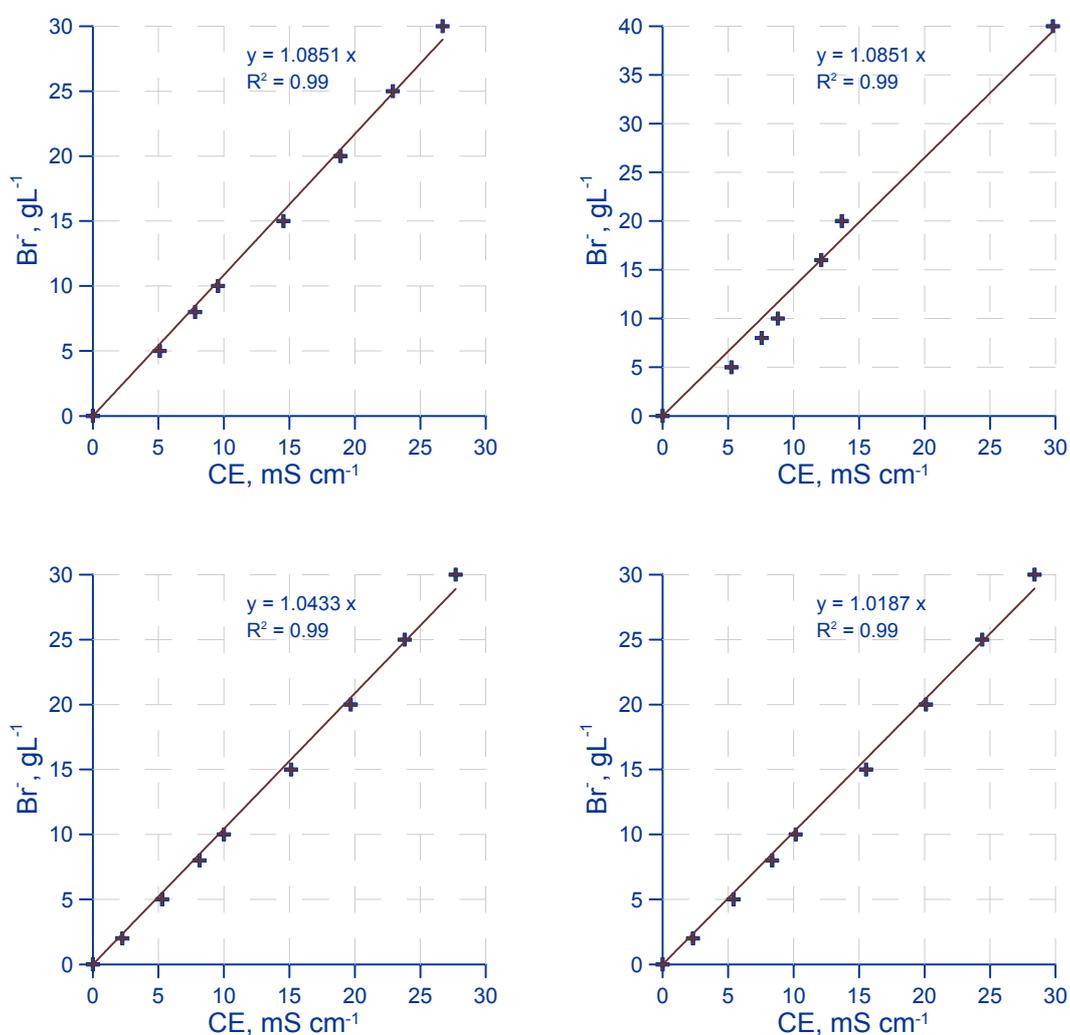


Figura II.1a. Curvas de calibración para el trazador bromuro, correspondientes a los conductímetros utilizados en las estaciones 1 a 4 respectivamente.

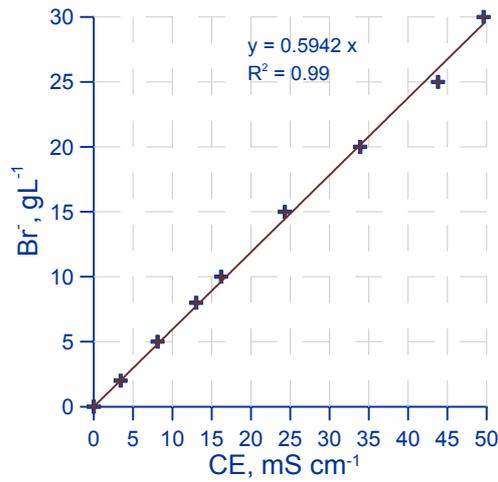


Figura II.1b. Curvas de calibración para el trazador bromuro, correspondiente al conductímetro utilizado en la estación 5.

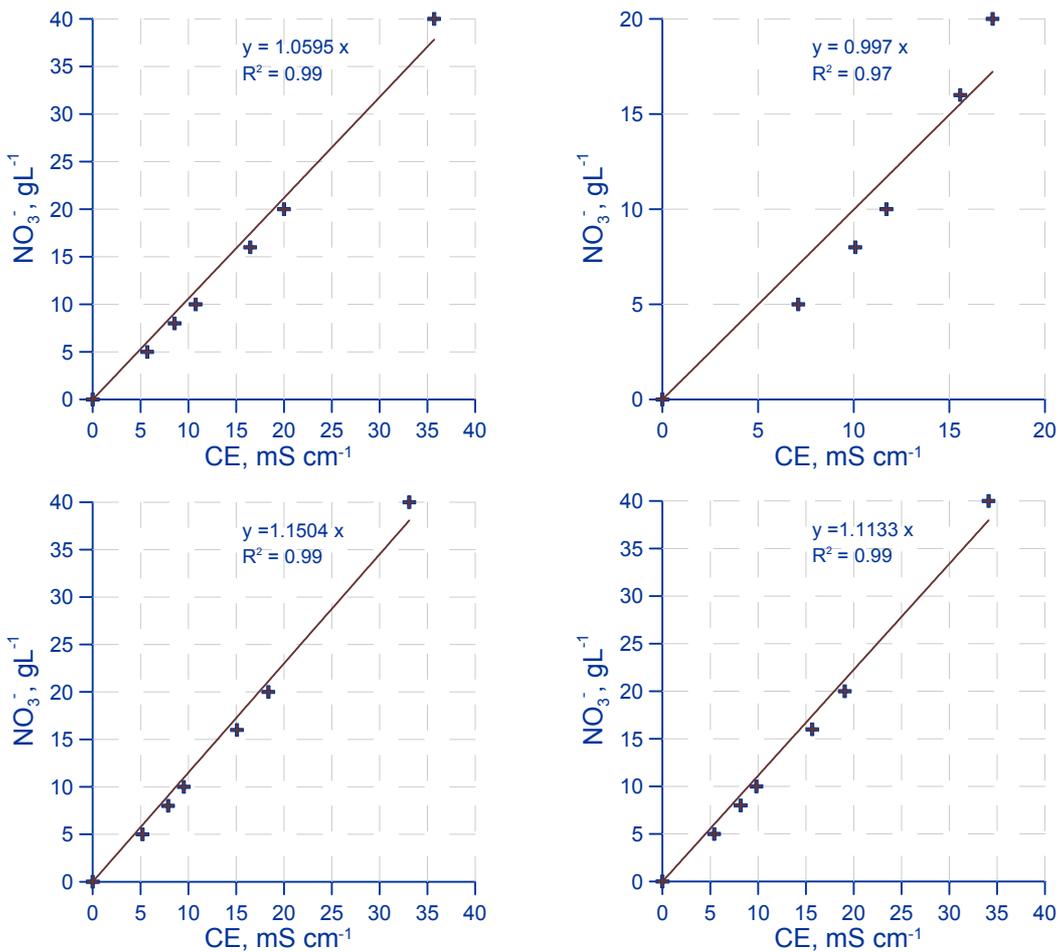


Figura II.2a. Curvas de calibración para el trazador nitrato, correspondientes a los conductímetros utilizados en las estaciones 1 a 4 respectivamente.

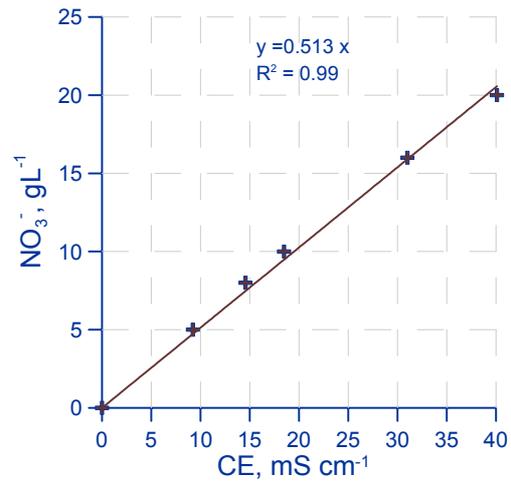


Figura II.2b. Curvas de calibración para el trazador nitrato, correspondiente al conductímetro utilizado en la estación 5.

Anejo II.

Perfiles transversales de los surcos

A continuación se presentan las medidas tomadas con el perfilómetro de varillas en las estaciones de medida después de cada ensayo.

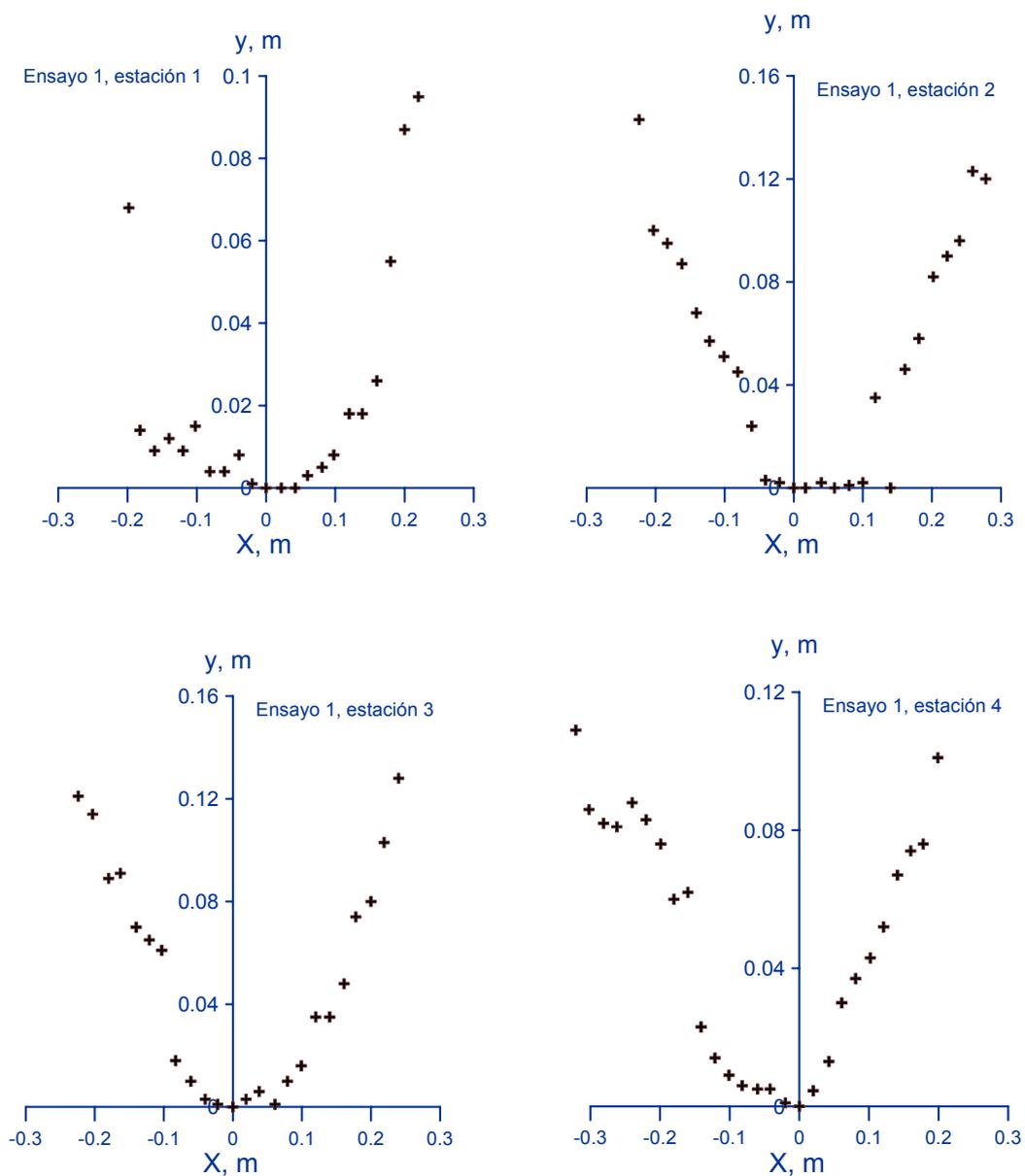


Figura I.1a. Perfiles transversales correspondientes a las estaciones de medida, ensayo1.

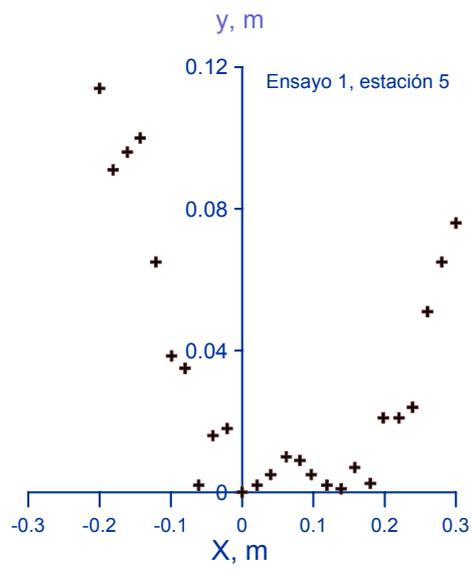


Figura I.1b. Perfiles transversales correspondientes a las estaciones de medida, ensayo1.

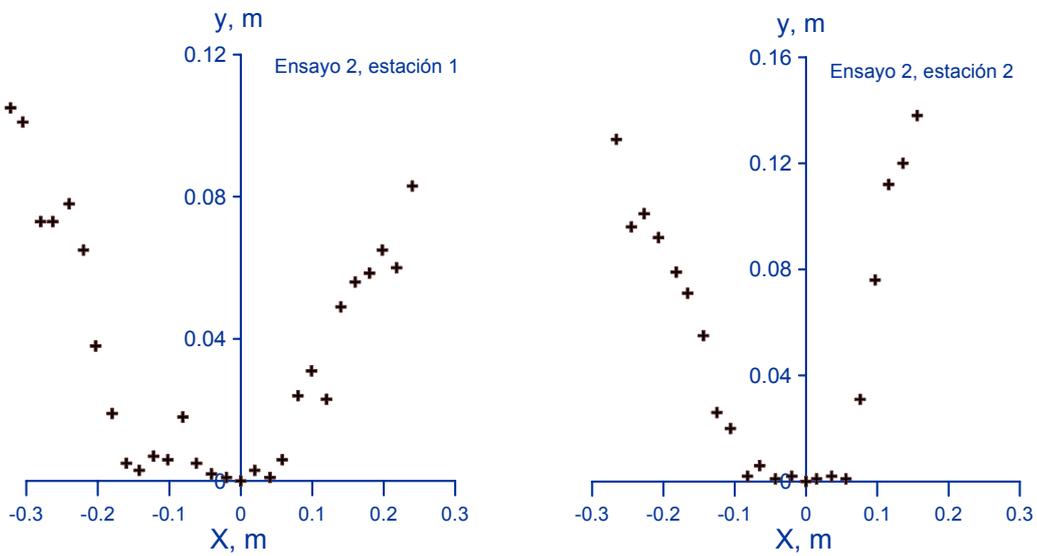


Figura I.2a. Perfiles transversales correspondientes a las estaciones de medida, ensayo2.

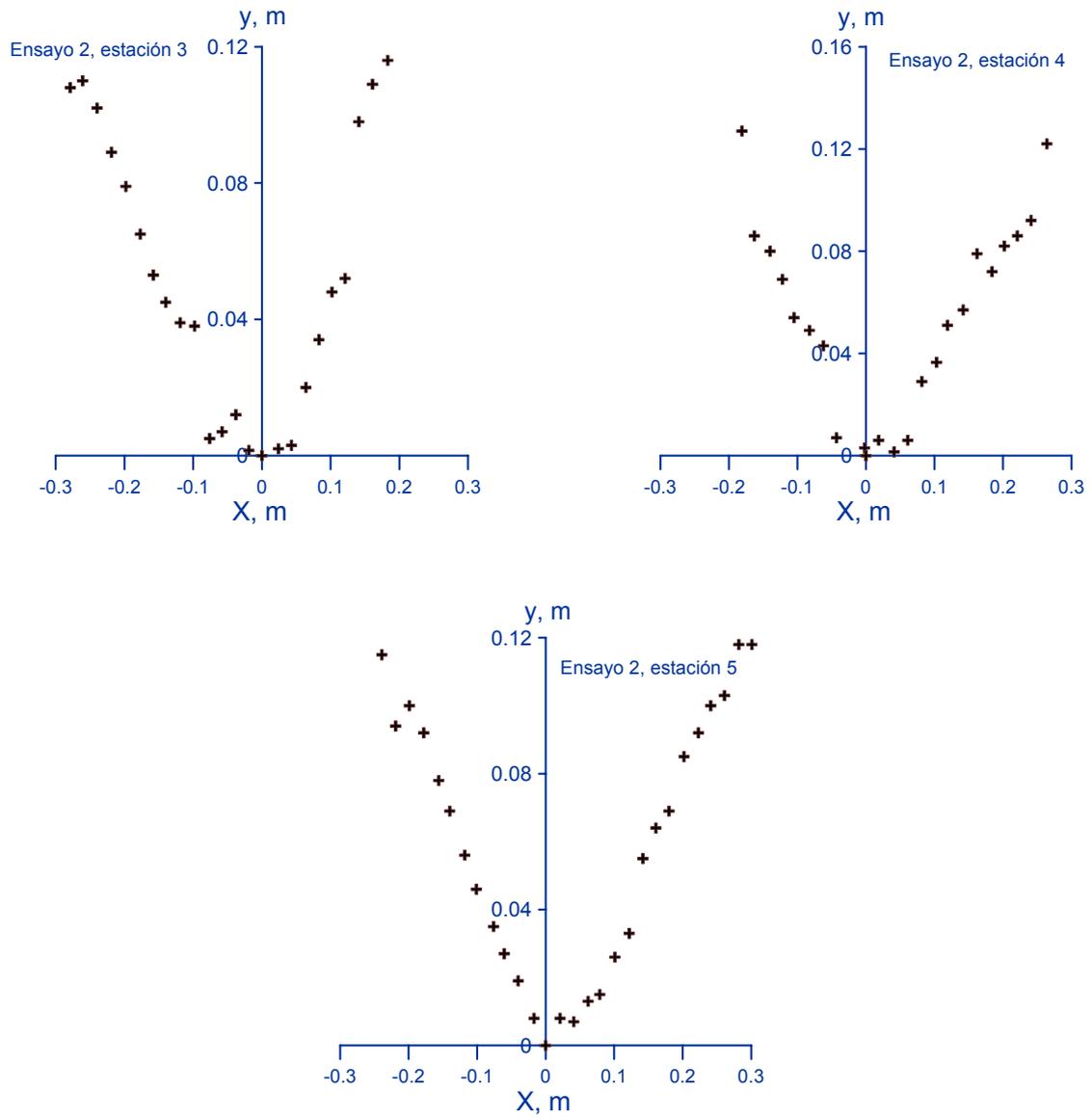


Figura I.2b. Perfiles transversales correspondientes a las estaciones de medida, ensayo 2.

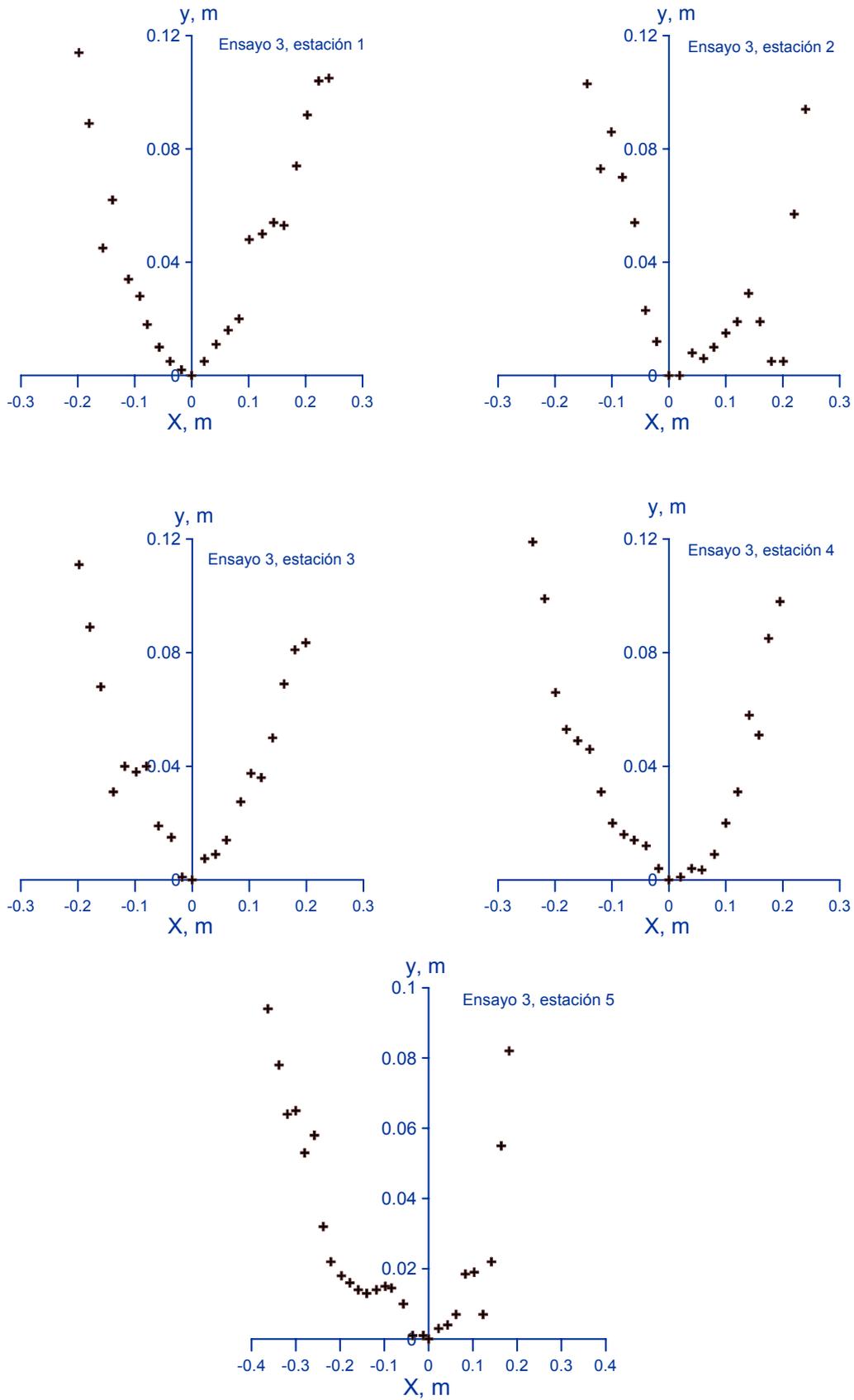


Figura I.3. Perfiles transversales correspondientes a las estaciones de medida, ensayo3.

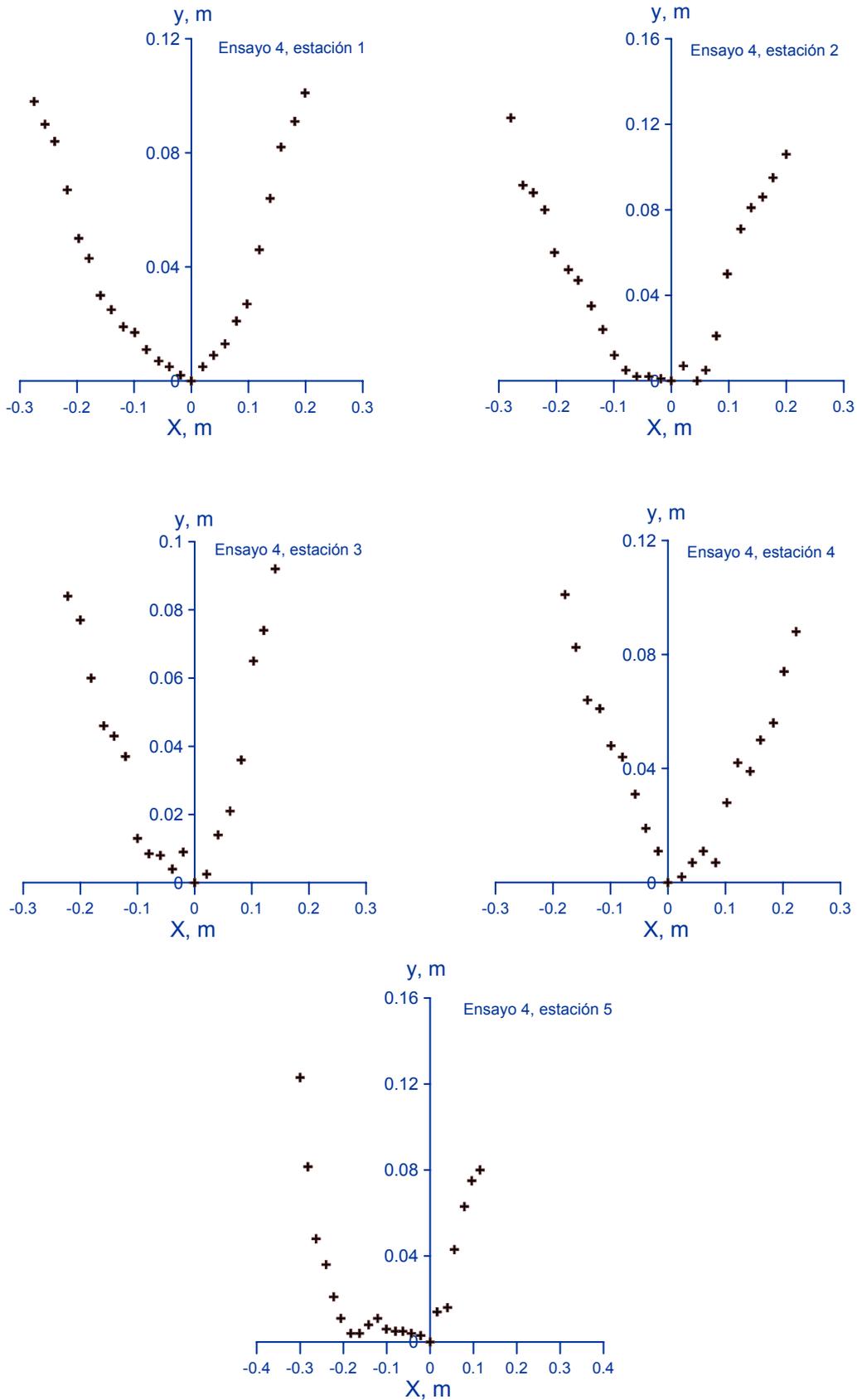


Figura I.4. Perfiles transversales correspondientes a las estaciones de medida, ensayo4.

Anejo III.

Método para la determinación potenciométrica de bromuro en suelo con electrodo selectivo de iones (E.S.I)

III.1. Preparación de reactivos

- ✓ Disolución de ajuste o de la fuerza iónica (AFI) o (ISA):

NO_3Na (5M), se pesan 212.5 g y se enrasa a 500 ml con agua destilada

- ✓ Disolución de NO_3Na (0.2 M) para añadir al suelo

Se pipetea 40 ml de disolución NO_3Na (5M) y se enrasa a 1000 ml con agua destilada

- ✓ Disolución patrón de BrK.

Se necesita BrK (0.5 molL^{-1}). Se pesan 2.97 g y se enrasa a 50 ml con agua destilada. A partir de esta disolución se obtendrán las de calibración con las siguientes concentraciones: 0.1 molL^{-1} , 0.01 molL^{-1} , 0.001 molL^{-1}

III.2 Método inicial aplicado

- ✓ Pasos a seguir en el método con agua destilada:

- Pesar 20 g de suelo y añadir 100 ml de agua destilada o 40 g en 200 ml.

Anejo III. Método para la determinación potenciométrica de bromuro en el suelo con E.S.I

- 1 hora en agitación.
- Filtración con papel de filtro Whatman 125 mm Dia -Cualitativo.
- Añadir 1 ml de solución AFI ó ISA.
- Llevar y enrasar a 50 ml
- Medir pH.
- Medir ppm.

Las medidas de pH y ppm se realizan con el pH-metro de laboratorio GLP 22

Lista de símbolos

a	Parámetro empírico de la ecuación de infiltración	
A	Área de la sección transversal en la dirección del flujo de agua	$[L^2]$
A_0	Sección transversal en la cabecera del surco	$[L^2]$
A_1	Área correspondiente al primer nodo de la malla	$[L^2]$
A_{inf}	Área infiltrada acumulada en cualquier nodo de la malla	$[L^2]$
b	Anchura del lecho del surco	$[L]$
c	Concentración instantánea de sustancia	$[ML^{-3}]$
\bar{c}	Concentración media de soluto en un período cualquiera	$[ML^{-3}]$
\bar{c}_i	Concentración media de soluto en un período cualquiera en una posición cualquiera del surco	$[ML^{-3}]$
cel	Celeridad	$[LT^{-1}]$
C	Concentración promediada en la sección transversal	$[ML^{-3}]$
C_1	Parámetro que relaciona la sección en cabecera con el caudal de entrada	
C_2	Parámetro que relaciona la sección en cabecera con el caudal de entrada	
D_l	Coficiente de dispersividad longitudinal	$[L]$
D_m	Coficiente de difusión molecular	$[L^2T^{-1}]$
e_x	Coficiente de difusión turbulenta en la dirección x del espacio	$[L^2T^{-1}]$
e_y	Coficiente de difusión turbulenta en la dirección y del espacio	$[L^2T^{-1}]$
e_z	Coficiente de difusión turbulenta en la dirección z del espacio	$[L^2T^{-1}]$
E	Coficiente de dispersión longitudinal	$[L^2T^{-1}]$
f_0	Velocidad de infiltración estabilizada	$[LT^{-1}]$
F_i^m	Variable cualquiera, el subíndice indica la posición y el superíndice el tiempo al que corresponde su cálculo	
g	Aceleración de la gravedad	$[LT^{-2}]$
h	Calado	$[L]$
H	Lámina de agua infiltrada	$[L]$
H_r	Lámina de agua requerida	$[L]$
J_r	Flujo másico de sustancia en la dirección r	
k	Parámetro de la ecuación de infiltración	$[LT^{-a}]$

K	Constante cinética de primer orden de reacción química	$[T^{-1}]$
l	Longitud máxima de surco	$[L]$
l'	Longitud en la que el flujo es uniforme	$[L]$
$l_{1/2}$	Longitud de la mitad del surco	$[L]$
Me	Masa de fertilizante que entra en el surco	$[M]$
Ms	Masa de fertilizante que sale del surco	$[M]$
\overline{M}_{25}	Masa media de fertilizante que se infiltra en el menor cuarto de surco	$[M]$
\overline{M}_t	Masa media de fertilizante que se infiltra en todo el surco	$[M]$
n	Coficiente de rugosidad de Manning	$[TL^{-1/3}]$
N	Número total de nodos de la malla	
P	Perímetro mojado	$[L]$
P'	Separación entre surcos	$[L]$
Pe	Número de Péclet	
Q	Caudal circulante	$[L^3T^{-1}]$
Ql	Área infiltrada por unidad de tiempo	$[L^2T^{-1}]$
Q_N	Caudal correspondiente al último nodo de la malla	L^3T^{-1}
Q_{N-1}	Caudal correspondiente al penúltimo nodo de la malla	L^3T^{-1}
Q_s	Caudal de salida	$[L^3T^{-1}]$
Q_0	Caudal de entrada	$[L^3T^{-1}]$
Q_2	Caudal en el segundo nodo de la malla	$[L^3T^{-1}]$
r	Cualquier dirección del espacio	
r'	Parámetro empírico	
Ra_{fert}	Rendimiento de aplicación de fertilizante	
R_b	Radio hidráulico	$[L]$
S_f	Pendiente de fricción	$[LL^{-1}]$
S_0	Pendiente del lecho	$[LL^{-1}]$
t_a	Tiempo de avance	$[T]$
t_c	Tiempo de corte	$[T]$
t_d	Duración de la aplicación	$[T]$
t_f	Tiempo en el que se estabiliza la velocidad de infiltración	$[T]$
t_i	Tiempo de inicio	$[T]$
$t_{1/2}$	Tiempo que tarda el frente de agua en alcanzar la mitad del surco	$[T]$
t_{op}	Tiempo de oportunidad	$[T]$

t_r	Tiempo de receso	[T]
t_v	Tiempo de vertido	[T]
u	Componente horizontal del vector velocidad	[L T ⁻¹]
u_x	Velocidad media en la dirección longitudinal	[L T ⁻¹]
u_y	Velocidad media en la dirección vertical	[L T ⁻¹]
u_z	Velocidad media en la dirección transversal	[L T ⁻¹]
U	Velocidad media en la sección transversal	[L T ⁻¹]
U_0	Velocidad de referencia	[L T ⁻¹]
UD_{fert}	Uniformidad de distribución de Merriam y Kéller	
UD_{fertII}	Uniformidad de distribución de Christiansenn	
v	Componente vertical del vector velocidad	[L T ⁻¹]
V_l	Volumen de agua por unidad de longitud que alcanza el final del surco	[L ³]
$V_{l/2}$	Volumen de agua por unidad de longitud que alcanza la mitad del surco	[L ³]
w	Componente transversal del vector velocidad	[L T ⁻¹]
W	Carga de masa de soluto en el flujo de agua	[M T ⁻¹]
W_0	Carga inicial de masa de soluto en el flujo de agua	[M T ⁻¹]
z	Tasa de infiltración	[L T ⁻¹]
Z	Volumen de agua infiltrada por unidad de longitud de surco	[L ³ L ⁻¹]
β	Tasa de transferencia	[T ⁻¹]
γ_1	Parámetro empírico	
γ_2	Parámetro empírico	
Δt	Incremento del tiempo	[T]
Δx	Incremento del espacio	[L]
θ	Índice que indica si la discretización es explícita, implícita o semi-implícita	
σ_y	Factor de forma de almacenamiento superficial	
σ_z	Factor de forma de almacenamiento subsuperficial	
σ_1	Parámetro empírico	
σ_2	Parámetro empírico	