

MODELO PARAMÉTRICO DISTRIBUIDO DE TRANSFERENCIA DE SUSTANCIAS AL FLUJO DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL A ESCALA DE CUENCA.

Contreras E.^{1*}, Egüen M.¹, Nofuentes M.¹ y Polo M.J¹

1: Grupo de Hidráulica e Hidrología Agrícola
Escuela de Ingenieros Agrónomos y Montes
Universidad de Córdoba
14071

e-mail: {o02coare@uco.es, o92egsam, g62nomum, ag1pogom}@uco.es, web: <http://www.uco.es/grupohha/>

Palabras clave: Escorrentía, herbicida, evento, capa de mezcla, degradación, desorción.

RESUMEN. *El presente trabajo propone un modelo paramétrico distribuido simplificado para la evolución de la concentración de sustancias en la superficie del suelo y su transferencia al flujo superficial de agua. A escala de celda se desarrolla un modelo paramétrico considerando los procesos de degradación en el suelo, desorción hacia la capa de mezcla y su posterior transferencia al flujo de escorrentía, siendo la situación de ocurrencia de precipitación la desencadenante de los dos últimos procesos. Las cargas obtenidas se circulan hacia el punto de cierre del sistema mediante un algoritmo basado en el tiempo de viaje de cada celda, concatenándolas de este modo en el espacio y en el tiempo. Se obtiene así un cálculo semidistribuido en el punto de cierre de la cuenca, en el que intervienen cuatro parámetros (cuya sensibilidad se analiza), que permite aplicar un modelo analítico en sistemas de gran extensión territorial y cuya calibración y validación se puede realizar a partir de datos de calidad de agua.*

ABSTRACT. *This paper proposes a simple distributed parametric model for the evolution of the concentration of substances in the soil surface and its transfer to the surface water flow. It is developed at cell scale considering degradation processes in soil, desorption into the mixing length layer and its subsequent transfer to runoff, it being rainfall occurrence the forcing agent to the latter. Obtained loadings are routed towards the outlet of the system through an algorithm based on the travel time of each cell, therefore combining these responses both in time and space. In this way, a distributed calculation in the watershed's outlet is obtained, in which four parameters whose sensitivity is analyzed are involved, which can be applied analytically to medium-large area watersheds, and whose calibration and validation requires surface water quality series at the closure point.*

1. INTRODUCCIÓN

Al añadir un herbicida a una zona agraria, gran parte del producto se pierde y se vierte al suelo, así mismo, parte de lo recogido sobre las hojas es arrastrado por el viento o por la precipitación, apareciendo finalmente en el suelo. El resultado es una acumulación de estos productos sobre el sustrato edáfico en cantidades elevadas, (Seoáñez, 1977) y que a menudo es en parte incorporada a las masas hídricas o a los cursos de agua por escorrentía superficial, generada cuando la precipitación o el riego superan la tasa de infiltración de agua en el suelo, e infiltración hacia los acuíferos, o también por saturación del suelo por oscilación de acuíferos someros en zonas de humedales.

La mayoría de las pérdidas de herbicidas corresponde a la fase acuosa (excepto para los herbicidas que están fuertemente adsorbidos al suelo) ya que, aunque las concentraciones de herbicidas en la fase acuosa de la escorrentía son generalmente menores que en la fase del sedimento de la misma, ésta suele ser bastante baja, incluso en las tormentas más fuertes (Wauchope y Leonard, 1980).

La cuantía y características de la concentración del soluto en el agua que constituye la escorrentía superficial de la cuenca, estará determinada por diversos procesos y factores. Las mayores concentraciones de herbicidas en el agua de escorrentía ocurren en la primera lluvia significativa después del momento de la aplicación, ya que la

retención del compuesto en el suelo aumenta progresivamente con el tiempo tras su aplicación (Pignatello et al., 1993), por lo que el tiempo en que se produce la lluvia con respecto al momento de la aplicación es uno de los factores más críticos a la hora de evaluar el proceso, además la concentración y disponibilidad de las sustancias en el suelo se disipa con el tiempo por efecto de la degradación, de modo que el riesgo de lavado de herbicidas es mayor en la época lluviosa. Por otro lado, lluvias más intensas generan escorrentías más tempranas, con mayor velocidad de flujo y por tanto con más energía disponible para la extracción y transporte de herbicidas desde la superficie del suelo. Estudios precedentes (Galindo, 2006) apuntan a que en el proceso de transferencia al agua de escorrentía es dominante el control ejercido por la interfaz suelo-agua en la zona de mezcla superficial, frente al control ejercido por las variables físicas en la generación de escorrentía. De este modo, la mayor o menor intensidad de lluvia, aunque acoplada al proceso (Gao et al., 2004), no es necesariamente el factor de mayor importancia a considerar, pudiéndose detectar concentraciones más elevadas de compuesto en períodos de tiempo en los que no sucede un evento de lluvia de gran intensidad, pero sí existe en el suelo una cantidad importante de herbicida.

Numerosos estudios se han llevado a cabo con el objeto de comprender mejor la dinámica del proceso de liberación de sustancias al flujo de escorrentía y transporte de las mismas hacia otras zonas y son muchos los modelos que incorporan este tipo de contaminación, como ANSWERS, SWMM, AGNPS, HSPF, GLEAMS, SWRRBWQ, CREAMS, SWAT, etc. (e.g. Contreras, 2007), sin embargo, aunque muy completos, la mayoría son difíciles de calibrar en la práctica, y no están definidos a las escalas temporales y espaciales con las que se describen los procesos hidrológicos en la cuenca, por lo que es necesario incluir una parametrización adecuada de los mismos para cada asociación de escalas espacio-temporales abordable, utilizando los modelos físicos a la escala a la que fueron desarrollados y parametrizando a las escalas superiores a partir de la explotación local de los mismos (Aguilar, 2008).

El presente trabajo simula el proceso de transferencia de herbicidas al flujo de escorrentía, estimando la transferencia del compuesto a la fase acuosa a escala de celda de suelo agrícola, mediante un modelo paramétrico simplificado, considerando períodos de evento y no evento de escorrentía para, posteriormente, circular la carga estimada hacia el punto de salida de la cuenca. En esta primera aproximación sólo se han considerado los procesos de degradación en el suelo y la transferencia durante la generación de escorrentía. Por otro lado, se analiza la sensibilidad del modelo a la variación de los parámetros considerados, cuestión que dependerá del propio herbicida, y de las características climáticas y litológicas de la zona de aplicación.

2. EL MODELO PARAMÉTRICO

2.1. Planteamiento del modelo

Se recoge una visión del proceso a escala distribuida, determinando el aporte de sustancias que provocaría un evento de lluvia y teniendo en cuenta el hecho de que la escorrentía y el transporte de sustancias por la misma varían espacialmente a lo largo de toda la cuenca, ya que las características topográficas y pluviométricas son diferentes de unas zonas a otras (Contreras, 2007).

El modelo comprende tres módulos, el primero de ellos se aplica a pequeña escala, a una celda de suelo agrícola en la que se produce aporte de herbicida, en cambio, los dos siguientes comprenden un cálculo distribuido, al tratar cada una de las celdas en las que se divide la subcuenca.

1. Cálculo de la concentración de herbicida en el agua de escorrentía en una celda.
2. Cálculo de la carga de compuesto que aporta cada celda de la cuenca.
3. Cálculo de la concentración y carga de compuesto a la salida de la cuenca.

A continuación se expone el desarrollo del modelo, con la definición de parámetros de entrada, variables de estado y relaciones entre ambas para cada proceso incluido en el mismo, definiendo la escala espacio-temporal para la que dicha caracterización es válida, siendo el programa de cálculo numérico MATLAB 7.0 la herramienta utilizada para la implementación del esquema.

2.1.1. Cálculo de la concentración de herbicida en el agua de escorrentía en una celda

Los procesos que considera el modelo paramétrico son la degradación del compuesto en el suelo, desorción de éste hacia la fase acuosa de la escorrentía y degradación en la misma. A la hora de desarrollar el modelo, se ha de tener en cuenta que estos procesos ocurren a diferentes escalas de tiempo, ya que la cantidad de sustancia en el suelo variará más lentamente que la cantidad presente en el agua de escorrentía, tomando una escala de tiempo de días y de minutos, respectivamente.

Numerosos estudios (Martínez, 1996, Fuentes et al., 2000, Martínez et al., 2003) demuestran que la degradación del compuesto en el suelo puede modelarse a escala diaria o superior mediante una ley exponencial negativa en la que la concentración de sustancia en un momento dado depende de la concentración de sustancia inicial, así como del período de tiempo transcurrido desde el momento de la aplicación o tiempo en el que se da dicha concentración inicial:

$$C_{suelo}(t) = C_0(t_0) \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1)$$

siendo C_{suelo} la concentración presente en el suelo fuera de la capa de mezcla en un tiempo determinado t [ML^{-3}]; C_0 la concentración inicial de partida en un tiempo t_0 [ML^{-3}]; $t-t_0$ el tiempo transcurrido desde el aporte de sustancia y α un parámetro relacionado con la velocidad de degradación de la sustancia [T^{-1}].

El proceso de transferencia de sustancias al flujo de escorrentía durante un evento de lluvia, está dominado por el control que el suelo ejerce tanto sobre la generación de escorrentía como sobre la dinámica de sorción. La zona del suelo que contribuye a la presencia de sustancia en el flujo superficial de agua, es decir, la zona donde interaccionan los componentes del suelo y el agua de lluvia no infiltrada (exceso de lluvia) se define como “capa de mezcla”. En dicha zona, desde que se inicia la lluvia hasta que se produce el encharcamiento de la superficie del suelo (inicio de escorrentía) se lleva a cabo el proceso por el que tienden a equilibrarse la concentración de sustancia en la fase sólida del suelo y en la solución acuosa del mismo (Nofuentes y Polo, 2008), con velocidades de infiltración que en general permiten admitir esta hipótesis en la mayoría de los casos. Cuando el flujo de la saturación superficial se produce por inundación súbita y caudales circulantes muy elevados, esta hipótesis no es válida (Nofuentes y Polo, 2008). Es en esta capa hacia donde tiene lugar la desorción del soluto desde el sustrato edáfico y, en condiciones de equilibrio, la descripción del proceso se puede hacer mediante la ecuación no lineal de Freundlich:

$$C_{suelo} = kf \cdot C_{solución}^{nf} \quad (2)$$

siendo $C_{solución}$ la concentración de herbicida en la solución acuosa de la capa de mezcla, [ML^{-3}]; C_{suelo} la concentración de herbicida en la fase sólida del suelo en la capa de mezcla en un estado de equilibrio [MM^{-1}] y kf y nf son dos constantes características relacionadas con la capacidad de adsorción-desorción del compuesto.

El tercer proceso implicado es el de variación de la concentración de sustancia en el flujo de escorrentía desde la capa de mezcla. Se admite como hipótesis de cálculo que al inicio de la escorrentía se ha alcanzado el equilibrio en la capa de mezcla, produciéndose mezcla instantánea, por lo que la concentración química en el agua de escorrentía sería la misma que en el agua infiltrada. La evolución de la transferencia de solutos desde el suelo al agua de escorrentía arroja valores decrecientes a medida que el agua de lluvia lava los primeros centímetros del perfil de suelo; por tanto, depende de la intensidad de lluvia y su variación temporal. Resultados de estudios anteriores corroboran el hecho de que la variación de la concentración de sustancias en el flujo de escorrentía podría ajustarse a una ley exponencial negativa. A partir del momento en el que empieza a haber escorrentía, la concentración en el flujo de escorrentía sería para un tiempo dado:

$$C_{esc}(t) = C_{solución}(t) \cdot e^{-\beta(t-t_0)} \quad (3)$$

siendo $C_{solución}$ la concentración de sustancia en la solución de la capa de mezcla en el inicio de la escorrentía, en equilibrio con la fase sólida bajo el supuesto anteriormente admitido [MT^{-3}] y β un parámetro relacionado con la velocidad de disminución de los valores de concentración [T^{-1}].

Al aplicarse el modelo a un tramo espacial equivalente a una celda del Modelo Digital del Territorio, los valores de los parámetros están sujetos a efectos de escala. En este trabajo se admiten los valores de la isoterma a escala de laboratorio y los parámetros α y β se extraen de anteriores estudios. La escorrentía horaria media en una celda a partir de la cual se inicia el proceso de transferencia se genera siguiendo la metodología desarrollada en un estudio anterior en la zona (Aguilar, 2008). En la figura 1 se presenta el diagrama de flujo del modelo generado.

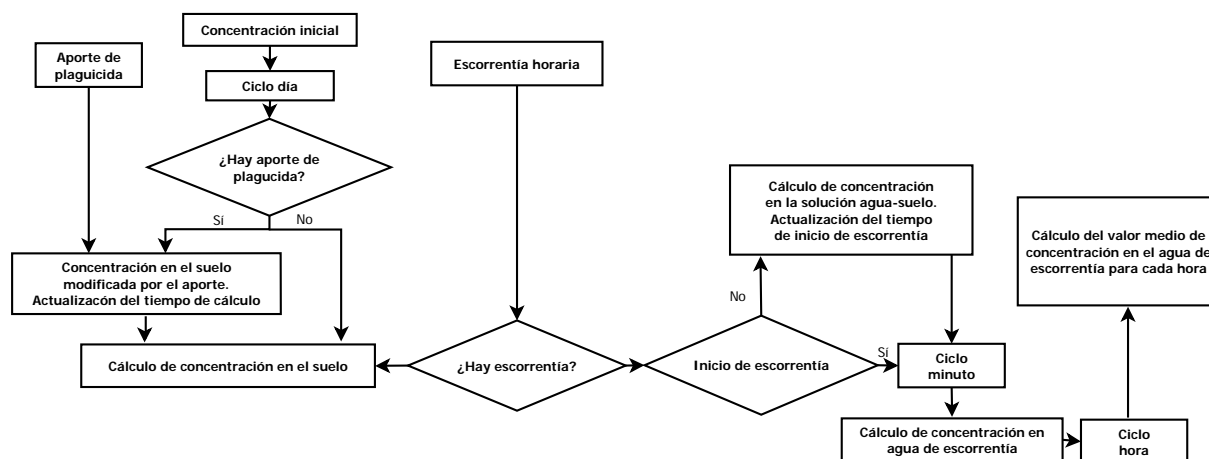


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo de transferencia de herbicida al agua de escorrentía.

2.1.2. Cálculo de la carga de herbicida que aporta cada celda de la cuenca

La carga de compuesto que va a aportar cada celda de suelo agrícola a la escorrentía se calcula según los datos de concentración horaria obtenidos en el módulo anterior y la escorrentía producida en la celda por un determinado evento, generada siguiendo la metodología desarrollada por Aguilar (2008). El cálculo horario es debido a las restricciones usuales impuestas por el cálculo de la generación de escorrentía a partir de datos de precipitación normalmente horarios.

2.1.3. Cálculo de los aportes a la salida de la cuenca

Para evaluar el aporte total en el punto de salida de la cuenca a lo largo de un evento de escorrentía, reflejo de la cantidad de contaminante que la subcuenca va a verter al cauce principal, se determina qué celdas en cada una de las horas del evento de escorrentía llegan a la salida de la cuenca y se suman las cargas resultantes cada hora. Posteriormente se irán acumulando las cargas aportadas en las sucesivas horas, gracias al conocimiento del tiempo de viaje de cada una de las celdas que producen dichas cargas, entendido como el tiempo que tardaría el exceso de lluvia de una celda concreta en llegar desde la misma al punto de desagüe, con la carga asociada de sustancias (Aguilar, 2008). Dicho parámetro se calcula considerando una velocidad de avance efectiva del flujo en cada celda (homogénea en toda la superficie de cálculo, al ser la totalidad de la cubierta de carácter agrícola y por tanto con características similares en lo que a rugosidad del terreno se refiere) y teniendo en cuenta las direcciones del mismo hasta alcanzar el punto de desagüe.

Determinada la carga vertida a la salida de la cuenca, con la escorrentía en dicho punto, generada siguiendo la metodología desarrollada por Aguilar (2008), se calcula la curva de carga de compuesto en el agua de escorrentía a la salida de la cuenca. Se obtiene así el polutograma para el período estudiado y, con ello, una idea de en qué medida la subcuenca va a contribuir a la contaminación de las aguas del cauce principal.

2.2. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza a través de la “perturbación de parámetros”, es decir, se varía un parámetro

del modelo mientras el resto permanecen constantes, de modo que las variaciones sufridas en las variables de estado reflejan la sensibilidad de la solución al parámetro modificado (Chapra, 1997).

Se simula el proceso para el herbicida Diurón, del grupo de los derivados de la urea y los uracilos. Este compuesto se fija fuertemente a los coloides del suelo y tiene una vida media de hasta 11 meses, en agua se adsorbe parcialmente en el sedimento, siendo su degradación en este medio muy lenta, por lo que las altas concentraciones de compuesto en escorrentía pueden llegar a ser enormemente perjudiciales. Existen diversos estudios que recogen el valor de los parámetros para el caso de este compuesto tomados como referencia a la hora de realizar la simulación, los cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de referencia

α (días ⁻¹) ¹	kf ²	nf ²	β ³ (min ⁻¹)
0.01	6	0.88	0.042

¹ $\alpha=0.693/t_{1/2}$, siendo $t_{1/2}$ (tiempo de vida medio del diurón) de 64 días.

² Gaillardon, 1997.

³ Para un coeficiente de escorrentía de 0.02 % (Galindo, 2006)

3. APLICACIÓN A LA SUBCUENCA NARILA

3.1. Caracterización del área de estudio

La zona de aplicación del modelo es la subcuenca de Narila, ubicada en la parte alta del río Guadalfeo, situado al sur de la provincia de Granada, en la vertiente sur de Sierra Nevada, y con una extensión de 1786 ha. En la zona más baja de la subcuenca, cerca del punto de desagüe, existen 411 ha de tierras dedicadas al cultivo, lo que implica el aporte de herbicidas al cauce principal desde estas áreas en épocas de escorrentía.

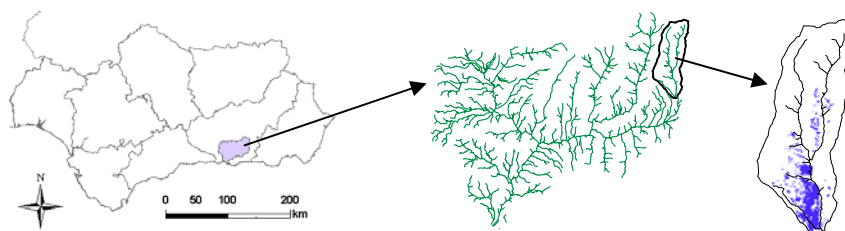


Figura 2. Localización de la subcuenca Narila y usos de suelo agrícola en la zona.

La simulación se realiza a lo largo del año 2004 y la cantidad de herbicida presente en el suelo en el momento de la aplicación, suponiendo que anteriormente ha habido algún aporte de compuesto, se establece en $0.05 \mu\text{g kg}^{-1}$. La dosis aplicada en una parcela de $30 \times 30 \text{ m}^2$, asumiendo a una profundidad de 30 cm la zona de acción del herbicida, es de 1 kg de diurón (según ensayos de Gaillardon, 1997), realizando dos aportes espaciados en el tiempo, uno el 15 de marzo y otro el 15 de septiembre.

3.3. Escorrentía y evolución de la concentración de soluto

La escorrentía generada a lo largo del año (figura 3.a) refleja el patrón estacional común al clima mediterráneo. La aplicación del herbicida antes de la época de lluvia (marzo o septiembre) conllevaría a un mayor grado de contaminación en las aguas que una aplicación durante el periodo seco. La figura 3.b refleja la concentración de herbicida en el suelo para un estado del sistema edáfico en equilibrio variando de forma exponencial a lo largo del año, según los aportes efectuados. El aporte de primavera incrementaría la concentración de compuesto hasta los $3086 \mu\text{g kg}^{-1}$, y en el de otoño, debido a la cantidad de herbicida remanente que habría quedado en el suelo se alcanzarían concentraciones algo mayores, de hasta $3581 \mu\text{g kg}^{-1}$. La simulación del proceso de transferencia al agua de escorrentía (figura 3.c) muestra la cantidad de herbicida desorbido hacia la capa de mezcla, que evolucionará a lo largo del evento en el agua de escorrentía.

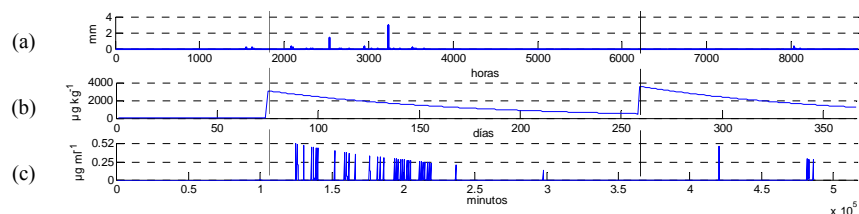


Figura 3. Representación de las distintas variables a lo largo del año: eventos de escorrentía (a), concentración de herbicida en el suelo (b) y concentración de herbicida en la capa de mezcla y en el agua de escorrentía al inicio de cada evento (c). Las 2 líneas verticales indican los momentos de aporte de herbicida.

La concentración de herbicida en el agua de escorrentía para el período y condiciones estudiadas alcanza los $0.51 \mu\text{g ml}^{-1}$ al inicio de la primera hora de escorrentía desde el primer aporte, mientras que la concentración obtenida en la escorrentía tras el segundo aporte es algo menor, al transcurrir más tiempo entre la aplicación y la ocurrencia de la escorrentía. En primavera tiene lugar la mayor generación de escorrentía del año, por lo que los resultados que de aquí en adelante se exponen corresponden al primer evento de escorrentía ocurrido tras el primer aporte, el día 27 de marzo, de 6 horas de duración (figura 4).

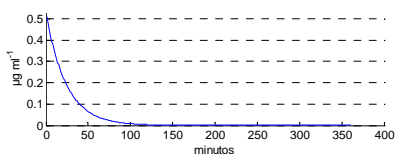


Figura 4. Concentración de compuesto en el agua a lo largo del evento de escorrentía del 27 de marzo, de 6 horas de duración.

3.3. Análisis de sensibilidad

En la tabla 2 se expone el valor de las variables de estado para el evento de escorrentía del 27 de marzo, y el código referido a cada variable simulada, resultados correspondientes a la simulación de referencia.

Tabla 2. Resultados de la simulación para los parámetros de referencia

Código	Variable simulada	Valor
1	Concentración de herbicida en el suelo al inicio del evento ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	2737
2	Concentración de herbicida en la capa de mezcla y en el agua de escorrentía al inicio del evento ($\mu\text{g ml}^{-1}$)	0.5101
3	Concentración de herbicida en el agua de escorrentía al final de la primera hora del evento ($\mu\text{g ml}^{-1}$)	0.0410

3.3.1. Parámetro de degradación en el suelo

El parámetro α depende, entre otros factores, por un lado del tipo de suelo (contenido en materia orgánica, arcillas y carbonato cálcico) y del herbicida aplicado, ya que no todos son degradados a una misma velocidad y, por otro, del período de tiempo durante el cual se ha estado empleando reiteradamente el herbicida en el suelo y de la época del año. Se realiza el análisis de sensibilidad para un intervalo de α de 0.01 a 0.1, definidos como umbrales del valor para una tasa de degradación baja y alta según Barry et al. (1993). De este modo, la diferencia de los resultados obtenidos con respecto al nivel de referencia (figura 5) refleja una variación similar en las tres variables de estado, aumentando las concentraciones en casi un 20% al disminuir α desde el valor de referencia hasta 0.001, mientras que un aumento de α a 0.1 disminuye la concentración de herbicida en un 70%.

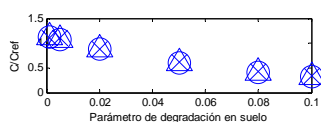


Figura 5. Concentración de herbicida respecto al nivel de referencia. X En el suelo al inicio del evento de escorrentía, Δ en la capa de mezcla y en el agua de escorrentía al inicio del evento, O en el agua de escorrentía al final de la primera hora del evento.

3.3.2. Parámetros de desorción hacia la capa de mezcla

El valor de k_f corresponde a la cantidad de herbicida desorbido cuando la concentración del mismo en el equilibrio es la unidad y se considera como una medida de la capacidad de adsorción-desorción del suelo para el herbicida en cuestión, mientras que el parámetro n_f se refiere a la intensidad de adsorción-desorción. La solubilidad de las sustancias aumenta a medida que lo hace la temperatura del agua, al mismo tiempo que disminuye su adsorción por las partículas del suelo y plantas, lo que contribuye al aumento de su concentración en el agua de escorrentía. Se realiza el análisis de sensibilidad para un intervalo de k_f de 3 a 20 y n_f de 0.2 a 1.

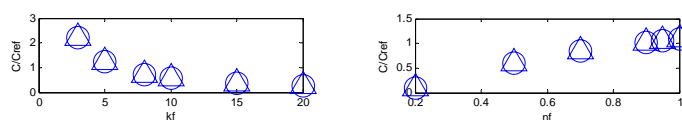


Figura 6. Concentración de herbicida respecto al nivel de referencia. Δ En la capa de mezcla y en el agua de escorrentía al inicio del evento, O en el agua de escorrentía al final de la primera hora del evento, en el análisis de sensibilidad de k_f (a) y n_f (b).

La figura 6 muestra que la variación de la concentración de herbicida en la capa de mezcla y en el agua de escorrentía es similar, siendo ambas variables más sensibles a cambios en la capacidad de desorción (parámetro k_f) que en la intensidad de desorción (n_f), presentando la primera incrementos de concentración de más del 100% al disminuir k_f a la mitad.

3.3.3. Parámetro de variación en el agua de escorrentía

El análisis de sensibilidad del parámetro β , reflejo de la variación de la concentración de herbicida en el agua de escorrentía (Galindo (2006) encontró distintos valores de β en función, entre otros factores, del coeficiente de escorrentía) se presenta en la figura 7, para un intervalo de β de 0.005 a 0.08.

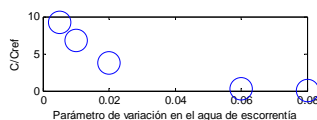


Figura 7. Concentración de herbicida respecto al nivel de referencia en el agua de escorrentía al final de la primera hora del evento.

Los resultados muestran la enorme sensibilidad del modelo a cambios del parámetro. Disminuciones a la mitad del valor de referencia arrojan valores de concentración de más de 400% por encima del resultado de referencia.

3.4. Cálculo de la carga de herbicida que aporta cada celda de la cuenca

En la figura 8 se presentan los mapas de carga generados a lo largo de las 5 primeras horas del evento, resultando menores cargas a medida que avanza el evento, como consecuencia del lavado del compuesto, de manera que, en la sexta hora del evento, la carga generada en la celda sería despreciable, del orden de 10^{-7} g h^{-1} .

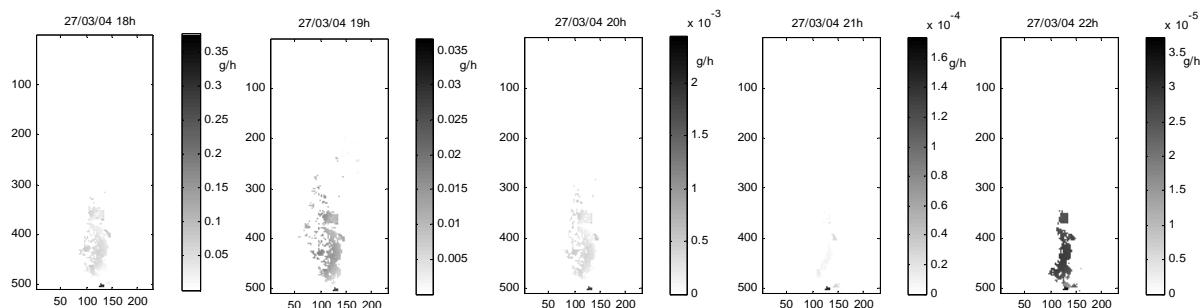


Figura 8. Carga de herbicida generada en cada celda agrícola (g h^{-1}) a lo largo de las 5 primeras horas del evento del 27 de marzo.

3.5. Cálculo de aportes a la salida de la cuenca

La determinación los aportes de herbicida en el punto de salida de la cuenca, resulta de gran interés a la hora de evaluar la calidad del agua que el conjunto de la subcuenca vierte al cauce principal. La carga de compuesto transportada por la escorrentía superficial desde cada uno de los puntos de la cuenca hasta la salida de la misma se presenta en la figura 9.

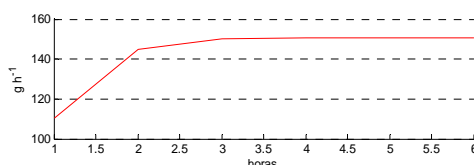


Figura 9. Carga de herbicida generada en el punto de salida de la subcuenca Narila (g h^{-1}) a lo largo del evento del 27 de marzo.

4. CONCLUSIONES

El modelo distribuido elaborado recoge a escala de celda la transferencia de sustancias al flujo de escorrentía superficial y circula su carga hasta el punto de salida de la cuenca estudiada, teniendo en cuenta la variabilidad interna del sistema. La simplicidad del modelo permite su calibración a partir de datos de calidad de agua, con sólo dos parámetros, α y β . Aunque el ejemplo de cálculo se ha efectuado para un herbicida dado, el modelo es fácilmente adaptable a otras sustancias similares, en el caso de nutrientes habría que incluir otros procesos para modelar su evolución en el suelo a lo largo del año, por tanto, constituye una primera aproximación para cuantificar la calidad del agua de escorrentía superficial. El análisis realizado refleja la importancia de calibrar adecuadamente el parámetro β , pues el modelo muestra una gran sensibilidad a cambios en el mismo. En la actualidad se está aplicando el modelo propuesto en cuencas agrícolas de tamaño reducido, con disponibilidad suficiente de datos, para contrastar la validez de esta aproximación paramétrica. En el futuro se incorporarán asimismo los procesos de aumento de la retención del compuesto en el suelo con el tiempo, así como de difusión en el flujo de escorrentía superficial, para mejorar la representatividad del modelo a escala de cuenca.

REFERENCIAS

- Aguilar, C. 2008. Efectos de escala en procesos hidrológicos. Aplicación a la cuenca del río Guadalfeo (Granada). Tesis doctoral. Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola. Universidad de Córdoba.
- Barry D. y William Mc. 1993. A screening method to identify the probabilities of pesticide leaching. *Agric. Water Management*. 25, 23-34.
- Chapra, S.C. 1997. Surface Water-Quality Modeling. McGraw-Hill. Nueva York.
- Contreras, E. 2007. Transferencia de solutos al agua de escorrentía. Monografías 2007, Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola, Universidad de Córdoba. Enlace web: <http://www.cuencaguadalfeo.com/publicaciones.html>
- Gaillardon P. 1997. Desorption of Diuron and Isoproturon from Undispersed Clay Loam Soil. *Pestic. Sci.* 51, 185-193.
- Galindo, P. 2006. Transferencia de herbicidas al flujo de escorrentía superficial en olivar de no laboreo con bandas de cubierta vegetal. Monografías 2007. Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola. Córdoba. ISBN: 978-84-690-4413-1.
- Galindo, P., Polo, M.J. y de Luna, E. 2007. Transport by runoff of herbicides used in olive orchards: The role of physico-chemical characteristics. *Olea FAO Olive Network*. ISSN: 0214-6614, 26, 44-47.
- Gao, B., M.T. Walter, T.S. Steenhuis, W.L. Hogarth, J.-Y. Parlange. 2004. Rainfall Induced Chemical Transport from Soil to Runoff: Theory and Experiments. *J. Hydrol.* 295, 291-304
- Martínez, L. 1996. Estudio del comportamiento en el medio ambiente de los herbicidas empleados en el maíz. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Químicas. Madrid.
- Martínez, M.J., Farsaoui K., de Prado, R. Peña, F. 2003 Estudio comparativo de degradación de simazina para diferentes sistemas de manejo del suelo en el olivar. XI Simposium Científico-Técnico Expoliva 2003. Jaen, 14-16 de mayo de 2003.
- Nofuentes, M., y Polo, M.J., 2008. A first approach to the characterization of solute transfer from soil to runoff in transient shallow flows. *Geophys. Res. Letters*. 35, L17406, doi:10.1029/2008GL034578.
- Pignatello J.J., Fernandez, F.J. y Huang, L.O. 1993. Elution of aged and freshly added herbicides from a soil. *Env. Sci. Technology*. 27, 1563-1571.
- Fuentes, R., Umaña, L., Manquían N., Cristo, R. 2000. Proposición de un modelo matemático simple de persistencia de herbicidas en el suelo. *Pesq. Agropec. Bras.* 35 (12), ISSN 0100-204X. doi: 10.1590/S0100-204X2000001200001.
- Seoánez, M. 1977. La contaminación agraria. *Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias*. Ministerio de Agricultura. Madrid
- Wauchope, R. D. y Leonard R. A. 1980. Maximum pesticide concentrations in agricultural runoff: a semiempirical prediction formula. *J. Environ. Qual.* 9, 665-672.