

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A METIL AZINFOS EN ACUÍFERO LIBRE CON MODELO AF Y SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

A. C. Dufilho^{1*}, L.A. Latini¹ y M. Loewy²

¹FACIAS, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina. e-mail: ceciliadufilho@gmail.com

²Laboratorio de Cromatografía, IDEPA - Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina.

RESUMEN. Se determinó la vulnerabilidad específica en un área de 330ha bajo riego para producción principalmente frutícola en el valle del Río Neuquén mediante el índice Factor de Atenuación (AF) de Rao et al. (1985) y un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se analizó la vulnerabilidad a metil azinfos debido a que aún se sigue aplicando en la región, pese a su elevada toxicidad.

Se analizó la influencia de los horizontes del perfil del suelo y de las piezometrías utilizadas en los valores de AF.

La estimación espacial de la distribución de la vulnerabilidad específica permite analizar su relación con el uso del suelo y las unidades morfológicas según las características de suelos, piezometría del acuífero y propiedades del plaguicida.

El método AF es de fácil aplicación con SIG. La mayor dificultad y complejidad continúa residiendo en la caracterización espacial de variables que presentan patrones heterogéneos.

ABSTRACT. Specific vulnerability was determined by the Attenuation Factor (AF), (Rao et al., 1985) and the Geographic Information System (GIS) in an area of fruit production (330ha), under irrigation, in the Upper Valley of the Neuquen River. Vulnerability to Azinfos methyl was assessed because, despite its high toxicity, it is still being applied in the studied region.

The influence of horizons and piezometrics used in the AF values, was analyzed.

The spatial estimation of the specific vulnerability distribution allows to study its relationship with soil use patterns and landforms, according to soil characteristics, aquifer piezometrics and pesticides properties.

The AF method along with GIS is easy to apply, although the greater difficulty and complexity is still lying on the spatial characterization of variables with heterogeneous patterns.

1.- Introducción

La utilización de plaguicidas para la producción frutícola es una fuente de contaminación importante en los acuíferos libres someros como el del valle aluvial del Río Neuquén.

En estudios previos se ha indicado la presencia de plaguicidas de distintos tipos en suelos de parcelas hortícolas (Dufilho et al., 2011) y frutícolas (Loewy et al.,

2000) y en el agua del acuífero libre, canales de desagüe y ríos de la región (Gil et al., 2005).

Si bien el abastecimiento de agua para el consumo humano, animal e industrial en la zona se realiza fundamentalmente a partir de los cursos de agua superficiales, el mapeo de áreas vulnerables es el primer paso para la protección de estas reservas de agua subterránea como fuente de agua dulce.

A través de la vulnerabilidad se determina la susceptibilidad intrínseca del acuífero a ser afectado por una carga contaminante. En nuestro caso nos interesa analizar la susceptibilidad a plaguicidas, es decir su vulnerabilidad específica.

Entre los plaguicidas investigados el grupo de los organofosforados es importante por su toxicidad. Dentro de ellos el metil azinfos, cuyo uso está decreciendo significativamente en fruticultura, pertenece al grupo 1b (altamente peligroso) de la clasificación de la Organización Mundial de la Salud.

El área estudiada (Fig.1) se localiza dentro del Distrito de Riego Colonia Centenario que comprende unas 330 has bajo riego en la margen derecha de la planicie aluvial del Río Neuquén, próximo a su confluencia con el Río Limay en la Provincia del Neuquén, Patagonia Argentina.

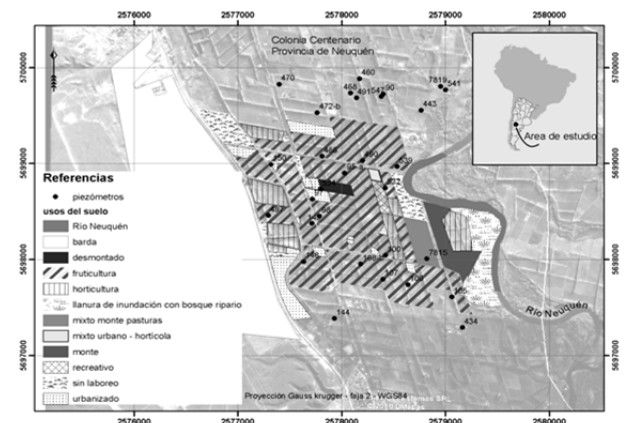


Fig. 1. Ubicación del área de estudio sobre margen derecha del Río Neuquén. Principales usos del suelo. (Sistemas de coordenadas Gauss Krüger, faja 2, datum WGS84)

La región se caracteriza por un clima árido de estepa patagónica con precipitación anual promedio cercana a 200mm. La vegetación es de monte bajo y estepa en las mesetas y de monte frutal y producción agrícola en los

valles fluviales.

2.- Material y métodos

2.1.- Metodología

Existen diferentes métodos para conocer la vulnerabilidad específica de un acuífero a la contaminación, la mayoría basados en cuatro factores principales: las propiedades de los suelos, las propiedades de los plaguicidas, la carga hidráulica y tipo de acuífero y el manejo productivo.

Entre los métodos más sencillos y de amplia divulgación para evaluar la vulnerabilidad se encuentran los métodos de screening que proveen una estimación rápida de la capacidad de contaminación del agua subterránea por contaminantes. US EPA (1993), Foster et al. (2002) y Auge (2004), entre otros, realizan una revisión de métodos existentes.

El Factor de Atenuación (AF) desarrollado por Rao et al. (1985) es un índice que permite estimar la probabilidad de lixiviación potencial de los productos químicos aplicados al suelo; este factor no determina la cantidad específica de plaguicida que llegará a determinada profundidad sino que estima el porcentaje respecto a la carga unitaria, por lo que la carga neta que llega al acuífero se obtendría multiplicando la dosis aplicada por el factor AF estimado. El factor AF toma valores de 0 a 1, siendo directamente proporcional a la vulnerabilidad.

Los factores principales que considera el índice AF se indican en el esquema de la Fig. 2 junto con las variables dependientes de las características del suelo a través del cual se mueve el soluto, como porosidad, densidad aparente, materia orgánica, contenido de humedad; recarga proveniente de la precipitación y riego; profundidad del acuífero y características químicas del plaguicida expresadas por la vida media, coeficiente de adsorción y constante de Henry.

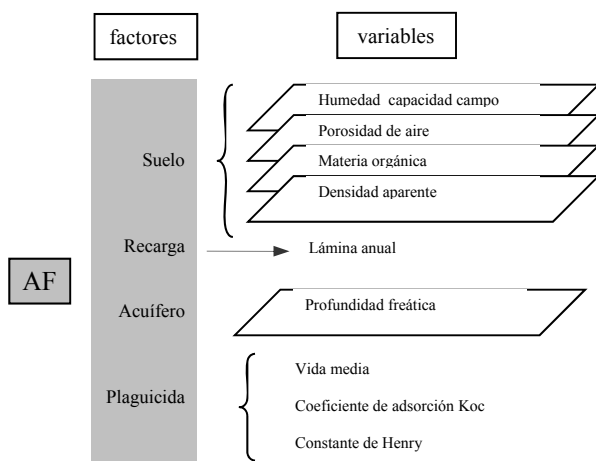


Fig. 2. Factores intervinientes en el cálculo de AF y variables representadas espacialmente (paralelogramo) y con valor único durante la modelación

En esta figura se indica en un paralelogramo las variables

que se representan espacialmente en capas mediante métodos de interpolación.

Si bien la lámina de recarga es heterogénea en su distribución temporal y también espacial -dado que existe variabilidad espacial en el uso de las tierras y su manejo productivo-, se ha considerado uniforme dado que solo se dispone del balance global del área.

El índice AF se calcula mediante la ecuación (1) que contempla procesos de adsorción a través del Factor de Retardo (RF) de la ecuación (2).

$$AF = \exp\left(\frac{-0,693 h_{fr} RF \varphi_{cc}}{q DT50}\right) \quad (1)$$

donde: AF = factor de atenuación (adimensional); h_{fr} = profundidad a la capa freática (m); RF = factor de retardo (adimensional); φ_{cc} = humedad del suelo a capacidad de campo (l agua/l suelo); q = recarga neta anual del acuífero (m/año); $DT50$ = vida media del plaguicida en el suelo (años).

El Factor de Retardo (RF) expresa la relación existente entre el movimiento del agua y el movimiento del plaguicida en la zona no saturada. RF es entonces función de la densidad aparente, de la cantidad de materia orgánica, de la capacidad de campo y de las características del plaguicida. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RF = 1 + \left(\frac{ds \text{ foc } Koc}{\varphi_{cc}}\right) + \left(\frac{na H}{\varphi_{cc}}\right) \quad (2)$$

donde: RF = factor de retardo (adimensional); ds = densidad aparente del suelo seco (kg suelo/m³ suelo); foc = fracción de carbono orgánico del suelo (kg C/kg sólidos); Koc = coeficiente de adsorción del plaguicida al carbono orgánico del suelo (m³ agua en el poro/kg carbono orgánico); φ_{cc} = humedad del suelo a capacidad de campo (l agua/l suelo); na = porosidad aérea del suelo (l aire/l suelo); H = constante de Henry del plaguicida (adimensional).

El factor de atenuación AF puede tomar valores entre 0 y 1; cero (0) indica que el contaminante no percola y uno (1) indicaría percolación total.

Para realizar el cálculo del índice AF en dos dimensiones o tres, es necesario regionalizar las variables, obteniendo una expresión continua en el espacio a partir de información puntual. Son numerosos los métodos existentes, siendo el kriging ordinario el más empleado para variables del subsuelo dada su capacidad de considerar la localización de las observaciones y su correlación espacial. En la Fig.2 se ha representado en un paralelogramo las variables que han sido tratadas en 2D.

La variabilidad en profundidad (en el perfil del suelo) se puede considerar realizando capas de propiedades de los suelos para cada horizonte ponderadas por el espesor de cada uno de ellos. De esta manera el suelo se considera en

su variación vertical y horizontal, en una representación cuasi 3D.

Para estimar AF con SIG se discretiza el espacio en celdas y se aplican las ecuaciones 1 y 2 en cada pixel.

A efectos de verificar el comportamiento del modelo AF-SIG se comparan las estimaciones de vulnerabilidad a metil azinfos con datos de concentraciones de soluto en muestras de agua del acuífero libre.

2.2.- Descripción del área de estudio

Dentro del valle aluvial del Río Neuquén, se seleccionó una sección de riego comprendida entre dos desagües para drenaje ubicadas aguas arriba (al norte) y abajo (al sur) del área. La condición de borde del acuífero aluvial hacia el oeste lo constituye la terraza antigua –localmente denominada “barda”- de materiales cretácicos del grupo Neuquén y hacia el este la planicie de inundación extraordinaria del Río Neuquén (Fig.1). Esta superficie comprende unas 330 ha, históricamente de producción frutícola (peras y manzanas) pero que en los últimos años ha incorporado el uso urbano de baja densidad, hortícola y otros en menor proporción.

1.- Los suelos existentes en el valle pertenecen al Orden Aridisoles de la clasificación del Soil Taxonomy. Las propiedades hídricas se obtuvieron mediante funciones de pedotransferencia de Saxton et al. (1986) a partir del contenido de arcilla, arena, limo y materia orgánica en los horizontes del suelo relevados en perfiles de calicatas tipo. Estos perfiles representan los suelos dominantes en la toposecuencia fluvial del valle del Río Neuquén, por lo que se los considera característicos de la unidad morfológica en la que están insertos (Fig. 3). El mapeo de unidades morfológicas es dificultoso debido a la modificación producida en el relieve para la sistematización del riego y la producción.

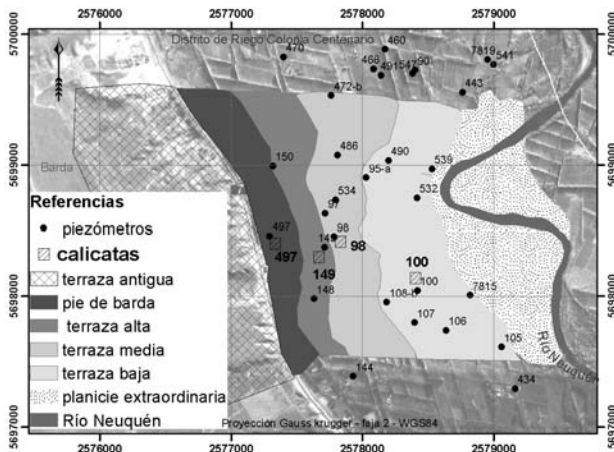


Fig. 3. Unidades morfológicas principales con localización de calicatas

Las Tablas 1 a 4 contienen valores de los parámetros utilizados para el cálculo de AF obtenidas de muestras de los perfiles ubicados en mapa de Fig.3. En las tablas *ntot* es porosidad total, el resto de parámetros ya han sido definidos.

Tabla 1. Propiedades del horizonte A

calicata	espesor (m)	ϕ_{cc} (%)	ds (kg/m3)	foc (%)	na (%)	ntot (%)
497	0,15	34,0	1,30	2,03	16,9	50,9
149	0,15	27,8	1,38	1,79	20,1	47,9
98	0,20	25,6	1,42	2,16	20,9	46,5
100	0,15	28,2	1,38	2,52	19,8	48,0

Tabla 2. Propiedades del horizonte Bw. Nota: En el perfil 98 y 149 el horizonte Bw es reemplazado por horizonte C1 continuando en profundidad C2 y C3

calicata	espesor (m)	ϕ_{cc} (%)	Ds (kg/m3)	foc (%)	na (%)	ntot (%)
497	0,17	31,0	1,33	0,39	18,7	49,7
149	0,20	27,8	1,38	0,95	20,1	47,9
98	0,20	23,2	1,46	0,46	21,8	45,0
100	0,22	29,3	1,36	0,77	19,2	48,5

Tabla 3. Propiedades del horizonte C1

calicata	espesor (m)	ϕ_{cc} (%)	Ds (kg/m3)	foc (%)	na (%)	ntot (%)
497	0,38	27,5	1,42	0,28	18,7	46,2
149	0,55	29,0	1,41	0,42	18,0	47,0
98	0,30	22,7	1,48	0,31	21,6	44,3
100	0,23	32,4	1,32	0,98	18,0	50,4

Tabla 4. Propiedades del horizonte C2

calicata	espesor (m)	ϕ_{cc} (%)	ds (kg/m3)	Foc (%)	na (%)	ntot (%)
497	0,50	29,6	1,37	0,41	18,7	48,3
149	0,30	23,9	1,57	0,25	16,9	40,8
98	0,50	25,3	1,45	0,40	20,1	45,4
100	0,60	34,1	1,29	0,95	17,4	51,5

Como se indicó, en el cálculo de AF con SIG se consideró la heterogeneidad en el perfil y la influencia de cada horizonte mediante ponderación de las propiedades hídricas y densidad aparente por el espesor de cada uno de ellos.

2.- La caracterización de la profundidad del acuífero libre se realizó con datos de lecturas piezométricas de 29 piezómetros de la red de monitoreo instalados en la zona (ver Fig.1). La superficie freática es variable entre 1m y 2,5m de acuerdo a la proximidad al sistema de drenaje y la influencia del río, fluctuando además a lo largo del año según la recarga de riego. De la serie mensual de mediciones del período 2003-2007, se considera de interés analizar la profundidad media y mínima –más cercano a la superficie- pues representan la condición media y la de mayor riesgo respectivamente. No se han considerado series de datos piezométricos más extensas, ya que los niveles permanecen en equilibrio interanual con el sistema de drenaje diseñado para mantener la profundidad freática

en valores compatibles con la producción frutícola.

Estas observaciones fueron interpoladas con kriging ordinario para obtener las isobatas promedio anuales y mínimas anuales -registradas en los meses de noviembre y diciembre-. En la Fig 4, se han representado las profundidades mínimas del período 2003-2007.

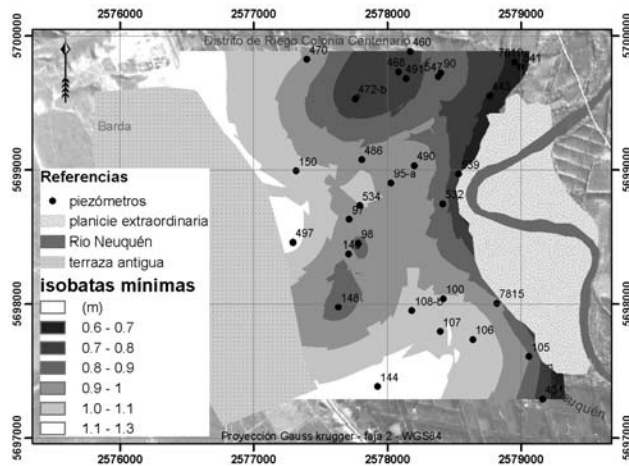


Fig. 4. Isobatas mínimas mensuales registradas en el período 2003 – 2007

3.- La recarga anual al acuífero se produce por exceso de aplicación de agua de riego superficial en melgas. La precipitación es menor a 200mm anuales y la evapotranspiración potencial estimada por Penman-Monteith es de 950mm anuales. La eficiencia global del sistema de riego en el Alto Valle se estima en un 50-60% (Peri, 2006) siendo las pérdidas de aplicación en parcela estimadas cercanas a 30-40% (330mm a 440mm aprox.). El balance hidrológico estimado por modelación (Dufilho et al., 2011) estima una recarga de 500 mm anuales en el área del piezómetro 100. Con esta información se considera que una recarga anual de 400mm es un valor promedio conservativo que puede utilizarse para el distrito de riego Colonia Centenario. En el cálculo de AF, se ha considerado una recarga única y homogénea aunque no es representativa de lo que sucede en algunos sectores, v.g. áreas desmontadas o sin riego.

4.- Las características de metil azinfos fueron extraídas de Pesticide Properties DataBase (PPDB) (2012): Coeficiente de adsorción (K_{oc}) = 1000 l/kg, Vida media (DT50) = 10días y Constante de Henry (H) = 0,0000057.

2.3.- Procedimiento de cálculo de AF con SIG

A efecto de facilitar la comprensión del cálculo, se resumen los pasos secuencialmente seguidos para la obtención de la vulnerabilidad específica.

1.- Se generaron mapas (formato shape de ArcGis) de unidades homogéneas de suelos según la toposecuencia y unidades morfológicas del valle aluvial a los que se les asignaron los perfiles dominantes de suelos.

2.- Con función de pedotransferencia de Saxton et al. (1986) se obtuvo a partir de datos de texturas (porcentaje

de arena y arcilla) y materia orgánica, una estimación de los parámetros necesarios para resolver ecuación 1 y 2.

3.- Se convirtieron los shapes a raster con tamaño de celda 5x5m. Se generó un archivo raster para cada propiedad hídrica del suelo: humedad a capacidad de campo, densidad aparente, contenido de carbono orgánico y porosidad de aire.

4.- Se generó un raster espesor (m) por cada uno de los 4 horizontes de suelo.

5.- Se calculó raster RF con ecuación 2 aplicada a cada horizonte de suelo. Luego se obtuvo raster RF promedio ponderado por el espesor de suelo.

6.- Se calculó raster AF (ecuación 1) con raster RF ponderado, raster humedad a capacidad de campo promedio y raster de isobatas promedio. Se repitió el paso para raster de isobatas mínimas.

7.- Con Spatial Analyst de ArcGis 9.3 se analizaron los mapas resultantes.

Estas operaciones de cálculo y análisis se realizaron con Model Builder de ArcGis 9.3.

2.4.- Verificación del modelo AF-SIG

La información utilizada para verificación, corresponden a muestras de agua extraídas de 4 piezómetros durante el período 2008 a 2010 del que se ha tomado la temporada 2009-2010 (Tabla 6) debido a las mayores concentraciones de soluto registradas.

El análisis de organofosforados en agua fue realizado por el método de extracción en fase sólida (SPE), la cuantificación por Cromatografía gaseosa y detector de Nitrógeno-Fosforo (GC-NPD) y la confirmación con Cromatografía gaseosa asociado a detector de masa (GC-MS).

Las mayores concentraciones ocurrieron en los meses de noviembre y diciembre, coincidente con la época de riego y aplicación de metil azinfos.

3.- Resultados y discusión

La estimación de AF aplicando las ecuaciones 1 y 2 dan valores continuos entre 0 y 1, pero a efecto de facilitar la interpretación en los mapas los resultados se presentan clasificados en 10 clases de AF.

En condiciones de superficie freática promedio durante el período estudiado, la distribución de áreas vulnerables se observa en el mapa de la Fig. 5 con valores comprendidos en el rango 0,2 a 0,5 y en la Fig.7 se indica la superficie (en hectáreas) según vulnerabilidad AF. Las 330 has presentan una vulnerabilidad media a baja a metil azinfos, no existiendo áreas sin vulnerabilidad ni tampoco extremadamente sensibles.

Sin embargo realizando la estimación de vulnerabilidad a partir de los valores mínimos de profundidad freática, que como se indicó coincide con la época de riego y aplicación de plaguicidas, se obtienen valores mayores de AF (0,4 a 0,7 en escala AF: 0 a 1) (Fig. 6), indicando un aumento generalizado de la vulnerabilidad específica.

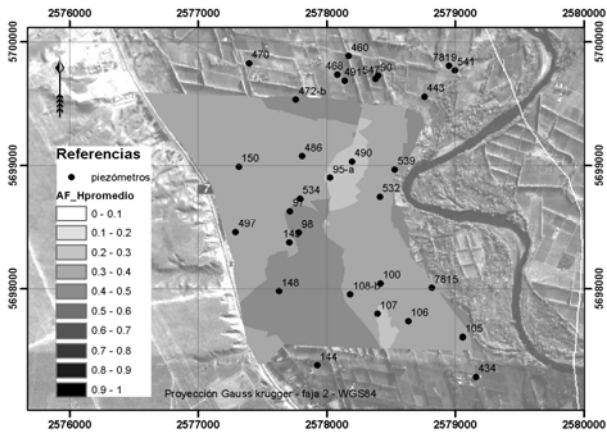


Fig. 5. Estimación de AF utilizando profundidad de la superficie freática promedio del período

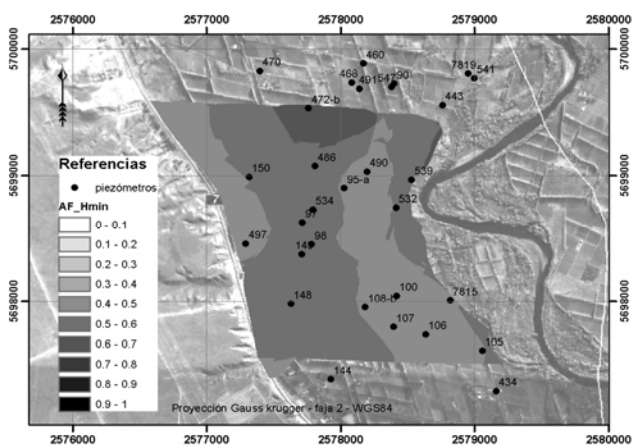


Fig. 6. Estimación de AF utilizando profundidad de la superficie freática mínima del período

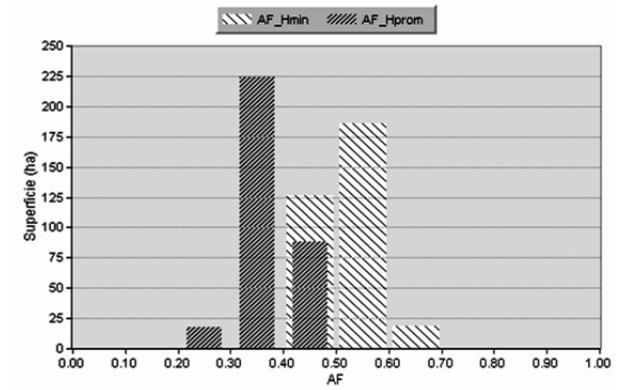


Fig.7. Superficies afectadas por clases AF estimadas para valores de profundidad freática promedio (AF-Hprom) y profundidad freática mínima (AF-Hmin)

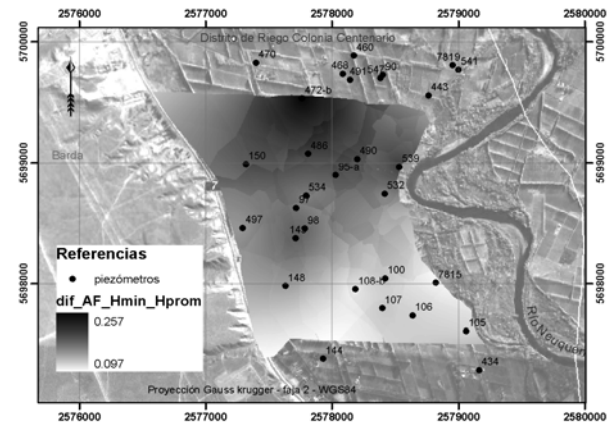


Fig.8. Diferencias en la estimación de AF en situación de profundidad freática promedio (AF-Hprom) y profundidad freática mínima (AF-Hmin). A mayor valor, mayor vulnerabilidad relativa calculada con AF_Hmin

En la Fig. 7 se puede observar este aumento relativo del AF respecto al cálculo considerando superficie freática promedio.

En la Fig. 8 se ha representado las diferencias calculadas entre AF profundidades freáticas mínimas y AF profundidades freática promedio. El rango de diferencias del valor AF está comprendido entre 0,1 y 0,26, siendo el promedio de diferencias 0,16; mayores valores con profundidades mínimas. La zona de menores diferencias está en el sur y las de mayores al norte localizadas en el área del piezómetro 472b, debido a la gran variación entre profundidad freática mínima (0,7m) respecto a la promedio (1,5m).

Esta condición de profundidad de superficie freática mínima y propiedades de suelos ponderados por el espesor de cada horizonte, representa la situación más próxima a la condición real. Pero muchas veces, a falta de información del perfil se utilizan las propiedades del horizonte superficial A considerando de esta manera el perfil homogéneo. Basado el cálculo de AF en las características del horizonte A, se obtiene para la condición de profundidad mínima de superficie freática una sobrestimación de la atenuación. La diferencia entre AF calculado en base al horizonte A y AF estimado con ponderación de horizontes resulta en valores negativos que varían entre 0,18 y 0,10, debido a que los valores de AF con horizonte A (mayor atenuación) son menores (Fig. 9).

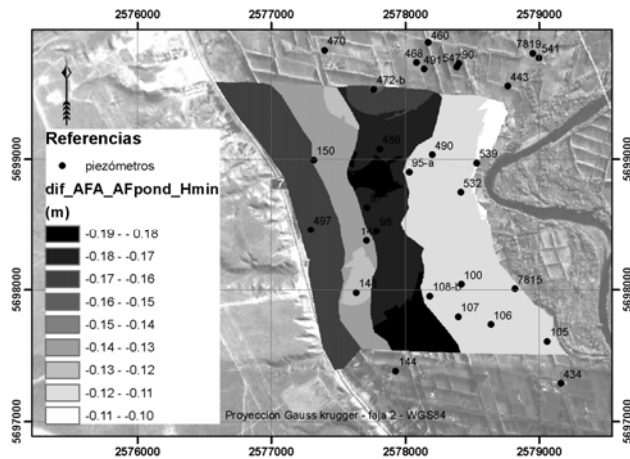


Fig. 9. Sobrestimación del valor AF calculado con propiedades horizonte A en relación a AF calculado con cada horizonte. Condición de Isobatas mínimas

En el área central, la mayor diferencia (color oscuro) podría deberse a que en estos suelos por debajo del horizonte A existen horizontes C1 y C2 de textura franco arenoso y luego C3 franco. Hay un claro contraste entre el horizonte A con buena capacidad de atenuación de plaguicida (3.71 % de materia orgánica y 20 % de arcilla) respecto a los horizontes subyacentes. En el caso del área cercana al río con menores diferencias (colores claros) se debería únicamente a la disminución de la materia orgánica con la profundidad debido a que la textura es franca a franca limosa en un perfil más homogéneo.

La representación en mapas permite obtener la distribución espacial de estas áreas vulnerables y su relación con otras variables significativas en el ordenamiento territorial. De esta manera se estimaron las estadísticas zonales en el área de estudio, obteniendo las condiciones de vulnerabilidad en cada unidad morfológica presente y también en suelos con distintos usos.

En relación a los usos (Fig. 10) las áreas con mayor valor de vulnerabilidad son el dedicado a la fruticultura y a urbanización.

La dispersión de valores AF está reflejando la presencia de fruticultura en diversos ambientes mientras que recreativo con menor rango de valores está restringido a sector de terraza media.

Pero en líneas generales no se observan diferencias notables entre los distintos usos. Esta relación usos-AF podría mejorarse incorporando la distribución de aplicación de plaguicida y de la recarga en cada tipo de uso. Siendo los usos del suelo un aspecto dinámico determinante de la vulnerabilidad específica, es una variable que hay que actualizar de manera periódica.

En relación a las unidades morfológicas, analizadas en condición de suelo heterogéneo y profundidad freática mínima, el área más vulnerable es la terraza media y la menos vulnerable el pie de barda (Fig.11).

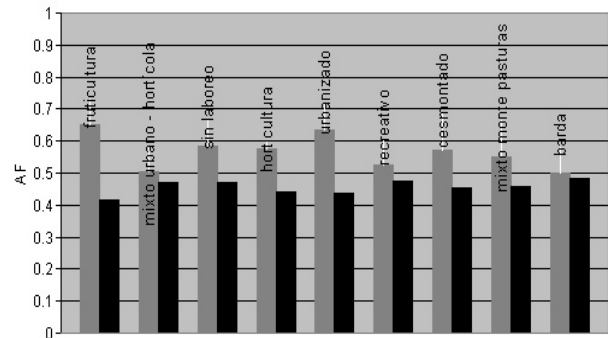


Fig. 10. Distribución de valores máximos y mínimos de AF según el uso de la tierra. Condiciones de profundidad freática mínima

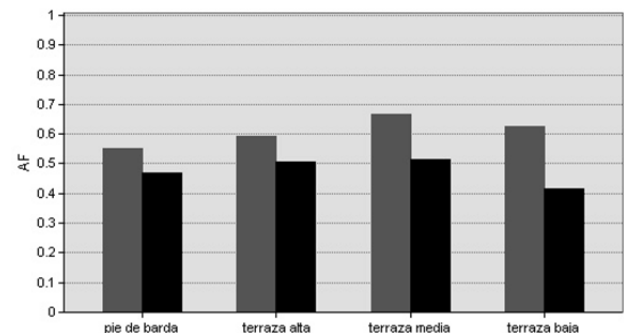


Fig. 11. Distribución de máximos y mínimos valores de AF en las distintas unidades morfológicas. Condiciones de profundidad freática mínima

En la terraza baja la mayor dispersión de resultados probablemente se explica por la influencia directa de los niveles del río en los niveles piezométricos de algunos sectores próximos al Río Neuquén.

De la comparación entre valores AF de vulnerabilidad calculados y de concentraciones de metil azinfos observadas en distintas épocas del año (Tabla 6) se pueden extraer algunas conclusiones en relación a las estimaciones del modelo AF-SIG.

Tabla 6. Concentración metil azinfos (ug/L) en piezómetro y AF previsto

Piez.	Sept/09	Oct/09	Nov/09	Dic/09	Feb/10	Abr/10	AF*	AF**
497	-	-	-	-	0,09	-	0,47	0,32
149	-	ND	2,54	0,68	0,08	0,08	0,56	0,39
98	ND	ND	11,06	6,64	0,12	0,08	0,59	0,42
100	ND	ND	1,16	22,49	3,20	0,66	0,45	0,32

AF* estimado para profundidad mínima en el piezómetro
 AF** estimado para profundidad promedio en el piezómetro
 ND: no detectado.

El piezómetro 497 presenta valores de metil azinfos bajos en el mes de febrero en concordancia con lo esperado según la vulnerabilidad específica baja del sector. En noviembre, los 3 piezómetros medidos tuvieron un comportamiento de acuerdo a lo esperado, es decir

altos valores de metil azinfos para los mayores valores AF y viceversa.

Dado que no se prevén más aplicaciones de metilazinfos a partir de noviembre, los valores de concentración deberían ir disminuyendo a lo largo del período estudiado. Esta presunción se cumple para los piezómetros 98 y 149 concordando los resultados con los valores de AF calculados respectivamente

Con respecto al piezómetro 100 se observa que el máximo de concentración medida corresponde al mes de diciembre siendo un valor significativamente más alto que los observados en los piezómetros anteriores. Si bien las concentraciones disminuyen en los meses siguientes siempre los valores son mayores que los esperados de acuerdo al AF calculado. Se considera que esta situación obedece a una suma de causas, desde flujo subterráneo que arrastra solutos desde áreas de percolación situadas aguas arriba, flujo preferencial en la zona no saturada y también cuestiones de manejo del calendario de riego en relación con las aplicaciones de metilazinfos. Este último aspecto es crítico debido a que el sistema de riego es por inundación lo cual implica que la cercanía entre la aplicación y el riego favorezca el movimiento a través de macroporos (flujo preferencial). No debería descartarse que las diferencias de concentración encontradas en los distintos piezómetros puedan deberse a diferencias en la carga de plaguicidas aplicada en cada zona.

El modelo AF explica satisfactoriamente la ocurrencia de metil azinfos en algunas áreas mientras que otras deben ser revisadas. Una serie de datos más extensa de mediciones del plaguicida sería necesaria para realizar ajustes en el modelo AF-SIG y la representación de la heterogeneidad de las variables involucradas.

4.- Conclusiones

La zona estudiada presenta una vulnerabilidad media a alta a la contaminación con metil azinfos. La vulnerabilidad específica del acuífero libre varía según como se considere la profundidad de la superficie freática, siendo mayor cuando las isobatas son menos profundas, situación que se produce en época de riego que además coincide con la aplicación de plaguicidas. En la región del valle la vulnerabilidad específica a metil azinfos debería estudiarse en estas condiciones ya que es más representativa de la situación real, evitando hacerlo con profundidades mensuales promedio.

Si bien los métodos empíricos como AF no permiten considerar la variación temporal de la superficie freática, se puede seleccionar la estación del año para considerar la situación más representativa del problema estudiado. Igual consideración podría hacerse respecto a la distribución anual de la recarga y de la aplicación del plaguicida.

Tener en cuenta las propiedades del suelo ponderadas por el espesor de los horizontes en el perfil mejora el cálculo de AF, ya que reflejan más apropiadamente las heterogeneidades en profundidad que considerando sólo las propiedades del horizonte A.

La estimación de la carga de plaguicidas que efectivamente llegarían al acuífero libre debe calcularse de acuerdo a las dosis aplicadas en cada parcela y el correspondiente índice de atenuación AF del sector.

La aplicación del modelo AF con SIG permite considerar la variabilidad espacial de los factores que determinan la vulnerabilidad específica, tanto lateralmente como en el perfil. Esto puede realizarse a escala del perfil, de la parcela o de cuenca sin limitación metodológica.

De la comparación entre valores AF y datos medidos de concentraciones, no surge una conclusión única. Se considera que el flujo preferencial del soluto es un proceso importante que no es tenido en cuenta por el modelo AF. Asimismo los resultados AF obtenidos pueden ser ajustados con nuevos datos de suelos e introduciendo la variabilidad espacial de la recarga anual en función de los usos del suelo.

Sin embargo, gracias a la sencillez conceptual del método AF-SIG, permite elaborar un mapa diagnóstico preliminar del estado de vulnerabilidad específica del acuífero como una herramienta útil en la planificación y manejo futuro del distrito de riego para la preservación de la calidad del agua subterránea. En las áreas identificadas como problemáticas, deberán aplicarse métodos menos simplificados -como modelos de transporte de flujo no saturado y conductividad dual- para explicar el funcionamiento de los plaguicidas en el suelo.

5.- Bibliografía

- Auge, M., 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, n 4, 85-103.
- Dufilho A.C., S. Vázquez y M. Loewy, 2011. Migración de metil azinfos en el perfil del suelo e impactos en acuífero libre aluvial somero. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología*. Salta, Argentina. 9.
- Dufilho C., C. Ruiz y A. Bruce, 2012. Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación con plaguicidas en cultivos hortícolas en el valle del Río Neuquén, Patagonia Argentina. *XI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología*. Cartagena de Indias – Colombia. pp.5.
- Foster S., R. Hirata, D. Gomes, M. D'Elia y M. Paris, 2002. *Groundwater Quality Protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. The World Bank Washington, D.C. 114.
- Gil M.I, G. Aschkar, M. Pozzo Ardizzi, G. Pellejero y M. Abrameto, 2005. Evaluación de residuos de plaguicidas en aguas del Río Negro en sitios estratégicos para la captación de agua potable. *Revista Pilquen*, Año VII, 7, 9.
- Loewy R.M, M. Novelli, L. Carvajal, H. Labollita, G. Neme, J. Ramos, C. Saenz y A. Pechen de D'Angelo, 2000. Percolación de plaguicidas en áreas de producción frutícola en el valle del Río Neuquén (Argentina). *XI Congreso Brasileiro de Águas Subterráneas*, Sao Pablo. 9.
- Saxton K. E., W.J. Rawls, J.S. Romberger y R. I. Papendick, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50(4),1031-1036.
- Peri G., 2004. *La agricultura irrigada en Río Negro y su contribución al desarrollo regional*. Banco Mundial, 115.
- Pesticide Properties DataBase (PPDB) <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/projects/ppdb/index.htm>. [consulta: agosto 2012].
- Rao, P., G. Hornsby. y R. Jessup, 1985. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of Groundwater. *Soil Crop Sci. Soc. Florida*. 44, 1-8.
- US EPA, 1993. A Review of Methods for Assessing Aquifer Sensitivity and Ground Water Vulnerability to Pesticide Contamination.