

Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina

BEDMAR, F.¹; GIANELLI, V.²; ANGELINI, H.²; VIGLIANCHINO, L.³

RESUMEN

La cuenca del arroyo El Cardalito (102.6 km²) se encuentra localizada en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) cerca de la ciudad de Mar del Plata, donde existe un importante cinturón hortícola con uso intensivo de agroquímicos. El objetivo del trabajo consistió en estimar el riesgo potencial de lixiviación de los herbicidas, insecticidas y fungicidas comúnmente utilizados en dicha cuenca. A tal fin, se utilizaron los índices conocidos como factor de retardo (RF) y factor de atenuación log-transformado (AFT). Tanto el RF como el AFT se calcularon para los horizontes A, B y C de las cinco series de suelo que integran esta cuenca, así como para el perfil completo, teniendo en cuenta sus propiedades y profundidad. Considerando el RF, la capacidad de lixiviar de los plaguicidas fue superior en el horizonte C de los suelos respecto de los horizontes A y B o el perfil. En ese horizonte, los insecticidas con mayor movilidad fueron carbofuran, pirimicarb, metamidofós, imidacloprid y tiametoxam mientras que en el caso de los fungicidas fueron fosetil aluminio, Captan, zineb y carbendazim. Por su parte, se estimó que 12 de 25 herbicidas considerados presentaron elevada movilidad, especialmente dicamba, picloram y Naptalam. En el caso del AFT, se determinó, para la mayoría de los plaguicidas, que la capacidad de lixiviar varió según el horizonte considerado de acuerdo al orden C > A > B, mientras que para todos los horizontes la peligrosidad se incrementó al aumentar la recarga neta, siendo máxima a 2.3 mm día⁻¹. Por último, considerando el perfil de suelo, se determinó que la lixiviación de la mayoría de los plaguicidas evaluados, a excepción de Picloram, sería improbable a muy improbable para las recargas estudiadas (0.3, 1.1 y 2.3 mm día⁻¹). Si bien los índices utilizados constituyen valiosas herramientas para estimar la vulnerabilidad de los acuíferos por lixiviación de plaguicidas, resulta imprescindible la realización de monitoreos a campo que verifiquen el grado de asociación con la realidad.

Palabras claves: factor de retardo, factor de atenuación, lixiviación, herbicidas, insecticidas, fungicidas.

ABSTRACT

The basin of El Cardalito stream (102.6 km²) is located in the southeast of Buenos Aires province (Argentina), near the city of Mar del Plata. An important horticultural belt with intensive use of agrochemicals is located in it. The objective of this work was to estimate the potential risk of leaching of the most commonly used herbicides, insecticides and fungicides in the

¹Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Ruta 226 km 73.5, 7620 Balcarce, Argentina.
Correo electrónico: bedmar.francisco@inta.gob.ar

²Estación Experimental Agropecuaria, INTA Balcarce. Ruta 226 km 73.5, 7620 Balcarce, Argentina.
Correo electrónico: gianelli.valeria@inta.gob.ar; angelini.hernan@inta.gob.ar

³Oficina INTA Mar del Plata, Estación Experimental Agropecuaria, INTA Balcarce, Dorrego 2593, 7600 Mar del Plata.
Correo electrónico: viglianchino.liliana@inta.gob.ar

basin. For this purpose, we used the Retardation Factor (RF) and the Attenuation Factor log transformed (AFT) indexes. Both RF and AFT were calculated for the A, B and C horizons of the five soil series that integrate the watershed, as well as for the complete soil profile, taking into account their properties and depth. According to the RF, the leaching potential of the pesticides was higher in the C horizon, compared to A and B horizons or the complete profile. In the C horizon, the insecticides with higher mobility were Carbofuran, Methamidophos, Pirimicarb, Imidacloprid and Thiamethoxam. In the case of fungicides, the highest mobility was found in Fosetyl-aluminium, Captan, Zineb and Carbendazim. On the other hand, 12 of the 25 studied herbicides had high mobility, particularly Dicamba, Picloram and Naptalam. The AFT values indicated that for most of the pesticides, the risk of leaching was higher in the C horizon, followed by A and B horizons. In all cases, the risk of leaching increased with water recharge, reaching its maximum at 2.3 mm day^{-1} . Finally, considering the soil profile, leaching of most pesticides evaluated, except Picloram, would range between unlikely and very unlikely for all the studied recharges ($0.3, 1.1$ y 2.3 mm day^{-1}). The indices used are valuable tools for estimating the vulnerability of aquifers due to leaching of pesticides, however it is essential to perform field monitoring to verify the degree of association with reality.

Keywords: retardation Factor, Attenuation Factor, leaching, herbicides, insecticides, fungicides.

INTRODUCCIÓN

Los plaguicidas han representado hasta la actualidad el gran sostén del crecimiento de los sistemas de producción agropecuarios. Sin embargo, en los últimos años el incremento de su uso ha dado origen a una creciente preocupación sobre el efecto que pueden ocasionar en el ambiente.

Desde hace años, se han identificado residuos de plaguicidas en todos los compartimientos ambientales (aire, agua y suelo) en diversas regiones geográficas, incluyendo aquellas muy remotas al sitio original de su liberación (Gevao y Jones, 2002). En tal sentido, los plaguicidas constituyen la principal fuente de contaminación no puntual del agua subterránea debido a la lixiviación tanto desde suelos agrícolas como de los no cultivados habiendo sido ampliamente detectados a nivel mundial tanto en agua superficial como subterránea (Cerejeira *et al.*, 2003; Larsen *et al.*, 2013).

El destino de los plaguicidas en el ambiente constituye un complejo proceso influenciado por sus propiedades fisicoquímicas, las prácticas de manejo, las condiciones climáticas, las propiedades del suelo y del agua (Spadotto *et al.*, 2002). Por tanto, la cantidad de plaguicida lixiviado que puede llegar al agua subterránea depende del tiempo de tránsito a través de la zona no saturada (tiempo requerido por los plaguicidas para viajar desde la superficie hasta una determinada profundidad del perfil del suelo) y de la capacidad de los suelos para retardar o atenuar el movimiento de los plaguicidas (Sanderson y Lowe, 2002).

El potencial de lixiviación de un compuesto químico puede ser determinado directamente o estimado indirectamente mediante modelos, índices o indicadores (Oliveira *et al.*, 2001). Rao *et al.*, (1985) desarrollaron un modelo para determinar la contaminación potencial del agua subterránea basado en el riesgo de lixiviación de los plaguicidas a través del perfil del suelo. Dicho método establece la determinación de dos índices: factor de atenuación (AF) y factor de retardo (RF), que contemplan propiedades del suelo (densidad aparente, contenido de carbono orgánico, contenido

de humedad a capacidad de campo), características hidrológicas y climáticas (profundidad del perfil, recarga neta de agua subterránea) y de los plaguicidas en estudio (Vida media y Koc).

La determinación de los índices AF y RF permite estimar el riesgo potencial de lixiviación de los plaguicidas hacia el agua subterránea y establecer un ranking de peligrosidad de estos (Giambelluca *et al.*, 1996; Paraíba y Spadotto, 2002; Sanderson y Lowe, 2002; Bernard *et al.*, 2005; Kookana *et al.*, 2005). En nuestro país, Natale *et al.* (2002) utilizaron el índice AF para estudiar los 26 plaguicidas más empleados y determinaron que la vulnerabilidad del agua subterránea de los acuíferos freáticos y Puelche de Bigand (provincia de Santa Fe) fue de baja a mediana. Por su parte, en un estudio desarrollado en la cuenca alta del arroyo Pantanoso, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Gianelli *et al.*, 2010), se determinó que los herbicidas presentan un riesgo más alto de contaminación del agua subterránea por lixiviación que los insecticidas y los fungicidas debido a su menor grado de retención, mayor vida media y mayor solubilidad en agua.

A diferencia de otros índices, que se basan solamente en las características fisicoquímicas de los plaguicidas, el RF y el AF tienen en cuenta también las características del medio (propiedades del suelo, las prácticas de manejo y las condiciones climáticas e hidrológicas), por lo que su valor depende del terreno donde se apliquen. Esta particularidad hace posible la construcción de mapas de riesgo que permiten visualizar las áreas de mayor riesgo de contaminación potencial en las cuencas en estudio.

Por tanto, los objetivos del presente trabajo fueron a) determinar el riesgo de lixiviación de los herbicidas, insecticidas y fungicidas más utilizados en la cuenca del arroyo El Cardalito (sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina), b) establecer mediante los índices: factor de retardo y factor de atenuación, la capacidad diferencial para lixiviar de los plaguicidas en función de la heterogeneidad en el perfil del suelo, y c) integrar este modelo a Sistemas de In-

formación Geográfica a fin de visualizar las áreas de mayor riesgo potencial de contaminación del agua subterránea en la cuenca en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y suelos

La cuenca hidrológica del arroyo El Cardalito se localiza en el sudeste de la provincia de Buenos Aires ($37^{\circ} 56' 44,74'' - 38^{\circ} 2' 59,48''$ S y $57^{\circ} 46' 12,49'' - 57^{\circ} 32' 14,36''$ O), Argentina, abarcando una superficie de 102.58 Km² (10258 ha). La región presenta clima mesotermal-húmedo-subhúmedo según la clasificación de Thornthwaite (1948), con una temperatura media anual del aire de 13° C y una precipitación media anual de 928 mm.

Los suelos que integran esta cuenca pertenecen predominantemente a la serie Mar del Plata; si bien también se presentan en mucha menor proporción las series Tandil, Tres Esquinas, La Alianza, Sierras de los Padres y Dos Naciones (tabla 1). Cabe destacar que dentro de la cuenca estudiada se encuentra, en la región este, la ciudad de Mar del Plata (figura 1).

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos fueron obtenidas de la Carta de Suelos de la República Argentina, escala 1:50000, Instituto de Suelos, INTA (1960-1970) y del laboratorio de Física de Suelos (EEA INTA Balcarce). Para la descripción de los perfiles de los suelos se consideraron las características de los horizontes A, B y C de los mismos (tabla 1). Debe destacarse que la información de los suelos data de la década del 70, habiendo sufrido la región, desde ese entonces, un elevado grado de agriculturización que produjo una disminución principalmente de los contenidos de materia orgánica del horizonte superficial de sus suelos (Sainz Rozas *et al.*, 2011). Por tal motivo, se realizó una estimación de los valores actuales

del contenido de materia orgánica considerando una disminución promedio del 28% en el horizonte A de todas las series de suelo de la cuenca, resultante de la comparación de los datos originales con los del relevamiento efectuado por Sainz Rozas *et al.* (2011) en suelos de la región pampeana de Argentina.

Cultivos

Los cultivos, que por lo general se desarrollan en esta cuenca, son hortícolas, si bien en algunos casos se incluyen, trigo, girasol, soja, maíz, papa y pasturas predominando el sistema de labranza convencional para la producción de estos (RIAN, 2008; Sagua *et al.*, 2009). Los cultivos hortícolas poseen una gran importancia en esta cuenca, dado que forman el llamado cinturón hortícola de Mar del Plata, localizándose en una franja de aproximadamente 25 km que bordea la ciudad (Sagua *et al.*, 2009). Estos cultivos suelen caracterizarse por la utilización intensiva de agroquímicos y riego, por lo cual constituyen un ambiente especial para el estudio de los posibles impactos sobre el agua subterránea.

Según una estimación de la oficina INTA Mar del Plata, en 2009/10 los principales cultivos hortícolas estuvieron constituidos por 28 especies con una superficie total de 9650 hectáreas (tabla 2).

Plaguicidas

Los principales herbicidas, insecticidas y fungicidas utilizados en los cultivos hortícolas de la cuenca en estudio (tabla 2) se determinaron mediante encuestas a profesionales-técnicos de la actividad privada y oficial, informes oficiales y publicaciones (oficina INTA Mar del Plata; cátedras de Terapéutica Vegetal y Horticultura de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata; Tangorra *et al.*, 2006).

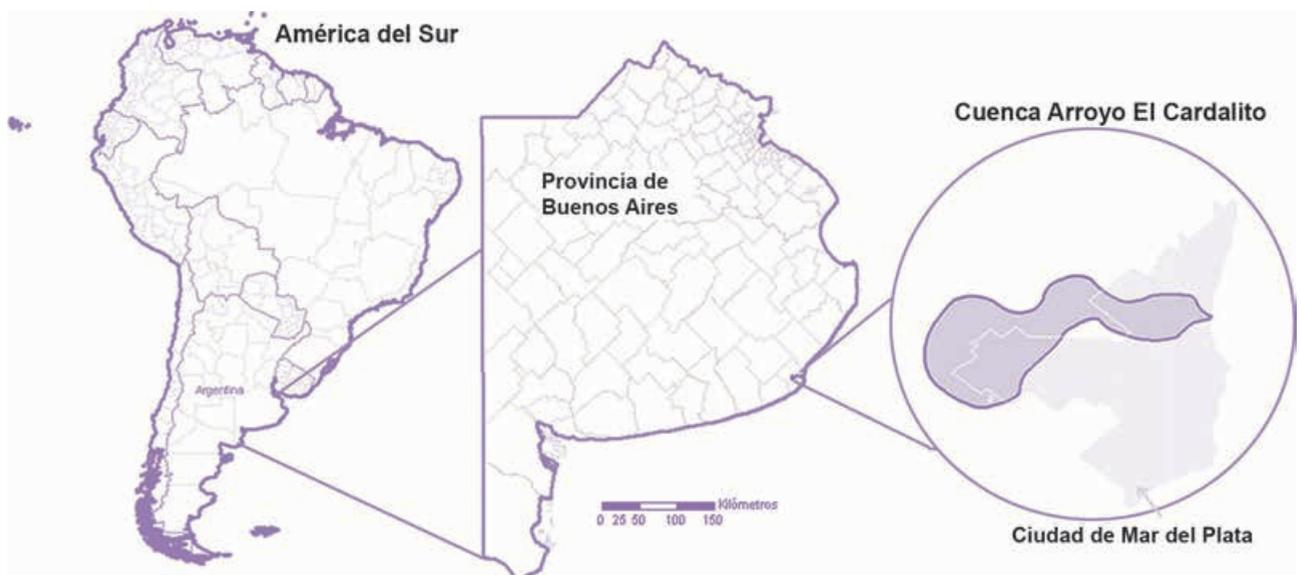


Figura 1. Localización del área de estudio.

Serie	Clasificación taxonómica	Superficie de cuenca ocupada por cada serie (%)	Horizontes edáficos	Profundidad (cm)	Fracción de carbono	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Humedad a capacidad de campo (L dm ⁻³)	Porosidad (m ³ m ⁻³)
Mar del Plata	Argiudol Típico, Limosa fina, illítica, muy profunda, térmica ¹	90,4	AP	8	0,0289	1,1	0,3	0,56
			A1	20	0,022	1,1	0,3	0,56
			B1	30	0,0174	1,2	0,28	0,5
			B21T	19	0,0136	1,3	0,31	0,46
			B22T	20	0,0058	1,5	0,36	0,38
			B3	21	0,0029	1,5	0,34	0,38
			C	59	0,0004	1,3	0,23	0,48
Tandil	Argiudol Típico, Fina, illítica, térmica ¹	5,5	A1	28	0,0281	1,2	0,33	0,45
			B1	6	0,0174	1,3	0,33	0,48
			B2T	46	0,0074	1,4	0,35	0,44
			B3	20	0,0018	1,3	0,33	0,48
			C	35	0,0003	1,3	0,38	0,48
Tres Esquinas	Argiudol Vértico, Fina, illítica, térmica ²	2,7	AP/A12	30	0,0309	1,1	0,3	0,56
			B1	15	0,0075	1,2	0,28	0,5
			B21T	25	0,0053	1,3	0,31	0,46
			B22	35	0,0028	1,5	0,36	0,38
			B3	35	0,0019	1,5	0,34	0,38
			C	40	0,0015	1,3	0,23	0,48
			La Alianza	Paleudol Petrocálcico, Limosa fina, mixta, somera, térmica ²	1,3	Ap	28	0,0429
Sierra de los Padres	Hapludol Lítico, Fina, mixta, mésica ¹	0,1	Ap	15	0,0634	1,1	0,31	0,5
			2R	-	-	-	-	-
Cinco Cerros	Paleudol Petrocálcico, Fina, illítica, somera, térmica ¹	0,02	Ap	23	0,0251	1,1	0,31	0,5
			Bts	22	0,0153	1,2	0,3	0,41
			2Ckkm	-	-	-	-	-

Tabla 1. Características de las series de suelos de la cuenca del arroyo El Cardalito.

¹USDA-Soil Taxonomy V. 2006

²USDA-Soil Taxonomy V. 2010

En la tabla 3 se presentan los plaguicidas seleccionados y sus propiedades fisicoquímicas, las cuales fueron obtenidas mediante una recopilación de información proveniente de diversas bases de datos (1. AIDATA; 2. EU Pesticides Database; 3. Extension Toxicology Network; 4. IUPAC; 5. National Pesticide Information Center. OSU Extension Pesticide Properties Database).

Índices de contaminación potencial

A fin de estimar el potencial de lixiviación de los plaguicidas seleccionados y el grado de vulnerabilidad del agua subterránea, se utilizó un modelo propuesto por Rao *et al.* (1985), el cual establece la determinación de dos índices: factor de atenuación (AF) y factor de retardo (RF). El factor de atenuación estima la fracción de plaguicida aplicado a la superficie que lixivía a través del perfil del suelo y se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$AF = \exp [-(0,693*d*\theta_{FC}*RF)/(q*DT50)] \quad (1)$$

donde d (cm) es la profundidad del suelo considerado, θ_{FC} (m³ m⁻³) el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo, q (cm día⁻¹) la recarga neta de agua subterránea, DT50 (días) la vida media de los plaguicidas en el suelo y RF el factor de retardo.

En el presente trabajo se utilizó el índice AFT que corresponde a la transformación logarítmica del factor AF para simplificar la interpretación de los resultados (Bernard *et al.*, 2005):

$$AFT = \ln (AF)/(-0.693) \quad (2)$$

El factor de retardo (RF) indica la capacidad de los plaguicidas para lixiviar a través del suelo, teniendo en cuenta la adsorción y distribución entre las fases sólidas y líquidas y se define como:

$$RF = 1 + (pd*f_{oc}*Koc)/(\theta_{FC}) \quad (3)$$

donde pd (Mg m⁻³) es la densidad aparente del suelo, f_{oc} es la fracción decimal del contenido de C orgánico (Díaz-

Cultivos	Hectáreas	Rendimiento (Tn/ha)	Herbicidas	Insecticidas	Fungicidas
Acelga	450	15	Cloridazon, Lenacil, Setoxidim	Abamectin, Cipermetrina, Deltametrina, Imidacloprid, Lambdacialotrina	Carbendazim, Clorotalonil, Mancozeb, Oxicloruro de cobre
Ajo	50	7	Bromoxinil, Diuron, Linuron, Oxadiazon, Oxifluorfen, Pendimetalin, Prometrina, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Carbofuran, Cipermetrina, Clorpirifos	Carbendazim, Carboxin+Tiram, Clorotalonil
Albahaca	10	20	Trifluralina	Abamectin, Deltametrina	Mancozeb
Alcaucil	50	16	Prometrina, S-Metolacloro	Deltametrina, Imidacloprid	Carbendazim, Carboxin+Tiram
Apio	130	25	Flurocloridona, Linuron, Prometrina, Setoxidim, Trifluralina	Abamectin, Cartap	Captan, Carbendazim, Clorotalonil, Mancozeb, Zineb, Oxicloruro de cobre
Arveja fresca	70	7	Bentazon, Flurocloridona, Linuron, S-metolacloro, Metribuzin, Pendimetalin, Prometrina, Setoxidim, Trifluralina	Deltametrina, Pirimicarb, Cipermetrina	Carbendazim, Captan, Clorotalonil, Mancozeb, Oxicloruro de cobre, Zineb
Berenjena	40	30	Setoxidim, S-Metolacloro	Deltametrina, Imidacloprid, Lambadacialotrina, Pirimicarb	Carbendazim, Clorotalonil
Brócoli	150	10	Setoxidim, Trifluralina	Tiametoxam	Captan, Clorotalonil, Oxicloruro de cobre, Zineb
Cebolla de verdeo	500	15	Linuron, Bentazon, Bromoxinil, Diuron, Fenoxaprop etil, Oxadiazon, Oxifluorfen, Pendimetalin, Prometrina, Setoxidim	Cipermetrina, Clorpirifos, Lambdacialotrina, Mercaptotion, Tiametoxam	Azoxistrobina, Captan, Carbendazim, Clorotalonil, Zineb
Cebolla de bulbo	400	40	Pendimetalin, Prometrina, Setoxidim		
Chaucha	100	10	Setoxidim, Trifluralina	Deltametrina	Zineb
Choclo	1550	15	Acetoclor, Bentazon, Bromoxinil, Dicamba, Flurocloridona, Linuron, Metribuzin, Pendimetalin, Picloram, S-Metolacloro	Deltametrina, Carbofuran, Metamidofos, Cipermetrina, Clorpirifos	Carbendazim+ Tiram
Coliflor	80	25	Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Cipermetrina, Deltametrina, Endosulfan, Pirimicarb, Tiametoxam	Clorotalonil, Zineb,
Espárrago	90	8	Bentazon, Linuron, Metribuzin, Naptalan, Setoxidim	Carbofuran,	Carbendazim
Espinaca	150	15	Cloridazon, Fenmedifan, Lenacil, Setoxidim, S-Metolacloro	Abamectin, Cipermetrina, Deltametrina, Imidacloprid, Lambdacialotrina	Azoxistrobina, Carbendazim
Frutilla	130	35	Lenacil, Setoxidim	Abamectina	Azoxistrobina, Captan, Fosetil Aluminio, Oxicloruro de cobre, Zineb
Hinojo	120	25	Prometrina		
Lechuga	2000	25	Fluazifop p butil, Propizamida, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Abamectin, Imidacloprid, Lambdacialotrina, Pirimicarb	Azoxistrobina, Carbendazim, Propamocarb, Zineb
Perejil	300	20	Flurocloridona, Linuron, Propizamida, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Lambdacialotrina, Tiametoxam	Captan, Carbendazim
Pimiento	80	15	Fenoxaprop p etil, Napropamida, Prometrina, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Abamectin, Cipermetrina, Clorpirifos, Deltametrina, Imidacloprid, Lambdacialotrina, Metamidofos, Pirimicarb	Azoxistrobina, Captan, Carbendazim, Clorotalonil, Fosetil Aluminio, Mancozeb, Oxicloruro de cobre, Propamocarb, Zineb
Puerro	120	20	Linuron		

Cultivos	Hectáreas	Rendimiento (Tn/ha)	Herbicidas	Insecticidas	Fungicidas
Radicheta	30	20		Abamectin, Imidacloprid, Lambdacialotrina	Carbendazim
Remolacha	350	30	Cloridazon, Lenacil, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Pirimicarb	Carbendazim, Mancozeb, Oxicloruro de cobre, Zineb,
Repollo	150	35	S-Metolacloro, Trifluralina	Deltametrina, Imidacloprid, Mercaptotion, Pirimicarb,	Carbendazim, Clorotalonil, Mancozeb, Zineb
Tomate	350	50	Fenoxaprop p etil, Fluazifop p butil, Metribuzin, Napropamida, Pendimetalin, Prometrina, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Abamectin, Carbofuran, Cipermetrina, Clorpirifos metil, Deltametrina, Imidacloprid, Lambdacialotrina, Mercaptotion, Metamidofos, Tiametoxam	Azoxistrobina, Captan, Carbendazim, Clorotalonil, Fosetil Aluminio, Mancozeb, Oxicloruro de cobre, Propamocarb, Zineb
Zanahoria	1000	40	Fenoxaprop p etil, Flurocloridona, Metribuzin, Prometrina, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina, Linuron, Pendimetalin	Oxidemeton metil	Azoxistrobina, Zineb
Zapallito de tronco	300	25	Fluazifop p butil		Carbendazim, Oxicloruro de cobre
Zapallo	700	25	Naptalan, Setoxidim, S-Metolacloro, Trifluralina	Pirimicarb	Azoxistrobina, Captan, Carbendazim, Clorotalonil, Mancozeb, Oxicloruro de cobre, Propamocarb, Zineb
Otras	200	20			
Superficie total	9,65	-	-	-	-

Tabla 2. Estimación de la superficie total, rendimientos promedio de los principales cultivos hortícolas al aire libre del sudeste de la provincia de Buenos Aires durante el ciclo 2009/10 (oficina INTA Mar del Plata) y principales plaguicidas empleados en cada cultivo.

Díaz *et al.*, 1998) y Koc ($m^3 kg^{-1}$) el coeficiente de reparto en C orgánico-agua.

Tanto el AF como el RF fueron calculados para cada horizonte considerando sus propiedades fisicoquímicas y profundidad (tabla 1). A fin de realizar los cálculos se consideraron los horizontes A, B y C de las 5 series de suelo presentes en la cuenca. Posteriormente se determinaron los factores globales para el perfil de suelo integrando los índices parciales obtenidos para los horizontes de cada serie de suelo sobre la base de la metodología propuesta por Spadotto *et al.* (2002) y Kookana *et al.* (2005):

$$AFT_{global} = \prod AFT_i \quad (4)$$

donde \prod indica el producto de los índices obtenidos para cada horizonte y el sufijo i designa a los horizontes ($i = A, \dots, n$).

Una vez calculados los índices RF y AFT, los plaguicidas se clasificaron basándose en la movilidad y en el potencial de lixiviación empleando la clasificación propuesta por Khan y Liang (1989) (tabla 4).

Recarga neta de agua subterránea

La recarga neta de agua subterránea se estimó a partir del estudio realizado por Aparicio *et al.* (2008) para un suelo de la serie Mar del Plata. Estos autores calcularon la recarga mediante el modelo LEACHM versión W (Leaching Estimation and Chemistry Model) (Hutson y Wagenet, 1992) para una serie de 8 años. Dentro del período calculado, se seleccionaron los ciclos correspondientes a los valores de máxima (2.3 mm día^{-1}) y mínima (0.3 mm día^{-1}) recarga de agua, y un promedio de los 8 años (1.1 mm día^{-1}). Asimismo, con el fin de corroborar estos valores, se realizó el cálculo de la recarga neta de agua, considerando el estudio realizado por Quiroz Londoño *et al.* (2012), quienes encontraron para el acuífero pampeano, valores de recarga entre 9 y 21% del total de la precipitación, con un valor medio de 14%. A tal fin, la recarga se determinó considerando el valor promedio correspondiente al 14% de las precipitaciones anuales para la localidad de Balcarce (período 1970-2011) obteniéndose un valor de 1.3 mm d^{-1} , (5), valor similar al reportado por Aparicio *et al.* (2008) en su estudio:

	$T_{1/2}$	K_{oc}	
Herbicidas	Acetoclor	13	130
	Bentazon	20	34
	Bromoxinil	7	1079
	Cloridazon	21	120
	Dicamba	14	2
	Diuron	90	480
	Fenmedifam	30	2400
	Fenoxaprop etil	9	9490
	Fluazifop p butil	15	5700
	Flurocloridona	92	893
	Glifosato	47	24000
	Lenacil	10	130
	Linuron	60	400
	Metribuzin	40	60
	Napropamida	70	700
	Naptalam	14	20
	Oxadiazon	60	3200
	Oxifluorfen	35	100000
	Pendimetalin	90	5000
	Picloram	90	16
Prometrina	60	400	
Propizamida	60	800	
S- Metolacoloro	90	200	
Setoxidim	5	100	
Trifluralina	60	8000	
Insecticidas	Abamectina	28	5000
	Carbofuran	50	30
	Cipermetrina	30	100000
	Clorpirifos	30	6070
	Deltametrina	104	186067
	Imidacloprid	127	440
	Lambdacialotrina	30	180000
	Mercaptotion	1	1800
	Metamidofos	6	5
	Pirimicarb	10	60
	Tiametoxam	111	245
	Fungicidas	Azoxistrobina	65
Captan		2,5	200
Carbendazim		40	225
Clortalonil		22	850
Flutriafol		400	1225
Fosetil Aluminio		1	20
Mancozeb		70	2000
Oxicloruro de cobre		1600	4000
Propamocarb	32	1000000	
Zineb	30	1000	

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas (Vida media $T_{1/2}$ y coeficiente de partición en carbono orgánico K_{oc}) de los principales herbicidas, insecticidas y fungicidas utilizados en los cultivos seleccionados en la cuenca del arroyo El Cardalito.

$$R = \frac{\sum PP}{\sum DP} * 14\% \quad (5)$$

donde R es la recarga neta (mm d^{-1}), PP (mm) el total de precipitaciones anuales y DP el número total de días con precipitaciones.

Mapas de riesgo

Una vez determinados los índices, se generaron mapas del RF y AFT en la cuenca en estudio para cada plaguicida utilizando el programa ESRI ArcMap 9.2. Para su confección se obtuvieron los índices de cada serie de suelo y se ponderaron a partir del porcentaje de participación en cada unidad cartográfica la cual constituye la unidad de mapeo empleada para la representación de los resultados a través de mapas de riesgo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta las series de suelos Mar del Plata, Tandil y Tres Esquinas, las cuales representan el 98.6% de la superficie de esta cuenca y poseen un perfil desarrollado (tabla 1), la movilidad de los plaguicidas, según el RF, fue superior en el horizonte C de los suelos, respecto de los horizontes A y B. Asimismo, si bien con algunas excepciones según ingrediente activo, el orden de movilidad fue herbicidas > insecticidas > fungicidas. En el horizonte C, los insecticidas con mayor movilidad fueron carbofuran, pirimicarb, metamidofós, imidacloprid y tiametoxam, mientras que en el caso de los fungicidas, el más móvil fue fosetil aluminio, seguido por Captan, zineb y carbendazim. Por su parte, se estimó que 12 herbicidas presentaron elevada movilidad, especialmente dicamba, picloram y Naptalam (figura 2).

En el caso del AFT, independientemente de la recarga de agua considerada, se determinó que la capacidad de lixiviación, para la mayoría de los plaguicidas, varió según el horizonte de acuerdo al orden $C > A > B$, mientras que para todos los horizontes el potencial de lixiviación (AFT) de los plaguicidas, se incrementó con el aumento de la recarga neta de agua subterránea, siendo máximo a 2.3 mm día^{-1} .

Para la recarga de 0.3 mm d^{-1} , el riesgo asociado a los plaguicidas fluctuó entre muy improbable y moderadamente probable para los herbicidas, muy improbable a probable para los fungicidas y entre muy improbable a improbable para los insecticidas, incrementándose en los horizontes subsuperficiales del perfil. Por su parte, para la recarga de 1.1 mm d^{-1} se determinó que la capacidad de lixiviar de los herbicidas y fungicidas varió entre muy improbable y muy probable, resultando picloram, S-metolacoloro (herbicidas), flutriafol y oxicloruro de cobre (fungicidas) los de mayor probabilidad de lixiviación. En el caso de los insecticidas, el riesgo osciló entre muy improbable y probable (carbofuran). Finalmente, cuando la recarga fue máxima (2.3 mm d^{-1}) el riesgo asociado de la mayoría de los herbicidas fue muy

RF	Clasificación	AF	AFT	Clasificación
1	muy móvil	$\geq 2,5 \times 10^{-1}$ y ≤ 1	≤ 2	muy probable
> 1 y < 2	móvil	$\geq 1 \times 10^{-1}$ y $< 2,5 \times 10^{-1}$	≥ 2 y < 3	probable
≥ 2 y < 3	moderadamente móvil	$\geq 1 \times 10^{-2}$ y $< 1 \times 10^{-1}$	$\geq 3,3$ y $< 7,2$	moderadamente probable
≥ 3 y < 10	moderadamente inmóvil	$\geq 1 \times 10^{-4}$ y $< 1 \times 10^{-2}$	$\geq 7,2$ y $< 13,3$	improbable
≥ 10	muy inmóvil	$< 1 \times 10^{-4}$	$> 13,3$	muy improbable

Tabla 4. Clasificación de los plaguicidas en base al índice RF, AF y AFT.

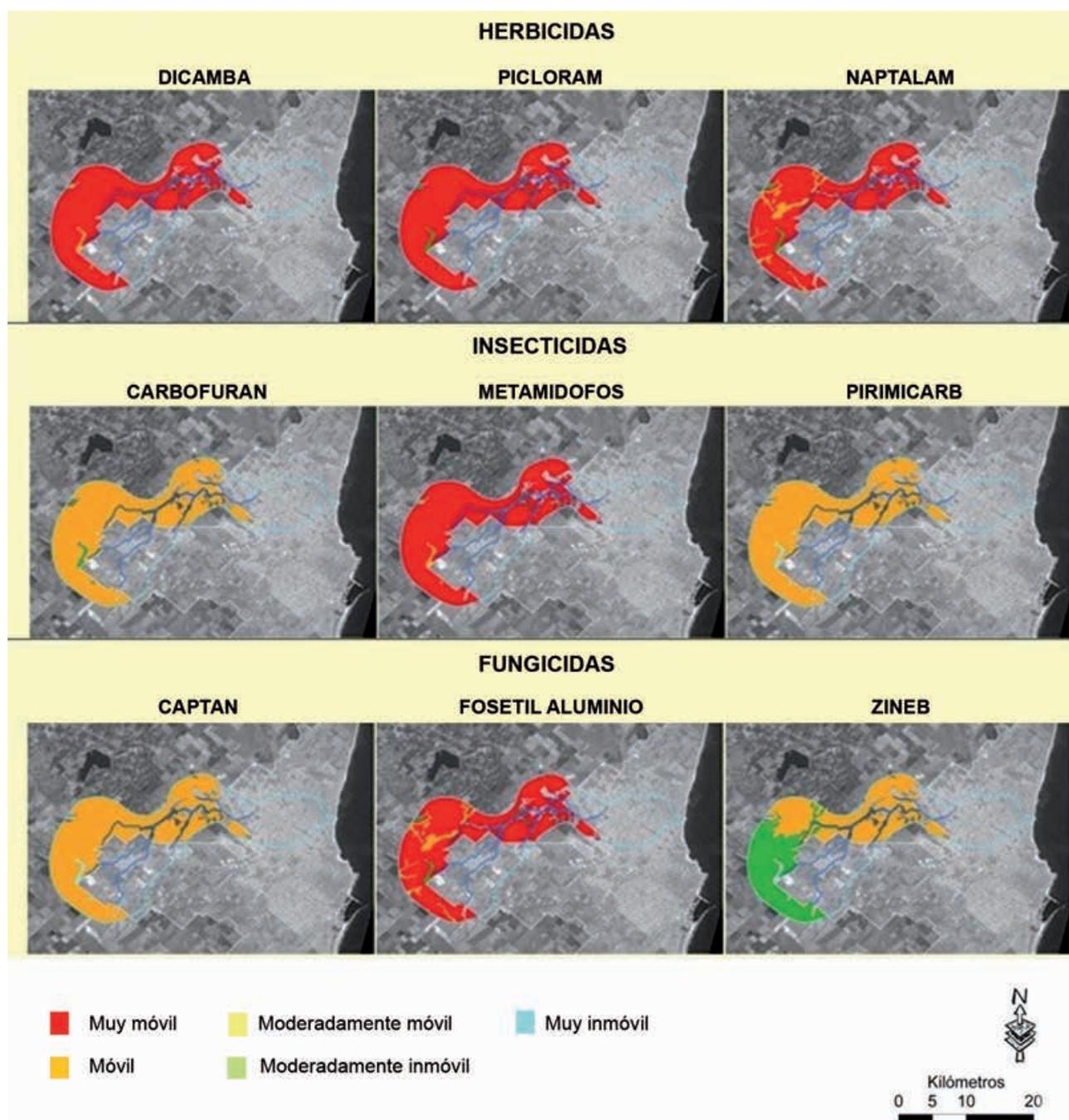


Figura 2. Clasificación de los herbicidas, insecticidas y fungicidas basándose en su movilidad, estimada mediante el índice RF en el horizonte C de la cuenca del arroyo El Cardalito.

probable en el horizonte C (s-metolacloro, metribuzín, flurocloridona, prometrina, linuron, diuron, acetoclor y picloram) (figura 3). En el caso de los insecticidas, pirimicarb categorizó como moderadamente probable, resultando tiametoxam y carbofuran muy probables de lixiviar (figura 4). Entre los fungicidas de mayor potencial de lixiviar se encontraron azoxistrobina, carbendazim (moderadamente

probable), flutriafol y oxicloruro de cobre (figura 5) los cuales categorizaron como muy probable de lixiviar.

Considerando el perfil completo de suelo, se determinó que la lixiviación de todos los plaguicidas estudiados sería improbable a muy improbable para las tres recargas estudiadas, a excepción del herbicida Picloram que fluctuó entre muy improbable (0.3 mm d^{-1}) y moderadamente probable (2.3 mm d^{-1}) (figura 3).

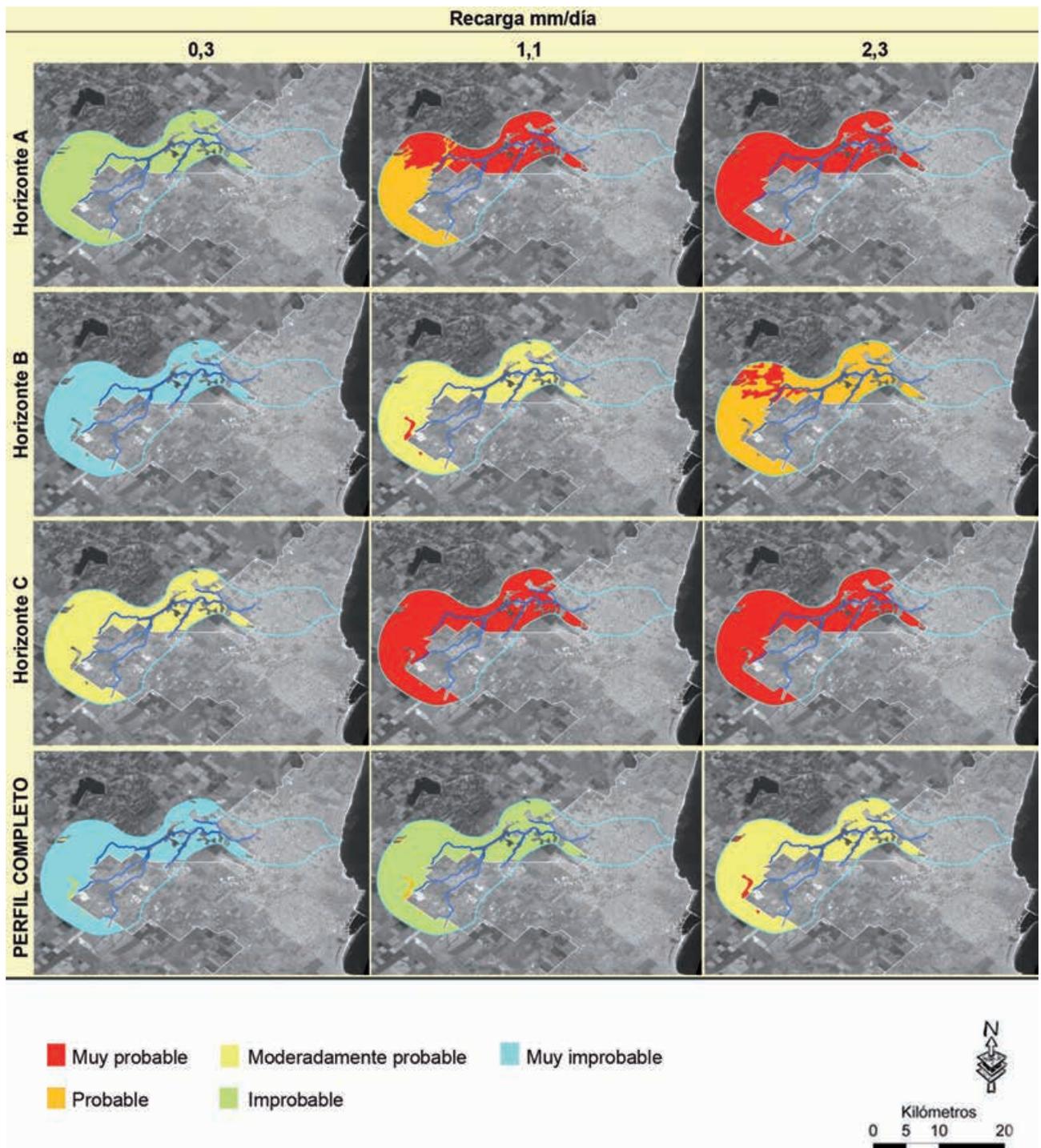


Figura 3. Riesgo potencial de lixiviación hacia el agua subterránea del herbicida picloram en la cuenca del arroyo El Cardalito, determinado mediante el índice AFT para los horizontes A, B, C y el perfil completo de suelo

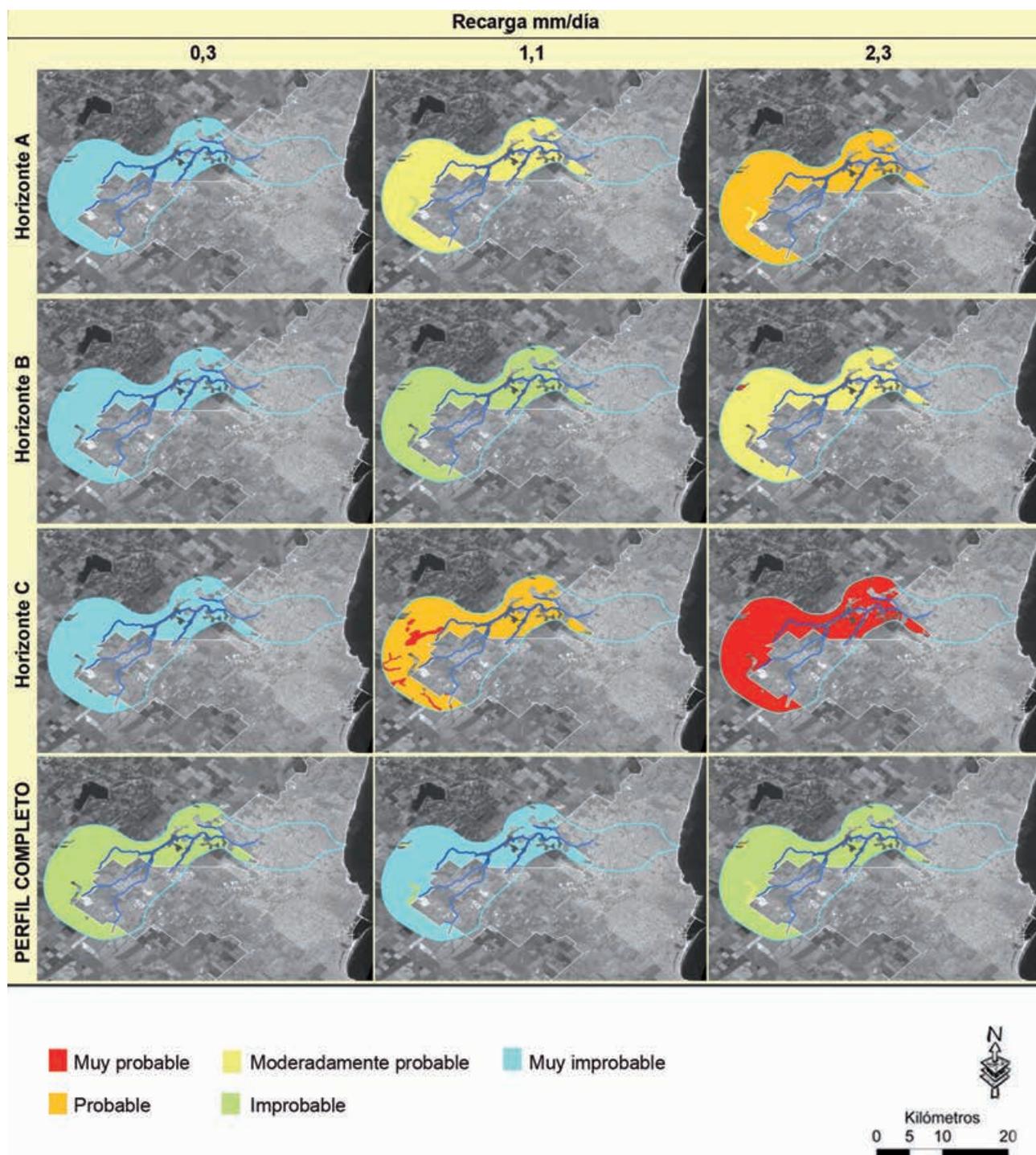


Figura 4. Riesgo potencial de lixiviación hacia el agua subterránea del insecticida carbofuran en la cuenca del arroyo El Cardalito, determinado mediante el índice AFT para los horizontes A, B, C y el perfil completo de suelo.

La variabilidad en el riesgo potencial de lixiviación en el perfil estuvo asociada a las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de los horizontes componentes del perfil del suelo. En tal sentido, tanto el contenido de carbono orgánico como la densidad aparente y actividad microbiana disminuyen con la profundidad en el perfil, por lo que dichas variaciones influyen directa o indirectamente en el movimiento de los plaguicidas en el suelo a través de los procesos de adsorción-desorción y degradación (Bedmar *et al.*, 2013; Bedmar y Gianelli, 2014).

Por tal motivo, los plaguicidas estudiados en este trabajo, presentaron mayor capacidad de lixiviar en el horizonte C, en el cual resultan menos adsorbidos y degradados, incrementándose en consecuencia su movilidad.

Además de la influencia de las propiedades del suelo sobre el riesgo de lixiviación, se debe destacar también la relación de este con los valores de adsorción y persistencia de los plaguicidas. Por tal motivo, picloram, s-metolaclo, carbofuran y oxiclo-ro de cobre que poseen elevada vida media (>90 días) y bajos

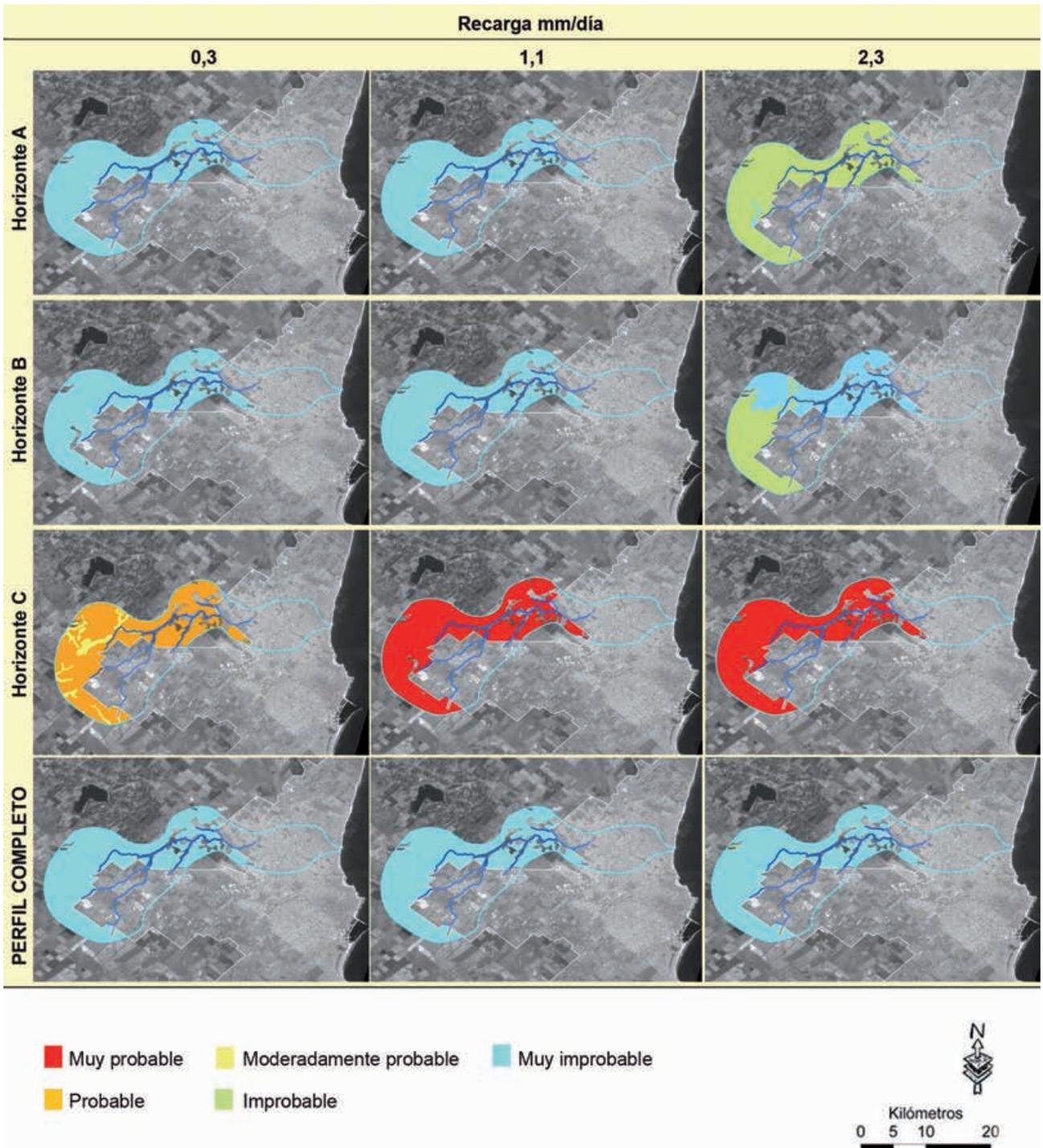


Figura 5. Riesgo potencial de lixiviación hacia el agua subterránea del fungicida oxicloruro de cobre en la cuenca del arroyo El Cardalito, determinado mediante el índice AFT para los horizontes A, B, C y el perfil completo de suelo.

valores de adsorción presentaron mayor riesgo de lixiviación lo cual es coincidente con las tendencias reportadas por diversos autores para otros plaguicidas (Spadotto *et al.*, 2002; Bernard *et al.*, 2005; De Paz *et al.*, 2006; Díaz-Díaz y Loague, 2000; Gianelli *et al.* 2010).

Además de los plaguicidas nombrados anteriormente, los restantes, debido a su mayor adsorción a los coloides del suelo y/o degradación (tabla 3), presentarían un menor

riesgo de lixiviación hacia el agua subterránea en el área en estudio. Por tal motivo, en aquellas zonas donde se desarrollan predominantemente actividades agrícolas, con elevado uso de agroquímicos y de riego, como es la cuenca estudiada, los plaguicidas que poseen bajo coeficiente de adsorción, alta solubilidad en agua y alta persistencia podrían transformarse en importantes fuentes de contaminación del agua subterránea.

Cabe destacar que si bien los mapas de riesgo permiten identificar áreas de la cuenca con mayor peligro de contaminación para cada plaguicida, los suelos que la integran pertenecen predominantemente a la serie Mar del Plata (90.4%). Por tal motivo, no existió gran heterogeneidad en la capacidad de lixiviación entre diferentes zonas de la cuenca, presentando una tendencia prácticamente similar en casi toda la superficie estudiada. No obstante, este trabajo permitió identificar y establecer un ranking de peligrosidad de los principales plaguicidas utilizados, como así también demostrar el efecto de variabilidad en el potencial de lixiviación de los plaguicidas asociado a las propiedades del perfil del suelo y a la variación en la recarga de agua. Dicha información resulta de gran utilidad para ser considerada como una herramienta para comparar los riesgos relativos de diferentes estrategias de manejo de plaguicidas en los sistemas productivos con el fin de minimizar el riesgo de contaminación del agua subterránea. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos índices deberían considerarse solo para realizar estudios iniciales de selección y no como método cuantitativo o predictivo para determinar la lixiviación de los plaguicidas (Loague, 1994). Por tanto, en estos casos deberían realizarse muestreos específicos a campo para verificar el grado de asociación con la realidad. Asimismo, debería tenerse en cuenta que el cálculo de estos índices considerando valores de adsorción y persistencia de los plaguicidas provistos en las bases de datos internacionales, podría generar distorsiones respecto de cálculos basados en el comportamiento de los plaguicidas para las series de suelos locales, tal como fue demostrado para los herbicidas Acetoclor, Atrazina y S-metolacolor para dos suelos Argiudoles típicos del sur-sureste de la provincia de Buenos Aires (Bedmar *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

El riesgo de contaminación potencial del agua subterránea varió en función del plaguicida, la recarga neta de agua subterránea y el horizonte o perfil de suelo considerado.

Todos los plaguicidas presentaron una marcada tendencia a incrementar su movilidad y el riesgo de lixiviación en los horizontes más profundos según el orden $C > B > A > \text{perfil}$.

Según el índice AFT los plaguicidas que presentarían mayor riesgo de lixiviación en la cuenca son picloram, s-metolacolor, carbofuran y oxicloruro de cobre.

En el perfil completo de suelo, se determinó que la lixiviación de todos los plaguicidas estudiados sería improbable a muy improbable para las tres recargas estudiadas, a excepción del herbicida picloram que resultó moderadamente probable para una recarga de 2.3 mm/día.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en el marco del proyecto AGR368/12 de la Universidad Nacional de Mar del Plata (Facultad de Ciencias Agrarias).

BIBLIOGRAFÍA

- AIDATA. Pesticides properties in the Environment. (www.wsi.nrcs.usda.gov/products/W2Q/pest/data/AIDATA.xls, verificado: 11 de noviembre de 2013).
- APARICIO, V.; COSTA, J.L.; ZAMORA, M. 2008. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina. *Agricultural Water Management* 95: 1361-1372.
- BEDMAR, F.; COSTA, J.L.; GIMENEZ, D.; DANIEL, P. 2013. Comparación de dos métodos de obtención de índices para la estimación del riesgo de lixiviación de plaguicidas en dos perfiles de suelo. *Agriscientia* 30 (2): 69-78.
- BEDMAR, F.; GIANELLI, V.R. 2014. Comportamiento de herbicidas en el suelo. En: Fernández, O.A., Leguizamón, E.S., Acciaresi, H. (Eds.) *Malezas e Invasoras de la Argentina*. Tomo I: Ecología y manejo. 1.ª ed. Bahía Blanca, Editorial de la Universidad Nacional del Sur, p. 361-389.
- BERNARD, H.; CHABALIER, P.F.; CHOPART, J.L.; LEGUBE, B.; VAUCLIN, M. 2005. Assessment of herbicide leaching risk in two tropical soils of Reunion Island (France). *Journal Environmental Quality* 34: 534-543.
- CASAFE. 2009. Guía de Productos Fitosanitarios para la República Argentina. Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes. 12.º Ed. p.1600.
- CEREJEIRA, M.J.; VIANA, P.; BATISTA, S.; PEREIRA, T.; SILVA, E.; VALERIO, M. J.; SILVA, A.; FERREIRA, M.; SILVA-FERNANDES, A. M. 2003. Pesticides in Portuguese Surface and Ground Waters. *Water Research* 37(5): 1055-1063.
- CIAFA. Cámara de la industria Argentina de fertilizantes y agroquímicos. (<http://www.manualfitosanitario.com>, verificado: 05 de enero de 2014).
- PARAÍBA, L.; SPADOTTO, C.A. 2002. Soil temperature effecting calculating attenuation and retardation factors. *Chemosphere* 48: 905-912.
- DE PAZ, J.M.; RUBIO, J.L. 2006. Application of a GIS-AF/RF model to assess the risk of herbicide leaching in a citrus-growing area of the Valencia Community, Spain. *Science of the Total Environment* 371: 44-54.
- DIAZ-DIAZ, R.; GARCIA-HERNANDEZ, J.E.; LOAGUE, K. 1998. Leaching potentials of four pesticides used for bananas in the Canary Islands. *Journal Environmental Quality* 27: 562-572.
- DIAZ-DIAZ, R.; LOAGUE, K. 2000. Regional-scale leaching assessments for Tenerife: effect of data uncertainties. *Journal Environmental Quality* 29: 835-47.
- ESRI ArcMap 9.2 – Licencia 37142261_v9 - del set ArcGIS Desktop.
- EU Pesticides Database. (http://ec.europa.eu/sanco_pesticides/public/index.cfm, verificado: 14 de diciembre de 2013).
- EXTENSION TOXICOLOGY NETWORK. (<http://extoxnet.orst.edu>, verificado: 14 de diciembre de 2013).
- GEVAO, B.; JONES, K.C. 2002. Pesticides and Persistent Organic Pollutants. En: Haygarth, P. M.; Jarvis, S. C. (Eds.) *Agriculture, Hydrology and Water Quality*. CAB International, Oxon, United Kingdom, p. 83-106.
- GIAMBELLUCA, T.W.; LOAGUE, K. GREEN, R.E.; NULLET, M.A. 1996. Uncertainty in recharge estimation: impact on groundwater vulnerability assessments for the Pearl Harbor Basin, O'ahu, Hawaii, USA. *Journal Contaminant Hydrology* 23: 85-112.
- GIANELLI, V.; BEDMAR, F.; ANGELINI, H.; APARICIO, V.; COSTA, J.L. 2010. Determinación del riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo Pantanoso, Argentina. En: Fernández Turiel, J.L.; González Hernández, I.

- (Eds.) Contaminación, Descontaminación y Restauración Ambiental. Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental, Salamanca, España, p. 135-152.
- HUTSON, J.L.; WAGENET, R.J. 1992. LEACHM. Leaching Estimation and Chemistry Model: A process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Version 3. Dep. of Agronomy, Cornell University, Ithaca, Nueva York.
- IUPAC. Pesticide Properties Database. (<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/index.htm>, verificado: 06 de noviembre de 2013).
- KHAN, M.A.; LIANG, T. 1989. Mapping pesticide contamination potential. *Environmental Management* 13 (2): 233-242.
- KOOKANA, R.S.; CORRELL, R.I.; MILLER, R.B. 2005. Pesticide impact rating index - A pesticide risk indicator for water quality. *Water Air and Soil Pollution* 5:45-65.
- LARSEN, M.C.; HAMILTON, P.A.; WERKHEISER, W.H. 2013. Water quality status and trends in the United States. En: Ahuja, S. (Ed.) *Monitoring Water Quality*, Elsevier, NC, EE. UU., p. 19-57.
- LOAGUE, K. 1994. Regional scale ground water vulnerability estimates: Impact of reducing data uncertainties for assessments in Hawaii. *Ground Water* 32:605-616.
- NATIONAL PESTICIDE INFORMATION CENTER. OSU Extension Pesticide Properties Database. (<http://npic.orst.edu/ppdmove.htm>, verificado el 18 de diciembre de 2013).
- NATALE, O.E.; ALLEVATO, H.; MARZOCCA, M.C.; SYLVESTER, S. 2002. Evaluación de factores de riesgo debidos a plaguicidas en el medio ambiente rural. INA, Gerencia de programas y proyectos programa nacional de calidad de aguas, Centro de Tecnología del uso del agua. Ezeiza, Argentina, p. 68.
- OLIVEIRA Jr., R.S.; KOSKINEN, W.C.; FERREIRA, F.A. 2001. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils. *Weed Research* 41: 97-110.
- QUIROZ LONDOÑO, O.M.; MARTINEZ, D.E.; MASSONE, H.E. 2012. Evaluación comparativa de métodos de cálculo de recarga en ambientes de llanura. La llanura interserrana bonaerense (Argentina), como caso de estudio. *Dyna* 171: 239-247.
- RAO P.S.C.; HORNSBY, A.G.; JESSUP, R.E. 1985. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. *Proc. Soil Crop. Sci. Soc. Fla.*, 44, pp. 1-8.
- RIAN. 2008. (<http://www.inta.gov.ar/balcarce/riap/zonal.htm>, verificado: 14 de diciembre de 2013).
- SAGUA, M.; TOMÁS, M.; FERRANTE, E.; MASSONE H. 2009. Corredor Mar del Plata Balcarce. Condiciones socioambientales y su relación con los usos de suelo y actividades productivas. Prov. de Buenos Aires. República Argentina. 12.º Encuentro de Geógrafos de América Latina. Montevideo, Uruguay, 3-7 abril 2009.
- SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRÍA, H. E.; ANGELINI, H.P. 2011. Niveles de carbono orgánico y ph en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo* 29(1): 29-37.
- SANDERSON I.D.; LOWE, M. 2002. Ground-Water sensitivity and vulnerability to pesticides, Cache Valley, Cache County, Utah. Miscellaneous publication 02-8. Utah Geological Survey, Salt Lake City UT. (<http://geology.utah.gov/online/mp/mp02-08/mp02-08txt.pdf>, verificado: 07 de noviembre de 2013).
- SPADOTTO, C.A.; GOMES, M.A.F.; HORNSBY, A.G. 2002. Pesticide leaching potential assessment in multilayered soils. *Pesticidas: R. Ecotoxicol. e Meio Ambiente, Curitiba* 12: 1-12.
- TANGORRA, M.; CAPELLO, V.; FORTUNATO, N. 2006. Relevamiento de información sobre productos fitosanitarios. Departamento Uso y Administración de Recursos. Dirección de Ecología y Recursos Naturales. Dirección provincial de preservación de la biodiversidad. Secretaria de Política Ambiental. Gobierno de la provincia de Buenos Aires, Argentina, p. 53.
- THORNTHWAITE, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate *Geographical Review* p. 55-94.
- USDA, 2006. Claves para la taxonomía de suelos. Décima edición. Soil Survey Staff, USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA, p. 331.
- USDA, 2010. Claves para la taxonomía de suelos. Undécima edición. Soil Survey Staff, USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA, p. 365.