

DESPLAZAMIENTO DE SUELO Y SUSTANCIAS AGROQUÍMICAS POR LA EROSIÓN EN OLIVARES

Jiménez-Hornero, F.J.¹, J.V. Giráldez² y A. Laguna³.¹ Dpto. Agronomía, Universidad de Córdoba (España). e-mail: ir2jihof@uco.es² Dpto. Agronomía, Universidad de Córdoba (España). e-mail: agl_gicej@uco.es³ Dpto. Física, Universidad de Córdoba (España) e-mail: fallalua@uco.es

RESUMEN. La presencia de obstáculos como árboles, piedras o postes en una ladera condiciona la distribución de los componentes del suelo y de los contaminantes en su superficie. En este trabajo se exponen algunos métodos de estudio de esta modificación inducida por obstáculos. Tras repasar algunas propuestas sugeridas principalmente por el arrastre de partículas por los aperos agrícolas en medios uniformes, se introducen unos esquemas sencillos para analizar la influencia de las barreras en la dispersión del material aportado externamente. El uso del tiempo de viaje, obtenido a partir de las ecuaciones del flujo potencial sobre la superficie del suelo, proporciona unos patrones de concentración que se asemejan a distribuciones de nutrientes observadas en Edafología.

ABSTRACT. The presence of obstacles like tree, stones or posts in a slope modifies the spatial distribution of soil components and pollutants. In this report several methods of analysis of obstacle-induced concentration distribution are discussed. Tillage and water erosion displacement, one important redistribution agent, has been modeled using the convection equation, but in absence of any disturbance in the field. Some simple solutions are introduced like the use of solute travel time from the stream function of potential flow around a cylindrical obstacle. The resulting concentration patterns are similar to the nutrient distribution patterns around trees found in the literature.

1.- Introducción

El olivar es el cultivo más extendido en Andalucía. Gran parte del mismo se encuentra situado en zonas con elevada pendiente, lo que unido a la concentración de lluvias en el otoño, cuando la cubierta vegetal es escasa, causa apreciables pérdidas de suelo por la erosión. La agricultura contribuye también a la pérdida de suelo por el desplazamiento directo de los aperos, fenómeno conocido como erosión mecánica. Al tiempo que se mueve el suelo se dispersan en él los productos adsorbidos o precipitados, provocando una contaminación difusa de gran repercusión ambiental.

Se han analizado los patrones de distribución de suelo o de solutos originados por el arrastre hídrico o mecánico en condiciones uniformes. Así, Sibbesen *et al.* (1985) y Sibbesen y Andersen (1985) determinaron la redistribución de un soluto tras varios pases de labor basándose en que la

probabilidad de encontrar una partícula de soluto a una distancia determinada puede ser estimada por la distribución normal.

Como consecuencia de los estudios de desplazamiento de partículas de suelo por los aperos agrícolas realizados por varios autores (Govers *et al.*, 1994; De Alba, 1998; Van Muysen *et al.*, 1999; Lindstrom *et al.*, 2000) se acepta que el proceso puede ser descrito por una ecuación de difusión lineal, cuya constante recoge características tanto de suelo como del apero y de su forma de actuación. Aunque estos trabajos no tienen en cuenta la presencia de obstáculos, la redistribución de suelo obtenida al aplicar la ecuación de difusión lineal en una plantación de árboles regularmente dispuestos, presenta una tipología similar a la recogida en la figura 1, que representa la simulación de dos pases cruzados de cultivador en dirección N-S y E-O durante 25 años. Para el apero se considera una constante de difusión de 40.5 kg m^{-1} . Las zonas oscuras se corresponden con pérdidas de suelo, mientras que las claras son acumulaciones. Siguiendo la pendiente descrita por las curvas de nivel, las primeras se disponen aguas abajo del obstáculo y las segundas aguas arriba.

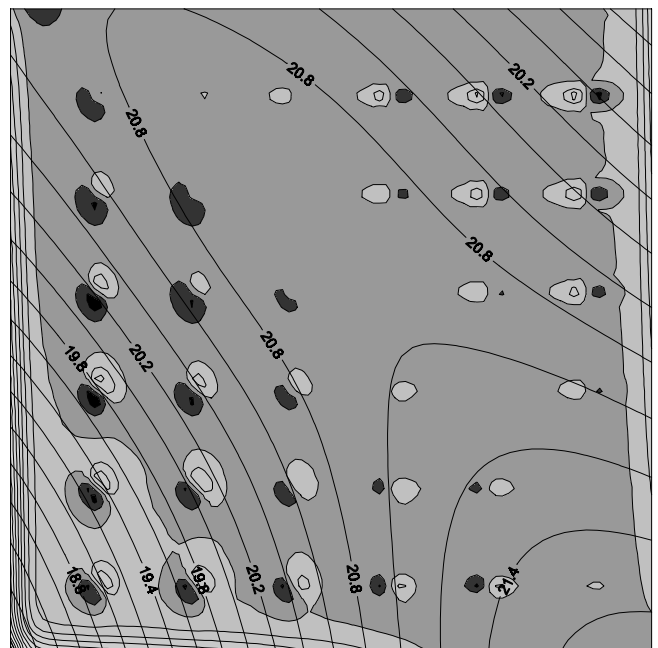


Fig. 1. Simulación de las acumulaciones y pérdidas en m. de suelo originadas por dos pases cruzados de cultivador en una plantación leñosa tras 25 años.

Siguiendo la idea de Lobb *et al.* (1995) de aplicar la ecuación de convolución para caracterizar la translocación de partículas de suelo durante las labores agrícolas, en la que la función de respuesta era similar al hidrograma unitario instantáneo de la Hidrología, Van Oost *et al.* (2000) introdujeron una función de distribución de probabilidad normal o gaussiana sesgada, de tal modo que originaba patrones de concentración asimétricos, a diferencia de los presentados por Sibbesen *et al.* (1985). Sin embargo, en ninguno de estos trabajos se considera la presencia de obstáculos.

Desde otra perspectiva Culling (1983) planteó una ecuación de difusión-advección, o difusión-convección, para la descripción del relieve formado en el entorno de un obstáculo circular, como un árbol o poste. Para ello estableció una condición de contorno de barrera circular o elíptica en torno al árbol consiguiendo una solución similar a la previa de Carslaw y Jaeger (1959, cap. 15.2). La complejidad de su solución dificulta la inmediata aplicación de la integral de convolución similar a la empleada por Lobb *et al.* (1985) o Van Oost *et al.* (2000).

Una vía alternativa puede ser la presentada por Jury (1975) para estimar el efecto de las trayectorias que recorre el agua evacuada por un suelo bajo riego, camino del tubo de avenamiento de donde se estima el tiempo de viaje del soluto en el suelo. A consecuencia de la demora del flujo de agua que circula por los tubos de corriente, se retrasa mucho la dilución de los pulsos de contaminante, en su caso nitratos, en el suelo. Aplicando la misma idea al flujo potencial del agua en un plano inclinado con un obstáculo, se puede obtener una distribución espacial de los componentes del suelo.

2.- Materiales y métodos

Si se asimila el flujo de suelo alrededor de un árbol al del agua en un plano en el que emerge un obstáculo de forma cilíndrica, dicho flujo queda determinado por: 1) la forma geométrica del obstáculo, 2) la distancia al mismo y 3) la velocidad de flujo. Aunque este tipo de flujos irrotacionales con un fluido inviscido presentan algunas complicaciones en su interpretación, proporcionan una buena aproximación a situaciones reales como la planteada (e.g. Batchelor, 1967, cap. 6.1). La solución en forma de la función de corriente y $[L^2T^{-1}]$ para el caso en que la sección del obstáculo sea circular, viene dada por (Milne-Thomson, 1968, cap. 6.22)

$$\psi = Ur \sin \theta \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (1)$$

siendo $U [LT^{-1}]$ la velocidad del flujo en el infinito, donde no se advierte la influencia del obstáculo, (r, θ) las coordenadas cilíndricas radial y angular, respectivamente y $a [L]$ el radio del obstáculo. Las líneas de corriente aparecen en la figura 2.

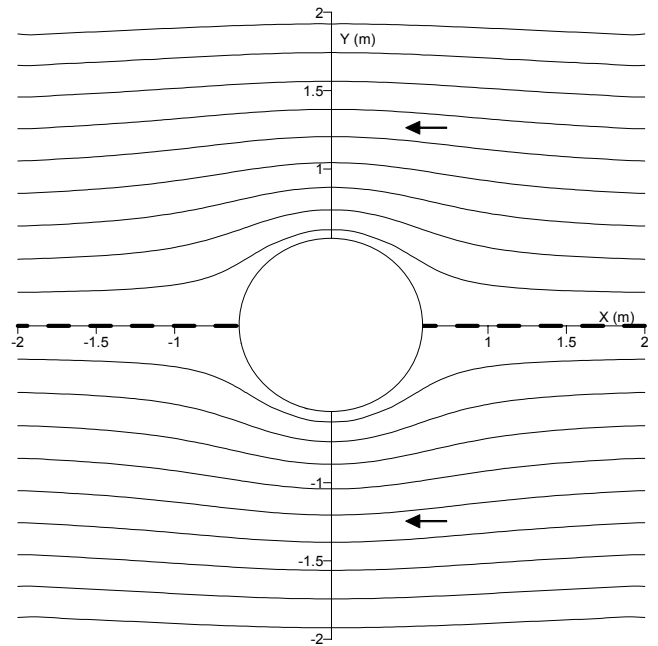


Fig. 2. Líneas de corriente que describen el flujo alrededor de un obstáculo circular.

Las flechas indican la dirección del flujo. En este caso el eje X es la línea de estancamiento (línea a trazos) en la que el flujo es cero.

Si como ocurre frecuentemente en la naturaleza, la sección en la planta del árbol no es circular, por ejemplo en el caso de varios troncos de olivos, se puede recurrir a la solución para un obstáculo de planta elíptica (Milne-Thomson, 1968, cap. 6.33) que, expresada en coordenadas cilíndricas elípticas (ξ, η) , adopta la forma:

$$\psi = U(a+b) \sinh(\xi - \xi_0) \sin(\eta - \alpha) \quad (2)$$

donde α es el ángulo formado por la dirección del flujo y el eje X, a es el semieje mayor y b el menor de la elipse que determina la planta del obstáculo. El valor de ξ_0 se define como:

$$\xi_0 = 0.5 \ln \frac{a+b}{a-b} \quad (3)$$

En el nuevo sistema de coordenadas cada punto viene definido por la intersección de una elipse y una hipérbola confocales, la primera determinada por el parámetro ξ , cuya expresión es análoga a (3), y la segunda por η que representa el ángulo de la asíntota de la hipérbola con el eje X cartesiano. La relación con las coordenadas cartesianas es la mostrada en (4)

$$\begin{aligned} x &= c \cosh \xi \cos \eta \\ y &= c \sinh \xi \sin \eta \\ \xi_0 &\leq \xi \leq \infty \text{ y } 0 \leq \eta \leq 2\pi \end{aligned} \quad (4)$$

donde c es la semidistancia entre los focos del sistema.

$$c = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (5)$$

La figura 3 muestra la expresión (2) para un valor de α igual a $\pi/2$. En esta ocasión es el eje Y el que coincide con la línea de estancamiento.

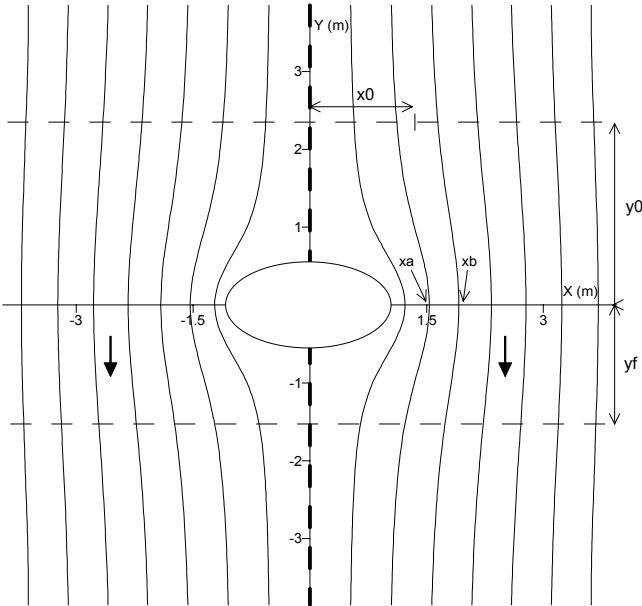


Fig. 3. Líneas de corriente que describen el flujo alrededor de un obstáculo elíptico con a igual a $\pi/2$.

Una vez conocida la forma que las líneas de corriente adoptan en presencia de un obstáculo, el siguiente paso es determinar la evolución en el tiempo y en el espacio del patrón de distribución de una sustancia agroquímica depositada aguas arriba de la barrera y que es arrastrada por el flujo. Para ello se ignorarán las reacciones del soluto con el suelo y con las plantas.

Inicialmente se proporciona un aporte o pulso de una sustancia con concentración C_0 durante un tiempo finito t_0 , en un punto concreto (x_0, y_0) tomando como referencia el centro del obstáculo (fig. 3). Las cuestiones que deben ser resueltas son: 1) cuánto tiempo tarda en llegar el soluto a una distancia cualquiera y_f ($y_0 > y_f$) también referenciada al centro del obstáculo y 2) cuál es la concentración en esa distancia y_f en un tiempo cualquiera t [T] ($t > t_0$).

Siguiendo a Jury (1975), el tiempo de viaje (Δt_{12}) [T] entre dos puntos 1 y 2 dentro del mismo tubo de corriente definido por dos líneas de corriente adyacentes, se calcula como:

$$\Delta t_{12} = \frac{v_{12}}{R \Delta x} \quad (6)$$

en donde v_{12} [L^2] es el volumen de tubo de corriente, R [LT^{-1}] el aporte de soluto por unidad de superficie y Δx [L] es la distancia entre los puntos de intersección de las líneas de corriente con el eje X.

Por consiguiente, es necesario realizar el cálculo del área comprendida entre cada par de líneas de corriente que

definen un tubo y las ordenadas y_0 (lugar en el que se aporta la sustancia) e y_f (lugar en el que se desea medir el tiempo de viaje), para posteriormente relacionarlo con el punto medio del segmento comprendido entre los dos puntos de intersección (x_a, x_b) de las dos líneas de corriente que definen cada tubo con el eje X. De esta forma se consigue una curva que determina el tiempo de viaje (t_v) entre dos puntos pertenecientes al mismo tubo de corriente, separados la distancia $y_0 - y_f$ en el eje Y para una sustancia depositada a una distancia x_0 en el eje X. Con esto la primera cuestión planteada está resuelta.

La respuesta a la segunda se basa usar la curva anteriormente obtenida que relaciona t_v con la distancia x_0 . Las dos situaciones con que se pueden encontrar para un tiempo t son:

1. $t < t_v$ con lo que el soluto no ha recorrido la distancia $y - y_f$.
2. $t \geq t_v$ el soluto ha recorrido la distancia $y - y_f$ y, por tanto, pueden darse cuatro casos:
 - a) $t - t_v = 0$, el frente de la mancha de soluto pasa por la ordenada y_f .
 - b) $t - t_v < t_0$, un punto intermedio entre el frente y la cola de la mancha pasa por y_f .
 - c) $t - t_v = t_0$, con lo que la cola de la mancha pasa por y_f .
 - d) $t - t_v > t_0$, la mancha de soluto ya ha pasado por y_f .

Así, si en la ordenada y_0 , en un número n_0 de tubos de corriente tienen la concentración C_0 , en la ordenada y_f la concentración C_f tendrá la expresión:

$$C_f = C_0 \frac{n_f}{n_0} \quad (7)$$

en la que n_f es el número de tubos de corriente que poseen una concentración C_0 en la ordenada y_f .

Por lo tanto, para cada ordenada y_f se debe obtener la curva $x - t_v$, y en base a ella determinar el número de tubos de corriente que en el instante t poseen una concentración C_0 para así conocer la concentración C_f .

3.- Resultados y discusión

La figura 3 representa el caso para el que se analizó la distribución espacial y temporal de una sustancia aportada a razón de $R = 0.05$ m/año a una distancia $y_0 = 2$ m durante un tiempo $t_0 = 0.5$ años, y arrastrada por un flujo de velocidad media $U = 0.3$ m/año y dirección $\alpha = \pi/2$ que rodea a un obstáculo de sección elíptica con semieje mayor $a = 1$ m y semieje menor $b = 0.5$ m. Aplicando (2) y (6), a la ordenada $y_f = -1$ m se obtiene la figura 4, en la que se puede observar como para distancias x próximas a cero, t_v se incrementa notablemente debido a la cercanía de la línea de estancamiento.

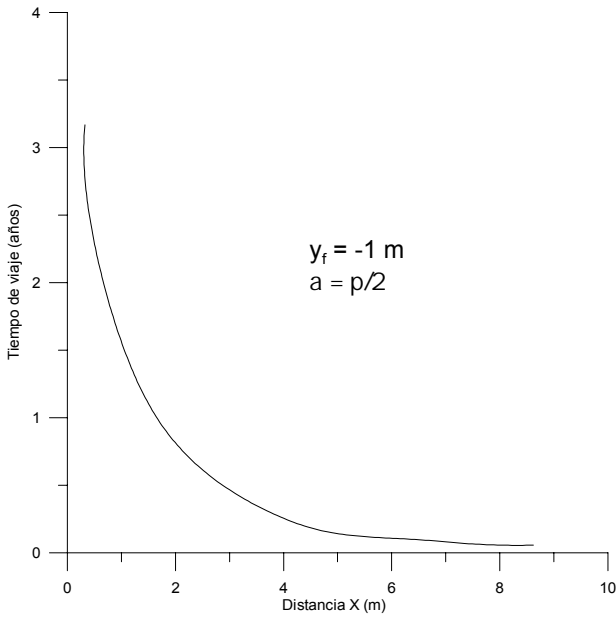


Fig. 4. Curva $x - t_v$ obtenida para la ordenada $y_f = -1$ m y $a = p/2$

La influencia de la dirección del flujo (a) en la forma de la curva $x - t_v$ es notable al modificarse la posición de la línea de estancamiento (línea a trazos) como se puede apreciar en la figura 5, en la que $a = p/4$.

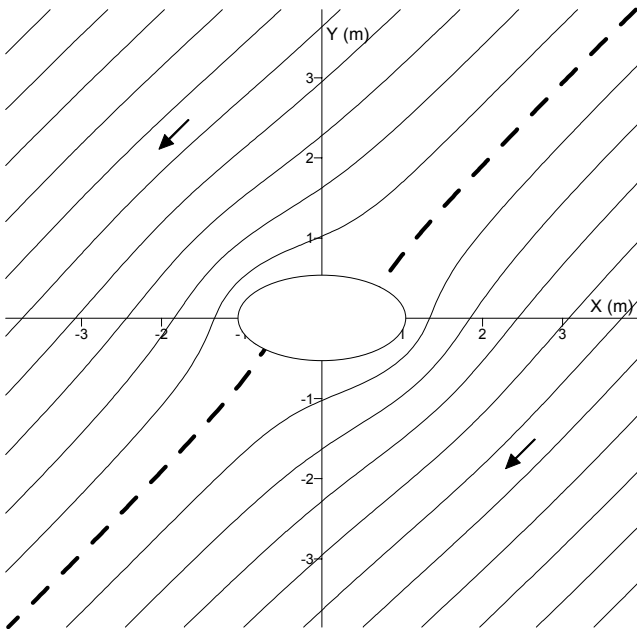


Fig. 5. Líneas de corriente que describen el flujo alrededor de un obstáculo elíptico con a igual a $p/4$.

Con la nueva disposición de las líneas de corriente para la ordenada $y_f = -1$ m, con los mismos valores antes empleados se obtiene la curva $x - t_v$ mostrada en la figura 6 en la que la línea de trazos muestra la abscisa para la que t_v es infinito, es decir la coordenada x del punto de intersección de la línea de estancamiento con y_f .

Regresando de nuevo a la situación planteada en la figura 3 y aplicando los diferentes casos producidos por los

valores de t , t_v y t_0 , se obtiene la figura 7 que muestra los patrones de distribución espacial y temporal del soluto (color negro) alrededor del obstáculo, considerando para t , expresado en años, los valores indicados en la misma figura.

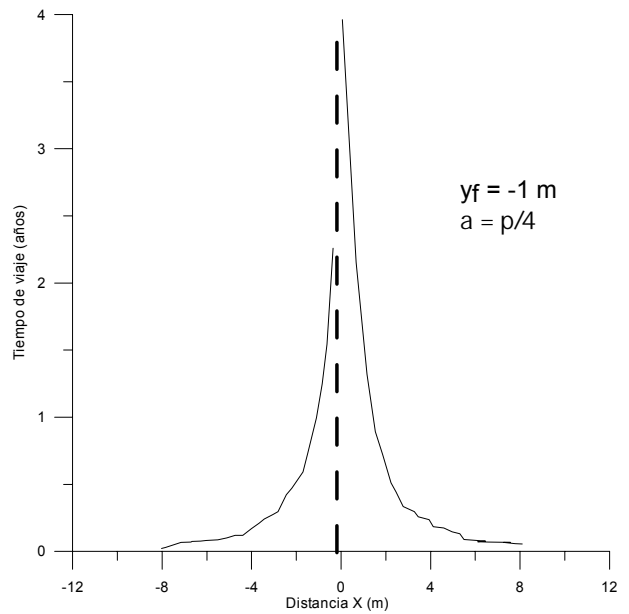


Fig. 6. Curva $x - t_v$ obtenida para la ordenada $y_f = -1$ m y $a = p/4$.

En la figura 7, se puede observar que hasta valores de t iguales a $t_0 = 0.5$ años (fase de aporte de la sustancia), el soluto va ocupando las zonas situadas a una mayor distancia x aguas arriba del obstáculo, bordeando al mismo. Al superar el tiempo t el valor de t_0 comienza la desaparición del soluto de dichas zonas, apareciendo en aquellas más cercanas a la barrera conforme el valor de t es mayor, debido a que estas regiones tienen un tiempo de viaje mayor que las inicialmente ocupadas (fig. 4). Es también esta circunstancia la que provoca que con valores de t altos, por ejemplo 9 años, se observe un leve rastro de soluto a distancias x pequeñas situadas aguas abajo del obstáculo.

La distribución obtenida es semejante a la descrita por Philip *et al.* (1989) en su análisis de la exclusión de percolación por poros u obstáculos opacos en el interior del suelo, con la diferencia que supone la inclusión de la difusión en el proceso.

La distribución de la concentración de nutrientes en condiciones naturales está condicionada por los troncos como es patente en la figura 10-2 del libro de Birkeland (1974, cap. 10). En esta figura se muestra la distribución del pH y la concentración de N alrededor de un pino (*Pinus contorta*) que crece en una duna arenosa. La influencia de la copa es evidente en tal distribución aunque también lo es la asimetría de la misma, similar a la figura 7, al contrario del esquema mostrado en la fig.3 de Garner y Steinberger (1989). Otros autores han detectado la influencia del árbol como resume Jenny (1980, cap. 13), y, más recientemente, Van Miegroet *et al.* (2000) en las llamadas islas de árboles, o incluso de fertilidad, en ambientes áridos y semiáridos.

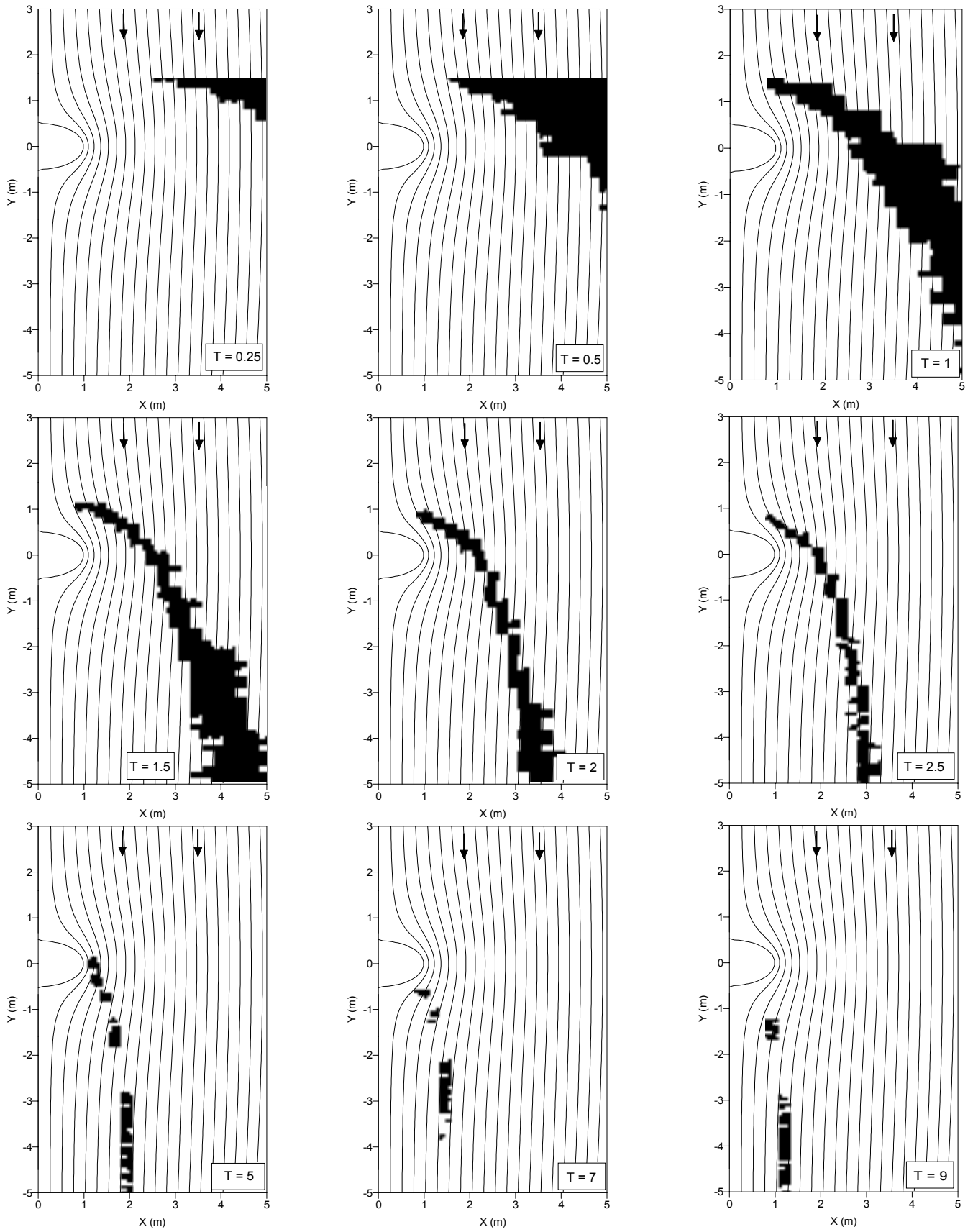


Fig. 7. Evolución de la distribución de soluto alrededor del obstáculo.

En general, la concentración de nutrientes o contaminantes no es muy importante, dependiendo de la capacidad del suelo para amortiguar el cambio, como no lo era en el caso del suelo de duna comentado por Birkeland, pero en algunas circunstancias la acumulación de agroquímicos puede acarrear otros problemas como son los sedimentos con simazina que llegan a cultivos herbáceos aguas abajo de la parcela fuente.

También es preciso reconocer que la influencia de la copa, bien por translocación o bien por goteo diferido, como por la escorrentía cortical, puede modificar la distribución de sustancias en torno al tronco del árbol. En algunos olivares es frecuente una labor de compactado en el ruedo del árbol, que es la superficie situada debajo de la copa en la que caerán las aceitunas antes o durante la recolección. En este caso el diámetro efectivo del árbol aumenta y las acumulaciones de suelo y las aceleraciones del flujo de escorrentía ocurren a mayor distancia del tronco, con la contribución adicional de la escorrentía procedente de la zona compactada.

Finalmente, la evolución temporal de la concentración de la sustancia aportada en y_0 para una determinada ordenada y_f se obtiene aplicando (7). Como ejemplo para $y_f = -1\text{m}$ la concentración C en función de C_0 varía de la forma recogida en la figura 8.

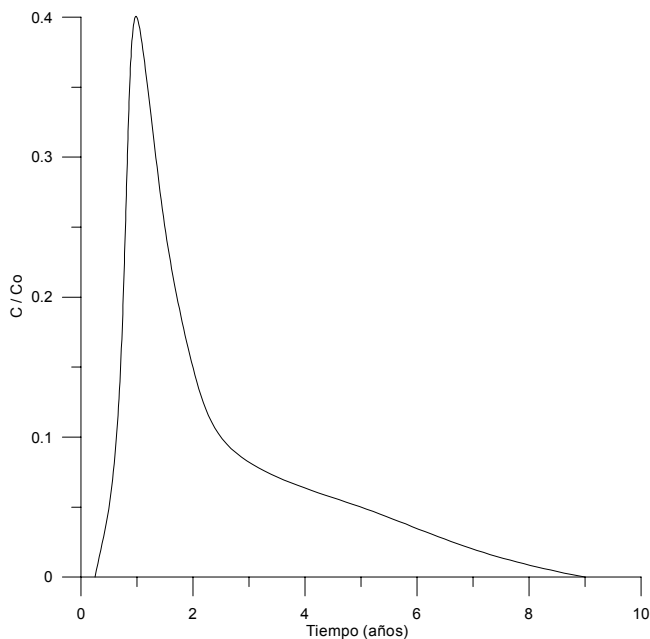


Fig. 8. Curva $C/C_0 - t$ obtenida para la ordenada $y_f = -1\text{ m}$

4.- Conclusiones

Los resultados obtenidos aplicando el modelo propuesto por Jury (1975) a un obstáculo permiten afirmar que se pueden reproducir con una razonable precisión los patrones de distribución de suelo y de sustancias alrededor de un árbol que representa un obstáculo con una sección frecuentemente similar a la forma elíptica y en menor medida a la circular.

En otro orden de cosas, el modelo ofrece la posibilidad de simular situaciones propias del abonado y tratamientos

fitosanitarios en los que las sustancias agroquímicas son aportadas en varios pulsos en un periodo de tiempo concreto, modificando sustancialmente la evolución espacio temporal de su distribución. La influencia de la pendiente en la misma queda determinada por el valor de la velocidad de flujo elegida.

Finalmente un aspecto que en el futuro debe incluirse en la formulación presentada es la consideración de las interacciones entre el soluto y las plantas y el suelo, pues no toda la cantidad de sustancia aportada está disponible para rodear el obstáculo.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto FAIR-CT-96-1478 "Tillage Erosion: Current State, Future Trends and Preventions".

5.- Referencias

- Batchelor, G.K., 1967. An introduction to fluid dynamics. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- Birkeland, P., 1974. Pedology, weathering and geomorphological research. Oxford University Press. Nueva York.
- Carlsaw, H.S. y J.C. Jaeger, 1959. Conduction of heat in solids. Second edition. Oxford University Press. Oxford, pp. 510.
- Culling, W.E.H., 1983. Steady state distributions in the measurement of soil creep. *Geogr. Anal.*, 15: 212-230.
- De Alba, S., 1998. Procesos de degradación del suelo por erosión en ecosistemas agrícolas de condiciones ambientales mediterráneas en la región central de España, Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid.
- Garner, W. y Y. Steinberger, 1989. A proposed mechanism for the formation of 'Fertile Islands' in the desert ecosystem. *J. of Arid Env.*, 16: 257-262.
- Govers, G., K. Vandaele, P. Desmet, J. Poesen y K. Bunte, 1994. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes, *Eur. J. of Soil Sci.*, 45: 469-478.
- Jenny, H., 1980. The soil resource. Springer. Nueva York.
- Jury, W.A., 1975. Solute travel-time estimates for tile-drained fields: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39:1020-1024.
- Jury, W.A., 1975. Solute travel-time estimates for tile-drained fields: II. Application to experimental studies. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39: 1024-1028.
- Lindstrom, M.J., W.W. Nelson y T.E. Schumacher, 1992. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing, *Soil & Till. Res.*, 24:243-255.
- Lindstrom, M.J., Schumacher, J.A. y T.E. Schumacher, 2000. TEP: A tillage erosion prediction model to calculate soil translocation rates from tillage. *J. of Soil and Water Cons.*, 105-108.
- Lobb, D.A., R.G. Kachanoski y M.H. Miller, 1995. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ^{137}Cs as a tracer. *Can. J. Soil Sci.*, 75:211-218.
- Milne-Thomson, L.M., 1968. Theoretical Hydrodynamics. The Macmillan Press LTD, Londres, 743 pp.
- Philip, J.R., J.H. Knight y R.T. Waechter, 1989. Unsaturated seepage and subterranean holes: conspectus, and exclusion problem for circular cylindrical cavities. *Water Resour. Res.*, 25:16-28.
- Sibbesen, E., C.E. Andersen, S. Andersen y M. Flensted-Jensen, 1985. Soil movement in long-term field experiments as a result of cultivations. I. A model for approximating soil movement in one horizontal dimension by repeated tillage, *Explor. Agric.*, 21:101-107.
- Sibbesen, E. y C.E. Andersen, 1985. Soil movement in long-term field experiments as a result of cultivations. II. How to simulate the two-dimensional movement of substances accumulating in the soil, *Explor. Agric.*, 21:109-117.
- Van Miegroet, H., M.T. Hysell y A.D. Thomson, 2000. Soil microclimate and chemistry of spruce-fir tree islands in northern Utah. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1515-1525.
- Van Muysen, W., G. Govers, G. Bergkamp, M. Roxo y J. Poesen, 1999. Measurement and modeling of the effects of initial soil conditions and slope gradient on soil translocation by tillage. *Soil & Till. Res.*, 51: 303-316.

Van Oost, K., G. Govers, W. Van Muysen y T.A. Quine, 2000. Modeling translocation and dispersion of soil constituents by tillage on sloping land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1733-1739.