



PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN, EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA

PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA APTA PARA EL CONSUMO HUMANO

MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.

Linares, Jorge; Reyna, Teresa; Reyna, Santiago; Lábaque, María; Murialdo, Raquel
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba
Av. Vélez Sarsfield 1611. Córdoba. Te: 0351-4692737. teresamaria.reyna@gmail.com

Resumen

Los suelos son considerados descontaminantes naturales, debido a su heterogeneidad, tanto por su composición como por la diversidad de procesos que ocurren (Macías, 1996). El conjunto de propiedades físicas, químicas, y biológicas que posee hacen que actúe como una barrera protectora de otros medios, especialmente de las aguas superficiales y subterráneas. Por lo que la hipótesis ampliamente aceptada de que la fracción insaturada del suelo constituye una defensa efectiva contra la penetración de plaguicidas es por lo tanto cuestionable (Giuliano, 1995). Por otra parte y en respuesta a la necesidad de profundizar el conocimiento del medio se ha expandido el uso de diferentes modelos numéricos como herramientas imprescindibles en la obtención de aproximaciones al comportamiento del movimiento del agua en el suelo y el transporte de solutos (Atrazina y Acetoclor) en la zona no saturada para lo cual es necesario incrementar los estudios de campo. Para ello es necesario obtener datos de campos los cuales se pueden adquirir con sensores de capacitancia que sirven para la medición del contenido de humedad pero requieren de una calibración previa y son utilizados para la validación de los parámetros de los modelos numéricos. Para poder conocer el nivel de contaminación de los suelos y cuerpos de agua debido al uso de los agroquímicos es necesario caracterizar el movimiento de agua en la zona vadosa y el transporte de solutos e identificar los parámetros característicos del suelo para modelar y ajustar el transporte de químicos a través de la zona no saturada. Los objetivos específicos de este trabajo estuvieron vinculados al proyecto Technologies for Water Recycling and Reuse in Latin America Context (Corrado, 2011) el cual pretende desarrollar la metodología y las herramientas para solucionar ese asunto apremiante a través de la aplicación integrada de tecnologías de reciclado y reutilización del agua en áreas seleccionadas de Latinoamérica.

Palabras claves: transporte de contaminantes, suelos agrícolas, atrazina, sensores de capacitancia

Abstract

Soils are considered natural decontaminants, because of their composition heterogeneity and its diversity of processes (Macías, 1996). The set of its physical, chemical, and biological properties serves as a protective barrier from other media such as surface water and groundwater, so the widely accepted hypothesis that the unsaturated soil fraction constitutes an effective defense against the penetration of pesticides is therefore questionable (Giuliano, 1995). On the other hand, and in response to the need to

Córdoba, abril de 2013



deepen the knowledge of the environment, it has been expanded the use of different numerical models as essential tools in obtaining approximations to the behavior of water movement and solute transport (Atrazine and Acetochlor) in the unsaturated zone. This requires obtaining field data which can be acquired with capacitance sensors, which require a prior calibration, used for measuring moisture content and the validation of the numerical models parameters. In order to determine the level of soil and water bodies' contamination due to the use of agrochemicals, it is necessary to characterize both the movement of water and the transport of solutes in the vadose zone, and identify the characteristic parameters of the ground as well as adjust the chemicals transport through the unsaturated zone. The specific objectives of this study were linked to the project Technologies for Water Recycling and Reuse in Latin America Context (Coroado, 2011) which aims to develop the methodology and tools to solve this important issue through the integrated application of recycling and water reuse technologies in selected areas of Latin America.

Key words: pollutants transport, agricultural soils, atrazine, capacitance sensors



INTRODUCCIÓN

La simulación del movimiento del agua en el suelo tiene muchas aplicaciones en hidrología, meteorología, agronomía, protección del medio ambiente y otras disciplinas relacionadas con el manejo del ambiente. Por lo tanto es necesario mejorar el conocimiento del flujo en los suelos agrícolas y el transporte de los herbicidas en el mismo.

El flujo se define a través de ecuaciones que describen los fenómenos de flujo y de transporte a nivel macroscópico.

En relación al movimiento del agua a través del interior del perfil del suelo este fenómeno es dominado por las características de dicho sistema poroso no saturado o saturado además es necesario considerar que las plantas son la principal vía de paso del agua del suelo a la atmósfera. Las plantas juegan un papel muy importante dentro del balance de agua en el suelo, ya que influyen en la evapotranspiración que es uno de los componentes principales del balance de agua en los suelos agrícolas y porque su crecimiento está ligado al estado hídrico del suelo. Dentro de este complejo fenómeno es importante realizar estudios sobre los herbicidas que se aplican en los suelos y sobre la afectación que los mismos generan en el perfil del suelo y su permanencia. En relación a esto se plantea primero algunos conceptos de herbicidas, la solución del flujo de agua en suelos no saturados y el transporte de contaminantes el cual se realizó utilizando el programa HYDRUS.

HERBICIDAS

Los herbicidas son productos destinados para el control de malezas de determinado cultivo no deseadas por su impacto negativo en la producción y rendimientos, estos se encuentran dentro del grupo de productos fitosanitarios los cuales por definición de la Organización Mundial de la Salud (OMS) son todas aquellas sustancias o mezcla de sustancias, destinadas a prevenir la acción de controlar o destruir directamente malezas, insectos, hongos, ácaros, moluscos, bacterias, roedores y otras formas de vida animal o vegetal que puedan resultar perjudiciales tanto para la Salud Pública como para la Agricultura. Por lo general todos los herbicidas que pertenecen a un mismo grupo genérico actúan de la misma manera, por ejemplo: al conocerse el efecto de la atrazina sobre una maleza (la mayoría de las malezas latifoliadas anuales y algunas gramíneas, como cola de zorro y pasto colorado) también se sabe cómo actúa la simazina, la ametrina y la prometrina, ya que todos estos productos pertenecen a la misma familia de las triazinas (Doll, 1982).

No existe una única clasificación de herbicidas, ya que los mismos pueden ser agrupados según su naturaleza química, su mecanismo de acción, el momento de aplicación, etc. Cabe aclarar también que un mismo herbicida, puede ser englobado en diversas categorías de clasificación (CASAFE, 2012).

No obstante se pueden dividir en (CASAFE, 2012):

- Selectivos: aquellos que controlan un objetivo, preservando el cultivo de interés económico.
- Totales: generalmente utilizados para limpieza de terrenos donde se controlan todas las especies existentes, sin discriminación.
- Residuales: persisten en el suelo controlando la nacencia de malezas provenientes de semillas de especies anuales, al impedir su germinación. Normalmente no son activos sobre especies perennes que rebrotan a partir de rizomas, bulbos o estolones
- Pre-emergentes: son herbicidas que se aplican antes de la nacencia del cultivo.
- Post-emergentes: son herbicidas que se aplican después de la nacencia del cultivo.
- Sistémicos: se aplican sobre la planta, pero actúan a distancia, al ser trasladado hasta raíz mediante el floema.



- De contacto: se aplican sobre la planta actuando localmente en la superficie, sin necesidad de ser trasladado.

Mecanismos de Acción de los Herbicidas

Una característica en común que pueden tener los herbicidas es que actúan sobre procesos fisiológicos de los vegetales, siendo su toxicidad, en algunos casos, sobre otras especies muy baja.

La forma más útil de clasificación de los herbicidas es según su modo de acción (Duke & Dayan, 2001) y (Schmidt, 2005.). El modo de acción es la secuencia de eventos que ocurren desde la absorción del herbicida hasta la muerte de la planta.

Los herbicidas con el mismo modo de acción tienen el mismo comportamiento de absorción y transporte y producen síntomas similares en las plantas tratadas (Gunsolus & Curran, 1996). Además la clasificación de los herbicidas según su modo de acción permite predecir, en forma general, su espectro de control de maleza, época de aplicación, selectividad a cultivos y persistencia en el suelo (Ashton & Crafts, 1981). Existen cuatro tipos de herbicidas:

1) Inhibidores de la fotosíntesis

Los inhibidores de la fotosíntesis pueden clasificarse en herbicidas móviles o sistémicos y herbicidas no-móviles o de contacto. Los inhibidores de la fotosíntesis móviles incluyen a las familias químicas de las triazinas, triazinonas, triazolinonas, fenilureas y uracilos y los de contacto a los nitrilos, benzotiadizoles y amidas (Markwell, et al., 2005).

Se subdivide en cuatro grupos siendo los tres primeros los que actúan sobre la fase luminosa de la fotosíntesis. Además no sólo se usan en agricultura, sino también para limpiar terrenos, vías de ferrocarril, zonas industriales, almacenes (CASAFE, 2012).

Los más usados son los tipo a).

- a) Herbicidas que inhiben la transferencia de electrones inhibiendo la fotosíntesis. Este grupo de herbicidas corresponden: ureas, uracilos y triazinas. Este tipo de herbicidas son aplicados al suelo y absorbidos por las raíces, se transportan vía xilema a la parte aérea, llegan a los cloroplastos de las hojas y allí inhiben la fase luminosa. Cualquier planta puede ser afectada por este tipo de herbicidas.
- b) Herbicidas que desacoplan la cadena de transporte de electrones. El mecanismo de acción de los inhibidores de la fotosíntesis es la interrupción del flujo de electrones en el fotosistema II, que provoca la destrucción de la clorofila y los carotenoides, lo que causa la clorosis, y la formación de radicales libres que destruyen las membranas celulares provocando la necrosis (Duke & Dayan, 2001). En la práctica se deben añadir vía foliar y no edáfica, ya que al tener carga positiva se absorben irreversiblemente sobre los coloides del suelo, mucho más que cualquier catión metálico, quedándose allí indefinidamente.
- c) Herbicidas que impiden la formación del Adenosín trifosfato (ATP). A este grupo pertenecen las acilanilidas, hidroxibenzonitrilos, dinitrofenoles, piridazinas, N-fenilcarbamatos. Se aplican de forma diferente. Los más importantes son los dinitrofenoles, moléculas con anillo aromático hidroxilado y con dos grupos nitro. Estas moléculas no sólo desacoplan la fosforilación oxidativa de la cadena de transporte fotosintético, sino que también lo hacen a nivel mitocondrial. Por tanto, pueden presentar una toxicidad importante para animales. De aquí que algunos se puedan usar como herbicidas y fungicidas.
- d) Herbicidas que alteran la biosíntesis de carotenoides. Actúan en algún punto de la síntesis de licopeno. El más importante es el amino triazol.



2) Inhibidores de la síntesis de aminoácidos

Existen varias familias de herbicidas que afectan la síntesis de aminoácidos, los cuales son esenciales para la formación de proteínas requeridas para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Los inhibidores de la síntesis de aminoácidos pueden dividirse en inhibidores de aminoácidos ramificados e inhibidores de aminoácidos aromáticos (Nissen, et al., 2005). Se subdivide en tres grupos:

- a) Herbicidas que alteran la biosíntesis de aminoácidos aromáticos. La síntesis de aminoácidos aromáticos es imprescindible, ya que el Trp y el Phe (Serotonina y Noradrenalina) son precursores de la lignina y de los compuestos aromáticos de la planta. Además, estos aminoácidos luego forman parte de proteínas. El herbicida capaz de inhibir la síntesis de aminoácidos aromáticos es el glifosato. El glifosato en animales puede ser degradado; en el suelo puede ser inactivado, por lo que medioambientalmente tiene muy buen comportamiento (CASAFE, 2012).
- b) Herbicidas que alteran la biosíntesis de la glutamina.
- c) Herbicidas que inhiben la síntesis de lípidos: a este grupo pertenecen los tiocarbamatos que inhiben la conversión de ácidos grasos de cadena corta en AG de cadena larga. Como consecuencia, frenan el crecimiento del vegetal. Estas moléculas se pueden usar en tratamientos al suelo para semillas que estén germinando; los tiocarbamatos se degradan fácilmente por enzimas y apenas se absorben en el suelo.

3) Reguladores del crecimiento vegetal

Alteran la elongación y la división celular. Cuando se incorporan a una planta dan lugar a un crecimiento anormal del vegetal, y como consecuencia origina deformaciones, falta de funcionalidad y la muerte de la planta. Los reguladores del crecimiento se absorben por hojas y raíces y se transportan por el floema y xilema. Sin embargo, su uso principal es en post-emergencia a cultivo y maleza (Sterling & Namuth, 2005).

- a) Herbicidas que alteran la elongación celular. En las células meristemáticas sucede la elongación celular, por acción de las auxinas. Éstas a alta concentración tienen efectos herbicidas, originan elongación celular desmesurada con malformaciones en los ápices y la muerte del vegetal. A este grupo de herbicidas pertenecen los ácidos ariloxialcanoicos, de dos tipos, el ácido fenoxiacético y el ácido fenoxibutíricos. No se usan demasiado ya que en su síntesis se liberan dioxinas.
- b) Herbicidas que inhiben la síntesis de giberelinas. Las giberelinas son fitohormonas responsables del crecimiento de la planta, ya que dan lugar a que los entrenudos tengan una determinada longitud. Si se inhibe la síntesis de giberelinas, la distancia entrenudos se acorta dando lugar al achaparramiento de la planta y pérdida de funcionalidad, además los pecíolos se acortan, y aumenta el aparato radicular. Todo esto provoca que la planta pierda funcionalidad y muera.
- c) Herbicidas capaces de inhibir la división celular. Hay muchos tipos, pero los más importantes son los N-fenil carbamatos y la Hidrazidamaleica. Los N-fenilcarbamatos, son moléculas cuya estructura básica deriva del ácido carbámico. Son usados en el suelo y tienen poca movilidad, alteran la división celular ya que impiden que se produzca la organización correcta de las



proteínas que forman parte de los microtúbulos del huso acromático; esto origina células con núcleos gigantes sin funcionalidad.

4) Herbicidas con otros mecanismos de acción

- a) Herbicidas que provocan la disrupción de la membrana celular: Son los llamados “aceites minerales herbicidas”. Son mezclas complejas de CH de cadena larga que provienen de la destilación fraccionada del petróleo + fracción seca de la hulla.
- b) Herbicidas que actúan sobre pigmentos
- c) Herbicidas con actividad hormonal

DINÁMICA DE LOS PLAGUICIDAS

La movilidad de los plaguicidas depende de sus propiedades físicas y químicas en el medio, tales como volatilidad, solubilidad, persistencia y la adsorción en el suelo. La concentración de herbicida en el suelo a lo largo del tiempo - persistencia o residualidad depende de las características propias de la molécula (acidez o alcalinidad de la molécula, solubilidad en agua, presión de vapor) y su interacción con las características del suelo (composición de la fracción arcilla, pH, capacidad de intercambio catiónico, área superficial, contenido de materia orgánica) y de los factores ambientales (temperatura, humedad), conformando una serie de procesos de disipación: volatilización, descomposición fotoquímica o química, escurrimiento superficial, degradación química, descomposición microbiana, lixiviación y adsorción (Díaz, 2007).

Si bien existen propiedades específicas que determinan la movilidad de un herbicida en el suelo (Goss, 1992) y (Hornsby, 1992) demostraron que el coeficiente de partición en carbono orgánico (Koc) y la vida media de los plaguicidas (T1/2) pueden utilizarse para comparar sus potenciales de lixiviar a través de la matriz del suelo. Estableciendo que la materia orgánica del suelo es la característica edáfica que más influye sobre el movimiento de los herbicidas. La presencia de capas con materia orgánica produce “atenuación” del flujo del herbicida protegiendo al acuífero de la contaminación.

Por lo tanto para la determinación de la capacidad de infiltración de un herbicida es necesario tener en cuenta: 1) profundidad del acuífero saturado combinado con la dirección predominante del flujo de agua, 2) permeabilidad de los estratos geológicos y de suelo, 3) contenido de materia orgánica del suelo, y 4) Koc y T1/2 del plaguicida (Bedmar, et al., 2004).

HYDRUS 1D

Para la modelación de contaminantes se eligió al programa HYDRUS. HYDRUS, es un programa para simular flujo unidimensional, transporte de un sólo soluto y movimiento de calor, en un medio variablemente saturado. En la versión HYDRUS-2D el software permite resolver el transporte en un espacio bidimensional (2D-el nivel estándar, que se corresponde con el ex HYDRUS-2D con MeshGen-2D) también se encuentra la versión para la resolución en 3D para geometrías tridimensionales hexaédricas - 3D-Lite) o geometrías más complejas (es decir, 2D-estándar para uso general en dos dimensiones, geometrías 3D estándar para los problemas que se pueden definir utilizando el general bidimensional de base y una tercera dimensión en capas, o 3D-Profesional para aplicaciones generales geometrías tridimensionales). Estas versiones modelan el flujo del agua usando la ecuación de Richards, y los solutos y el movimiento de calor usando ecuaciones de transporte convección y dispersión. El programa permite histéresis tanto en la retención suelo-agua como en las funciones de conductividad hidráulica. Permite escalar la funciones hidráulicas de suelo no saturado



para tener en cuenta los cambios continuos en las propiedades hidráulicas. Además, considera condiciones alternativas de drenaje de bordes.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Dada la necesidad de mejorar el conocimiento de plaguicidas en terrenos de la región centro del país dedicado especialmente a la actividad agrícola se eligió una parcela experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Las pruebas fueron realizadas en el INTA ubicado en la coordenadas geográficas 63° 44'44.91'' Oeste 31° 52' 19.08'' Sur, Ruta Nacional N°9 km 636, Manfredi, Córdoba, Argentina, con una elevación de 295 msnm. El lote donde se realizaron la muestras está identificado como lote 20 y tiene un área aproximada de 25 ha, posee un sistema de riego suplementario en funcionamiento tipo pivote central. Durante el año se realiza la rotación de cultivo entre el maíz, soja – trigo y maíz, trigo-soja.

La estación experimental del INTA MANFREDI está caracterizada dentro de la llanura central Cordobesa, en un área de transición entre la subregión que se conoce con el nombre de plataforma basculada o Pampa alta y la subregión denominada Pampa plana.

La Pampa alta se caracteriza por presentar relieve de lomas planas muy extendidas desarrolladas sobre sedimentos loésicos, con escasa pendiente las cuales no superan el 0.5%. El drenaje se encuentra por lo general orientado de norte a sur guardando entre si un notable paralelismo, después de fuertes lluvias el desagüe o escurrimiento es llevado hacia lagunas intermedias y temporarias, donde generalmente son eliminadas por evaporación e infiltración.

El tipo de suelo presente dentro del lote 20 se caracteriza como un haplustol étnico, limosa gruesa, mixta, térmica para capacidad de uso IIIc. Este suelo presenta característica bien o algo excesivamente drenado, desarrollados sobre los materiales franco limosos que ocupan las lomas más extendidas, casi planas (INTA Manfredi, 2010.). En la Tabla 1, se resumen las principales características del suelo presentes en la zona de estudio lote 20 Manfredi.

Tabla 1. Principales características hidráulicas del suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	H.E (%)	ρ^* (g/cm ³)	CC** (cm ³ /cm ³)	PMP***
A	0-23	16.5	68.7	15.7	0,28	1,33	0,34	0,15
AC	23-53	16.1	71.1	12.2	0,25	1,29	0,31	0,14
C	53-+	16	71.9	11.2	0,23	1,19	0,26	0,12

* Densidad aparente del suelo; ** Capacidad de campo; *** Punto de marchitez permanente

TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Para modelar la concentración de una sustancia contaminante sometida a procesos de adsorción se utilizó la ecuación de transporte advectivo-difusivo expresada mediante la ecuación (1)



$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{R} \frac{\partial C}{\partial z} \left(-v + D_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Donde suponemos que la concentración del soluto en las fases sólida y líquida está relacionada por una isoterma de adsorción lineal, el factor de retardo R toma la siguiente expresión (ecuación 2):

$$R = \left(1 + \frac{\rho K_D}{\theta} \right) \quad (2)$$

Siendo K_D el coeficiente de distribución o de adsorción (L/k_g) que caracteriza a la isoterma lineal.

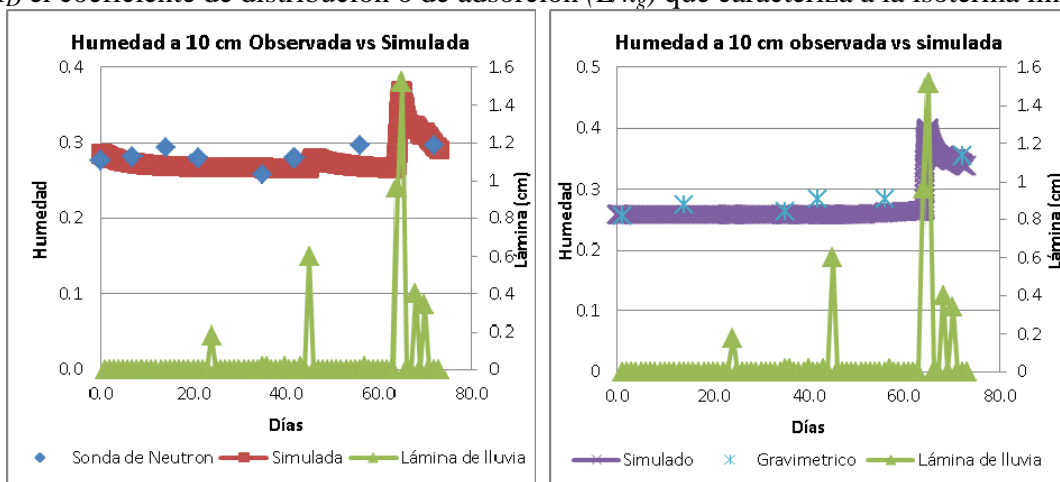
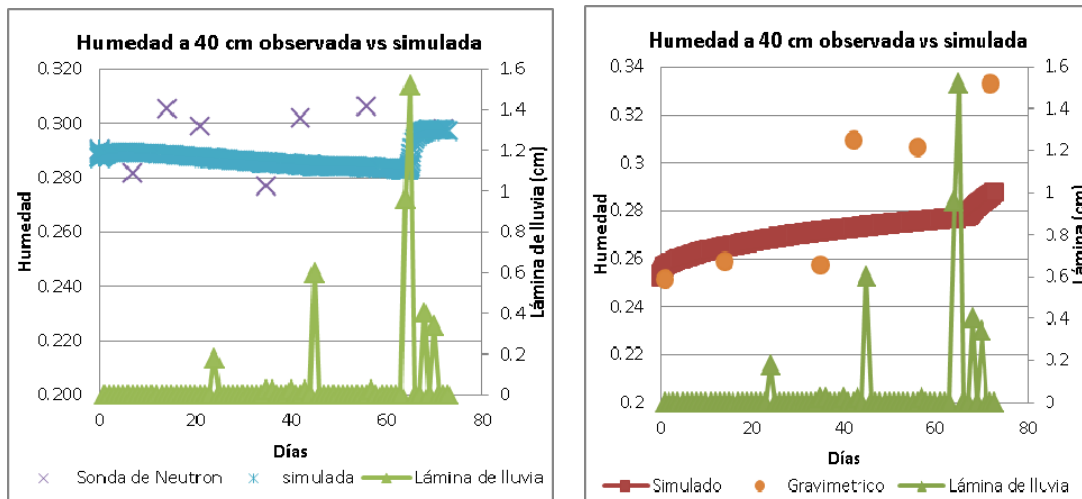


Figura 1 y 2. Simulación directa con los parámetros optimizados a 10 cm y lámina de lluvia para la sonda de neutrones. Simulación directa con los parámetros optimizados a 10 cm y lámina de lluvia para los datos del método gravimétrico (Linares, 2012).



Figuras 3 y 4. Simulación directa con los parámetros optimizados a 40 cm y lámina de lluvia para la sonda de neutrones. Simulación directa con los parámetros optimizados a 40 cm y lámina de lluvia para los datos del método gravimétrico



Simulando la variación del contenido de humedad para los datos optimizados obtenidos por los métodos de medición de neutrones y gravimétricos, se observa en las Figuras 1 y 2 para la profundidad de 10 cm u horizonte A, la evolución en el tiempo de las medidas experimentales y de los valores simulados siguió una misma pauta, con pequeñas diferencias entre ellos ajustándose mejor a los datos de la sonda de neutrones.

En cuanto a la evolución de los contenidos de agua observados y simulados a 40 cm de profundidad muestran un comportamiento distinto, observándose un incremento en el contenido de agua de simulación desde el día 65 debido a la lluvia de 15,2 mm ocurrida el día 22 de Septiembre del 2010 (figuras 3 y 4). Este hecho pone en evidencia que los parámetros de la ecuación de Van Genuchten-Mulam correspondientes a los horizontes AC y C, ajustados mediante modelación inversa no han proporcionado buenos resultados.

Para la obtención de los parámetros de la ecuación de transporte de la atrazina se plantearon dos escenarios para obtener los valores optimizados, uno de ellos fue tomando los parámetros del suelo obtenido a partir de la modelación inversa con los datos observados del sensor de neutrones y el segundo escenario es considerando los parámetros optimizados obtenidos del método gravimétrico. (Tabla 2) Tanto los datos de condición inicial, de borde y meteorológicos son modificados para las fechas del 21 de diciembre del 2010 al 25 de mayo del 2011, obteniéndose los siguientes resultados

Tabla 2 Valores obtenidos de la modelación inversa del escenario uno y del escenario dos.

Escenario UNO			Escenario DOS		
Horizonte	Kd (L/Kg)	S.E.Coeff	Horizonte	Kd (L/Kg)	S.E.Coeff
A	0.41	0.0191		0.1647	0.015
AC	0.61	0.0277	AC	0.2026	0.24

De la tabla 2 y el valor del coeficiente de adsorción K_d del horizonte A y AC se encuentra dentro de los rangos publicados en la literatura, dentro de los valores de K_d estimados estos fueron los que mejor ajuste tuvieron con los datos obtenidos y están dentro los valores obtenidos de referencia 0,2-2 L kg⁻¹ y son aproximados a los determinados para los suelos de Córdoba (Hang & Sereno, 2002.), aunque menores a los calculados mediante la ecuación de regresión (ecuación 3) propuesta (Weber, et al., 2004.):

$$K_d = 4,1 + 0,43\%MO + 0,09\% \text{ Arcillas}(< 2\mu m) - 0,81 pH(\text{agua } 1:1) \quad (3)$$

Donde la aplicabilidad de la ecuación fue verificada para los suelos de Córdoba con datos de 19 suelos cuyos K_d y propiedades habían sido previamente determinadas (Hang & Sereno, 2002.). Los valores de K_d según las características de cada horizonte se presentan Tabla 3.

Tabla 3. Valores de K_d obtenidos de la ecuación de Weber.

Horizontes	K_d (L/Kg)
A	1.2109852
AC	-0.6709456
C	-1.370637

Los valores obtenidos en negativo son considerados como 0. De la



Tabla 2 Valores obtenidos de la modelación inversa del escenario uno se observa que los coeficientes K_d obtenidos para los horizontes estos se encuentran por debajo a los obtenidos por la calibración con parámetros de la sonda. Los valores obtenidos de dispersión longitudinal presentan un intervalo de error muy amplio lo cual lo hacen muy poco exactos para considerarlos.

No obstante valor obtenido para el ajuste de cada uno de los datos observados vs los simulados estimados por medio del error medio cuadrático R^2 es de 0.9278 y 0.8772 el cual representa un buen ajuste del modelo de neutrones a los datos observados pero para el modelo gravimétrico no es muy bueno. Algunas de las causas que pueden modificar este coeficiente es la afectación por el % de materia orgánica y el pH, causando que para mayores pH y menor contenido de materia orgánica el coeficiente de adsorción disminuya.

COMENTARIOS

El movimiento del agua en el suelo es el principal mecanismo para la transferencia de contaminantes a las aguas superficiales y subterráneas (Leeds-Harrison, 1995). La física del agua en el suelo y el movimiento de solutos pueden utilizarse para determinar el comportamiento de estos materiales. El movimiento de solutos a través de la zona no saturada, vadosa, es particularmente importante en lo referente a la contaminación ambiental y agronómica (Costa, 1994). El transporte de solutos está afectado por procesos químicos y físicos de no-equilibrio. El no-equilibrio químico está dado por una cinética de adsorción ya que coexisten sitios de adsorción instantánea (equilibrio) y sitios de adsorción en función del tiempo (no-equilibrio).

La concentración de plaguicidas en diferentes matrices ambientales se estima en base a muestreos basados en métodos estadísticos. En general, debido a la gran variabilidad espacial de las concentraciones de los distintos plaguicidas en el medio, los valores obtenidos en un muestreo sólo son una aproximación a la realidad. Por lo tanto, el mayor o menor grado de certeza en la obtención de los datos colectados y su interpretación depende en gran medida de un adecuado muestreo, de la recolección de la muestra y de la preservación de éstas.

La vegetación pone de manifiesto el déficit hídrico de la región que se produce como resultado de varios factores: contenidos bajos de humedad en el suelo, resistencia hidráulica radicular elevada, altos flujos de transpiración o cualquier combinación de estos.

Con relación a la aplicación de herbicidas la pulverización debería ser realizada bajo el concepto de aplicación de plaguicidas, definido como “el empleo de todos los conocimientos científicos necesarios para que un determinado fitoterápico llegue al blanco en cantidad suficiente para cumplir su cometido sin provocar contaminación ni derivas (Massaro, 2008).

Esta exigencia implica trabajar con un enfoque sistémico, que contemple el análisis y la interacción de múltiples variables. Una interpretación integrada del proceso de aplicación de plaguicidas permite la adecuada preparación de los pulverizadores para realizar una tarea exitosa (Massaro, 2009).

Entre los componentes básicos de este sistema figuran: a) El follaje sobre el que se va a pulverizar. b) El objetivo o blanco del trabajo de pulverización. c) El modo de acción del plaguicida. d) El ambiente meteorológico. e) Calibración del equipo pulverizador. f) La eficacia alcanzada con el tratamiento.

Las gotas pequeñas producen muy buena cobertura y se adhieren bien a superficies que son difíciles de mojar, como las hojas cerosas de gramíneas, pero están expuestas a la deriva (arrastre) y se evaporan rápidamente, especialmente a baja humedad relativa. Las gotas mayores tienden a rebotar y desprenderse de superficies "difíciles de mojar", pero, en este caso la deriva y la evaporación son un problema menor. Las gotas menores de 100 μ m de diámetro caen con relativa lentitud y, por lo tanto,



son arrastradas por el viento y pueden causar daños severos a los cultivos susceptibles adyacentes y a la vegetación no objeto de la aplicación. (Markwell, et al., 2005).

El estudio de contaminantes y flujo de agua en los suelos agrícolas permitirá mejorar las prácticas de aplicación de los herbicidas y conocer los alcances de la contaminación y la permanencia que se produce en el suelo.

Finalmente es necesario continuar con este tipo de estudios que permitirán establecer criterios de control en los suelos para la aplicación de los herbicidas y evitar las contaminaciones de los suelos y las napas freáticas.



Bibliografía

- Ashton, F. M., & Crafts, A. S. (1981). Mode of action of herbicides. Wiley-Interscience, New York, NY , 525
- Bedmar, F., Costa, J. L., Suero, E., & Jiménez, D. (2004). Transport of atrazine and metribuzin in three soils of the humid pampas of Argentina. *Weed Technology* , 18, 1-8.
- CASAFE. (2012). Herbicidas. Recuperado el 31 de 10 de 2012, de <http://www.casafe.org.ar/pdf/Herbicidas.pdf>.
- Coroado, P. (12 de 05 de 2011). Coroado. Recuperado el 24 de 10 de 2012, de http://www.coroado-project.eu/?page_id=52.
- Costa, J. K. (1994). Model comparison of unsaturated steady-state solute transport in a field plot. *Soil Science Society of America Journal* , 58, 1277-1287.
- Díaz T, M. V. (2007). Estudios del sistema suelo-surfactante plaguicida en los procesos de adsorción y desorción de atrazina, MBT y clorpirifos. Santiago de Chile: Universidad de Chile, facultad de ciencias químicas y farmaceuticas.
- Doll, J. (1982). Los herbicidas: modo de actuar y síntomas de toxicidad. Cali, Colombia: Centro internacional de agricultura tropical (CIAT).
- Duke, S. O., & Dayan, F. E. (2001). Classification and mode of action of the herbicides. En R. Prado, Jorrín, & J. V. (Edits.), *Uso de Herbicidas en la Agricultura del Siglo XXI* (págs. 31-44). España: Servicio de Publicaciones. Universidad de Córdoba.
- Giuliano, G. (1995). Groundwater vulnerability to pesticides: An overview of approaches and methods of evaluation. Chapter 4. En M. a. Vighi (Ed.), *Pesticide risk in groundwater* (págs. 101-118). Florida, USA: CRC Press, Inc. Boca Raton.
- Goss, D. (1992). Screening procedure for soils and pesticides for potential water quality impacts. *Weed Technology* , 6, 701-708.
- Gunsolus, J. L., & Curran, W. S. (1996). Herbicide mode of action and injury symptoms. *North Central Extension Publication* , 377, 14.
- Hang, S., & Sereno, R. (2002.). Adsorción de atrazina y su relación con las características sedimentológicas y el desarrollo del perfil de dos suelos de la Provincia de Córdoba. *Revista de Investigación Agropecuaria*, 31 (3), 73-87.
- Hornsby, A. (1992). Site-specific pesticide recommendations: the final step in environmental impact prevention. *Weed Technology* , 6, 736-742.
- Leeds-Harrison, P. (1995). Movement of water and solutes to surface and ground waters. En A. A. Walker (Ed.), *Proceedings of a Symposium held at The University of Warwick, Coventry* (págs. 3-12.). BCPC, Monograph No 62.
- Linares, J. (2012). Aplicación de un Modelo Unidimensional para Flujo en Suelos Saturados y no Saturados y Transporte de Herbicidas. Aplicación en Zona Centro de la Provincia de Córdoba. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba.
- Macías, F. (1996). Contaminación de suelos: efectos a corto y largo plazo. En *XIII Congreso Latino Americano de Ciencia Do Solo. Aguas de Lindoia*. SP. Brasil.
- Markwell, J., Namuth, D., & Hernández, I. (2005). Library of Crop Technology Lessons Modules. Recuperado el 26 de 10 de 2012, de http://plantandsoil.unl.edu/croptechology2005/weed_science/?what=topicsD&info
- Massaro, R. (2008). Aplicación de plaguicidas con pulverización terrestre en trigo: condiciones operativas y aportes del desarrollo de la maquinaria. INTA EEA Oliveros. *Revista PMP Trigo* , 37, 70-75.
- Massaro, R. (2009). Criterios para la aplicación de herbicidas en barbechos químicos. *CREA Siembra directa* , 71-78.
- Nissen, S., Namuth, d., & Hernández-Ríos, I. (2005). Library of Crop Technology Lessons. University of Nebraska. Recuperado el 25 de 10 de 2012, de http://plantandsoil.unl.edu/croptechology2005/weed_science/?what=topicsD&topicOrder=1&informationModuleId=1008088419
- Schmidt, R. R. (2005.). Clasificación de los herbicidas según su modo de acción. Recuperado el 31 de 10 de 2012, de http://www.plantprotection.org/HRAC/Spanish_classification.htm.



Sterling, T. M., & Namuth, d. H.-R. (2005). Library of Crop Technology Lessons Modules. University of Nebraska, Lincoln. Recuperado el 25 de 10 de 2012, de http://plantandsoil.unl.edu/croptechnology2005/weed_science/?what=topicsD&topicOrder=1&informationModuleId=1042575278.

Weber, J., Reinhardt, G., & Wilkerson, C. (2004.). Calculating pesticide sorption coefficients (K_d) using selected soil properties. *Chemosphere* , 55, 157–166.