

LIXIVIACIÓN DE NITRATOS BAJO CULTIVO DE REMOLACHA EN LA ZONA VULNERABLE DEL ACUÍFERO CUATERNARIO DE VITORIA-GASTEIZ (PAÍS VASCO)

M. Martínez¹, C. García-Linares¹, J.M. Sánchez-Pérez², A. Aizpurua³, I. Ruiz de Loizaga⁴, e I. Antigüedad¹

¹ Grupo de Hidrogeología, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, 48940 Leioa (Bizkaia), gopanai@lg.ehu.es

² Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes (LEH, FRE CNRS-UPS 2630), Université Paul Sabatier, 31055 Toulouse (Francia), sanchez@ecolog.cnrs.fr

³ Neiker-Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario, 48060 Derio (Bizkaia), aizpurua@neiker.net.

⁴ Aira-Asociación Independiente de Remolacheros Alaveses, Vitoria-Gasteiz (Álava), airaremol@ole.com

RESUMEN. Se ha estudiado la lixiviación de nitratos en una parcela experimental de remolacha azucarera en la Zona Vulnerable de un acuífero cuaternario. La parcela se equipó con 48 Tensionic y se aplicaron seis tratamientos diferentes. A partir del estudio del suelo antes y después del cultivo, del seguimiento de las aguas del suelo, y del balance hídrico se ha evidenciado una notable pérdida generalizada de elementos en el suelo y en el agua del suelo, sobre todo de nitratos, debido, en buena medida, a infiltración por exceso de riego. Se pone de manifiesto la importancia de situar el estudio en el contexto climático, fundamentalmente de las lluvias de invierno. Entre los tratamientos aplicados es el habitual del agricultor donde hay mayor presencia de nitratos.

ABSTRACT. The leaching of nitrates has been studied in an experimental plot of sugar beet in the Vulnerable Zone of the quaternary aquifer of Vitoria-Gasteiz. The plot was equipped by 48 Tensionic and six different treatments were applied. An important generalized loss of elements in soil and water, nitrates above all, has been evidenced from soil study, before and after the crop, from soil water monitoring, and from soil water balance. This loss is mainly due to infiltration by excess of irrigation. The importance of situating the study in the climatic context, basically of the winter rains, is taken into account. Between the applied treatments it is the habitual of the farmer where the nitrates concentration is highest..

1. Introducción

El objetivo principal de esta investigación se estableció en el seguimiento de la lixiviación de diferentes compuestos, nitratos sobre todo, procedentes de distintos tipos de fertilizantes, y dosis de aplicación, utilizados en la actividad agrícola de la Zona Vulnerable, según la Directiva 91/676/CEE, del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz. El interés se refería tanto a la productividad del cultivo, aspecto no tratado aquí, como al impacto al medio natural, sobre todo a las aguas subterráneas, habida cuenta

de la declaración de Zona Vulnerable de buena parte del acuífero cuaternario. El estudio experimental se ha llevado a cabo en dos parcelas situadas en la localidad de Matauko, dentro de la Zona Vulnerable, muy próxima a Vitoria-Gasteiz. Para ello se han controlado los lixiviados producidos mediante la instalación de dispositivos tipo Tensionic que permiten a la vez medir el potencial hídrico del suelo y tomar muestra de agua del suelo, a la profundidad considerada.

2. Material y métodos

2.1. Diseño de las parcelas experimentales

La primera parcela (2800 m²), la más importante, es donde se ha centrado fundamentalmente la investigación. Esta parcela (figura 1) se dividió en 8 bandas rectangulares (3.5 x 100 m) y se aplicaron cuatro tipos diferentes de abono (*Urea*, *Fisiostart*, *Habitual según AIMCRA* y *Umostart*) por duplicado. A su vez, en dos de las bandas se dejaron dos zonas (3.5 x 40 m) sin abonar (*Testigo*). En cada una de las bandas y zonas testigo se instalaron, entre la siembra y el abonado de fondo, 4 dispositivos Tensionic, dos a profundidad de 50 cm y dos de 100 cm, colocados en zonas de surco y contrasurco. La situación de todos estos Tensionic se refleja en la figura 1.

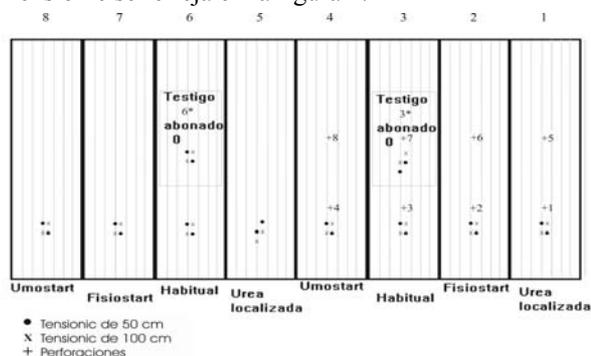


Fig 1. Esquema de las bandas y situación de los Tensionic y las perforaciones de la parcela principal.

La segunda parcela, con una extensión mayor y situada al

lado de la anterior, fue abonada en su totalidad por el agricultor como lo venía haciendo en los últimos tiempos (*habitual según Agricultor*). En esta parcela, de tratamiento único, se han instalado 8 Tensionic, cuatro a profundidad 50 cm y cuatro a 100 cm.

En las parcelas el terreno es plano, con pendiente clase 1 (0-2 %), con un nivel piezométrico que oscila entre 0.5 y 2.5 m de profundidad.

2.2. Metodología del abonado

Abonado de fondo (15-16 y 22 de marzo 2002):

La primera y quinta bandas recibieron un abonado de *Urea* localizada (36.6 kg/ha, 17 unidades/ha N) complementada con un abono manual de fósforo con superfosfato cálcico (417 kg/ha, 75 P) al 18 %.

En la segunda y séptima bandas se aplicó *Fisiostart* (32 kg/ha, 3 N amoniacal, 10 P, 7 S, 1 Zn). Previamente esa banda se abonó con 8-24-8 (250 kg/ha, 20 N, 60 P, 20 K), ya que los fabricantes del *Fisiostart* consideran que este abono cubre el 20 % de las necesidades, siendo necesario un abonado de fondo para completar los requisitos del cultivo.

La tercera y sexta bandas son las de *Habitual* (313 kg/ha de 8-24-8, 25 N, 75 P, 25 K). En ellas se abona como si lo hiciera un agricultor que siguiera las indicaciones de la Asociación de Investigación para la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (AIMCRA). Dentro de estas dos bandas se dejaron 120 m² como zona testigo, es decir, sin ningún tipo de abonado.

Para la cuarta y octava bandas se utilizó un microgranulado llamado *Umostart* (43 kg/ha, 5 N amoniacal, 20 P, 1 Zn).

La parcela secundaria, habitual según *Agricultor*, se abonó con 920 kg/ha de 12-20-12 (110 N, 184 P, 110 K).

La siembra se efectuó, en todas las bandas, incluida la *Testigo*, el día 22 de marzo con remolacha variedad Ramona KWS, a 3 cm de profundidad, aproximadamente.

El 31 de mayo se distribuyó el abono de cobertera, nitrosulfato amónico al 21 % (330 kg/ha, 69 unidades/ha N) en todos los tratamientos excepto en el *Testigo*. También se abonó con nitrosulfato amónico (445 kg/ha, 94 unidades/ha N) la parcela secundaria (*Agricultor*).

Las parcelas fueron regadas por aspersión durante cinco días (40 mm/d), con un espacio de 10 días entre riego y riego, empezando el 7 de julio. El cultivo anterior a la remolacha había sido de trigo.

2.3. Reconocimiento edafológico

El 13 de febrero de 2002, previo a la siembra, se hicieron ocho perforaciones manuales (figura 1) con una profundidad variable entre 80 y 100 cm, dos sondeos dentro del tratamiento *Urea*, dos en el de *Fisiostart*, otros dos en el de *Umostart*, así como un muestreo en el *Habitual* y otro en la zona *Testigo*

Los cuatro primeros (1 al 4) son muy similares ya que todos presentan un horizonte superficial (hasta 30-50 cm) de color negro pardusco, textura arcillosa (> 80 % de

arcilla y limo) y presencia, aunque escasa, de raíces de tamaño muy fino; mientras que el horizonte subsuperficial es de color marrón amarillento, textura también arcillosa, con pequeños nódulos calcáreos y bandas de oxidoreducción de hierro. Los otros cuatro (4 al 8) presentan la misma coloración que los primeros tanto en el horizonte superficial como en el subsuperficial; sin embargo, no hay presencia de nódulos calcáreos ni bandas de oxidoreducción. Los horizontes subsuperficiales de estos perfiles contienen un porcentaje de arena algo mayor.

Posteriormente a la recogida de la remolacha se procedió a un nuevo muestreo de suelos, el día 21-02-2003. Se efectuaron perforaciones manuales en los mismos lugares.

En los dos reconocimientos, previo y posterior, se tomaron muestras de suelo en los diferentes horizontes que fueron analizadas en laboratorio. La tabla 1 recoge los datos de las determinaciones comunes a ambos muestreos (pH, nitratos, amonio, fósforo, magnesio y potasio), si bien en el primero la analítica fue más completa, incluyendo el análisis textural.

2.4. Metodología de la toma de aguas del suelo

El Tensionic (www.sdec-france.com) es un sistema de muestreo del agua del suelo, particularmente utilizado para el seguimiento de los NO₃⁻. Este sistema tiene la ventaja, comparado con las cerámicas porosas clásicas, de poder medir, adicionalmente, el potencial hídrico del agua en el suelo. Se trata de un dispositivo que incorpora en su extremo inferior una cerámica porosa y en su extremo superior un tapón auto-cicatrizante que permite la conexión a una unidad de lectura del potencial hídrico. La recogida de la muestra se basa en el equilibrio entre la fase acuosa del suelo y el agua almacenada en el interior de la cerámica porosa. Este equilibrio se obtiene en un periodo de tiempo variable entre 8-10 días, en función del estado hídrico del suelo. Así, el dispositivo permite la toma de una muestra de agua (máximo volumen 15 ml) representativa del agua del suelo a la profundidad a la que se sitúa la cerámica porosa.

El periodo de seguimiento y control de los lixiviados en las parcelas de Matauko ha sido de diez meses, desde la colocación de los Tensionic los días 8 y 9 de abril de 2002 hasta su retirada el 13 de diciembre del mismo año.

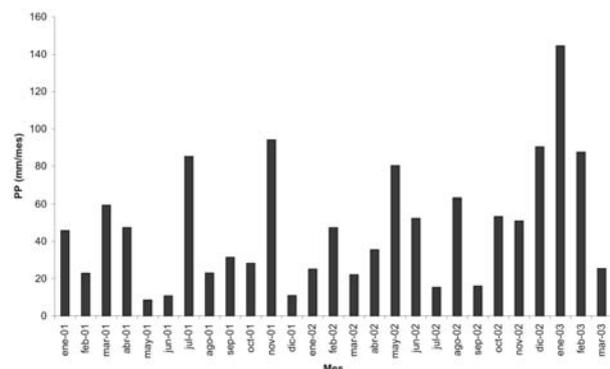


Fig. 2. Evolución mensual de las lluvias (mm) en Arkaute.

2.5. Contexto climático

La figura 2 muestra la evolución mensual de las lluvias registradas en la cercana estación meteorológica de Arkaute, representativa de la Zona Vulnerable, desde enero 2001 hasta marzo 2003. Es evidente que el invierno previo (2001-02) a la siembra de la remolacha fue muy seco en comparación con el siguiente. En el periodo octubre 2001-febrero 2002 el total registrado fue de 195 mm, mientras que en octubre 2002-febrero 2003 de 530 mm, con lluvias de gran intensidad. En la posterior discusión se comenta la importancia de este contexto climático.

3. Resultados

3.1. Hidrodinámica del suelo

La figura 3 muestra la evolución temporal del perfil de tensión en la parcela (a 50 y 100 cm), deducida a partir de las medidas del potencial hidráulico, y la estimación correspondiente de la evolución del nivel freático. Hay que advertir que la primera lectura tuvo lugar el 10-IV-02, al día siguiente de la instalación de los Tensionic, mientras que el primer muestreo de aguas se produjo el 1-V-02, una vez dado tiempo al necesario equilibrio con las aguas del suelo.

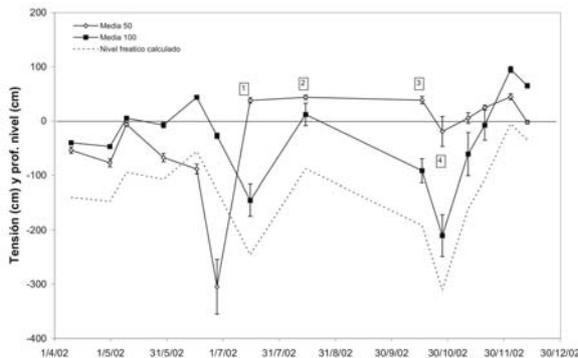


Fig. 3. Evolución de la tensión (cm de depresión de columna de agua), a 50 y 100 cm, y del nivel freático (profundidad, cm). Explicación de los números en el texto.

Para explicar mejor esta evolución en la figura 4 se han representado las lluvias diarias, los días de riego y la evolución del nivel piezométrico registrado en el pozo Arkaute (SC21), referencia piezométrica de la Zona Vulnerable. Las lluvias son las registradas en la estación de Arkaute, y los cinco días de riego (40 mm/día) están situados según la información del agricultor. Se han señalado mediante flechas los momentos de muestreo y toma de datos en los Tensionic.

Según lo observado, durante abril y mayo la diferencia de humedad en los dos niveles no es grande. Las lluvias producen incrementos de humedad en todo el perfil, como se evidencia entre la segunda y tercera lectura (50 mm de precipitaciones) y entre la cuarta y quinta (35 mm). El 10 de mayo el nivel freático debía estar a 1 m de profundidad,

y sube hasta 0.5 m el 17 de junio. Además, el 10 de mayo el nivel superior (50 cm) estaba saturado, pero no por ascenso del nivel freático sino por la recarga producida por las fuertes lluvias de los días precedentes. El piezograma en Arkaute representa bien esos episodios de recarga.

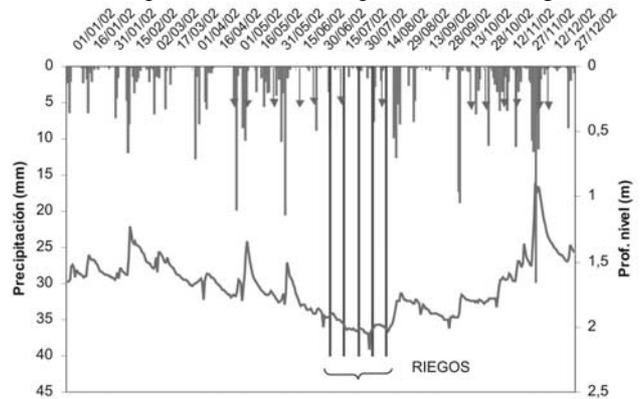


Fig. 4. Evolución de lluvias+riego (mm) y de profundidad del nivel (m) en el pozo Arkaute. Las flechas indican los muestreos.

Durante el periodo de regadíos puntuales, los datos tomados en los Tensionic presentan dudas razonables. En esa época de altas temperaturas es muy probable que, al menos en superficie, la disminución de humedad (deseccación del suelo por encima de 800 hPa) provocase el vaciado de los dispositivos y, por tanto, el descontrol de la lectura. El continuado efecto de desecación, por evapotranspiración, y humectación, por regadío, podría explicar lo dudoso de los datos.

Según éstos, el nivel superficial (50 cm) habría estado a saturación en esa época (1 y 2, en figura 3), incluso hasta mediados de octubre (3), tiempo después del último regadío y sin apenas lluvias a lo largo de septiembre, lo cual no parece razonable. Estas dudas son inherentes al sistema de medida de esos dispositivos.

Se ha contado con otra fuente de información. Se trata de los datos del nivel freático medidos a paso mensual (los últimos días del mes) en la Unidad Cuaternario por los técnicos de la Diputación Foral de Alava. En el entorno de Matauko hay cuatro pozos en la red de observación.

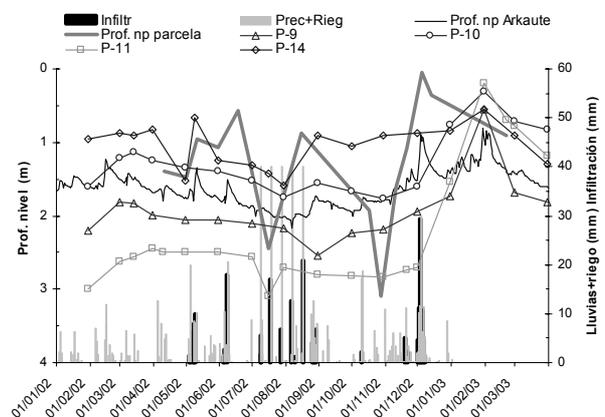


Fig. 5. Evolución de la piezometría (m) en pozos próximos a la parcela y de las lluvias+riego e infiltración (mm/d).

La figura 5 recoge la evolución piezométrica desde enero 2002 hasta marzo 2003 de esos pozos, con dato mensual, del pozo Arkaute, de registro continuo, y la anteriormente deducida bajo la parcela a partir de los datos de los dispositivos instalados (figura 3). Se han incluido también datos puntuales tomados por nuestro grupo en algunos de los pozos de la red de la Diputación; estas observaciones puntuales, caso del notable ascenso de nivel a primeros de mayo (pozo 14) o del notable descenso a mediados de julio en el pozo 11, aportan información significativa, que no es reconocida en las medidas mensuales.

También se recogen en esta figura las lluvias diarias (incluidos los riegos; mm/d), hasta el final de 2002, y la infiltración (mm/d) deducida del balance hídrico del suelo realizado (ver más adelante).

Como conclusión de estas observaciones se puede decir que la evolución del nivel piezométrico deducida bajo la parcela, a partir de las medidas en los Tensionic, es razonable y tiene sentido físico, si bien quedan dudas puntuales en algunas observaciones del verano, debido a lo anteriormente argumentado y a la complicación añadida de los bombeos y regadíos puntuales, de difícil verificación en muchas ocasiones. De hecho, aunque en los últimos años las aguas para el riego proceden de balsas de acumulación exteriores al acuífero cuaternario, es todavía frecuente la existencia de bombeos puntuales en el propio acuífero, no controlados.

3.2. Balance hídrico del suelo

Con objeto de estimar la infiltración producida en la parcela, y relacionarla con la evolución de nivel freático ahora comentada, se ha realizado un balance hídrico del suelo a partir de los valores de evapotranspiración de cultivo (ETc) diarios. Para calcular la ETc se ha calculado en primer lugar la evapotranspiración de referencia (ET₀) aplicando el método de Allen (Allen *et al.*, 1994) a escala horaria con los datos de la estación meteorológica de Arkaute. Los valores del coeficiente de cultivo (Kc; 0.35, 1.20, 0.70, según etapas de crecimiento) se han tomado del documento FAO (1998).

Para la realización del balance hídrico hay que fijar los valores del punto de marchitez (PM) y de la capacidad de campo (CC). Los valores de ambos parámetros se han estimado a partir de la textura del suelo (horizonte A; 0-40 cm, aproximadamente) según el procedimiento de Saxton *et al.*, (1986). Para una profundidad de 40 cm los valores de CC y PM que resultan son 152 y 88 mm respectivamente, con 64 mm de máximo de agua disponible. Estos valores son similares a los deducidos por García-Linares *et al.* (2001) para una parcela próxima, situada en Arkaute, con presencia de gramíneas.

El balance hídrico se ha realizado a partir del 22 de febrero de 2002 ya que para esta fecha se dispone de una medida fiable de humedad del suelo (23.3 % volumétrico), obtenida en el laboratorio por gravimetría a partir de una muestra de los 35-40 cm primeros de profundidad del suelo. Este valor se ha tomado como humedad inicial en el balance.

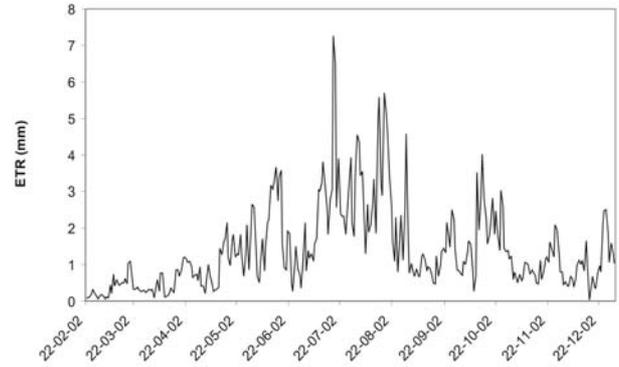


Fig. 6. Evolución diaria de la ETr (mm).

Realizado el balance de humedad del suelo se obtiene que para una entrada de 687 mm (487 mm de lluvias y 200 mm de riegos) durante el periodo considerado (22/02/02 al 31/12/02), se produce una evapotranspiración real (ETr) de 441 mm y una infiltración de 207 mm, lo que supone, para esta última, un 30 % de las entradas. Esta infiltración se reparte en varios episodios temporales que se relacionan con los riegos y con las lluvias más fuertes. De hecho, de los 200 mm utilizados en el riego 65-70 mm han percolado al acuífero.

La figura 6 muestra la evolución diaria de ETr (mm). El cálculo se ha hecho mediante la expresión $ETr = ETc \cdot AW/AWC$, donde AW es el agua disponible en el suelo en cada momento y AWC es la máxima cantidad de agua disponible en el suelo (64 mm en este suelo). Este cálculo asume una relación lineal entre ETr/ETc y AW/AWC , que expresa la mayor dificultad de evapotranspiración a medida que la humedad disponible en el suelo disminuye (García-Linares *et al.*, 2001). Por su parte, la figura 7 señala los episodios de infiltración deducidos del balance, en comparación con las lluvias y riegos.

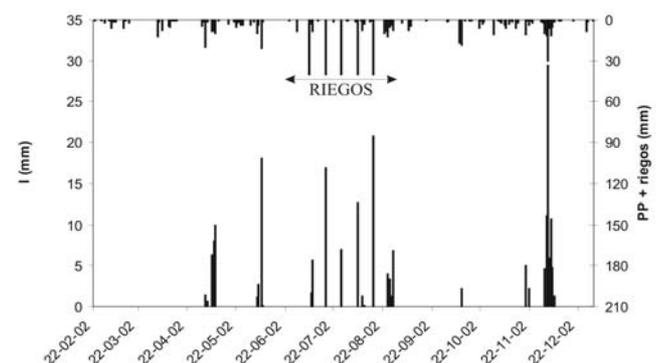


Fig. 7. Evolución de lluvias+riegos (arriba) y la infiltración (mm/d) deducida por balance.

Después de un periodo (figura 6) de baja ETr (< 1 mm/día) e infiltración nula durante los meses de febrero a comienzos de mayo, se produce un progresivo aumento de la ETr a medida que avanza el verano. Durante este

periodo los momentos de mayor infiltración coinciden con lluvias importantes y, sobre todo, con los días de riego.

Desde finales de agosto hasta finales de noviembre apenas se alcanzan condiciones de humedad por encima de la CC, lo que lleva a la ausencia casi total de infiltración. Las lluvias de diciembre dan lugar a la infiltración máxima alcanzada en este periodo (casi 30 mm/día), hecho que se ve claramente reflejado en el nivel del Pozo Arkaute y en el de otros próximos a la parcela (figura 5).

La evolución de episodios de recarga al acuífero deducidos del balance son coherentes con la evolución piezométrica estimada bajo la parcela (figuras 3 y 5).

3.3. Edafología

La tabla 1 muestra los datos analíticos de los suelos de los horizontes (A y B) en los sondeos manuales efectuados antes de la siembra (febrero 2002) y después de la recogida de la remolacha (febrero 2003). En el primer muestreo se hizo un análisis más completo, incluyendo el textural.

En términos generales se puede afirmar que en el muestreo 2002 el horizonte superficial (0-40 cm) es más rico en buena parte de los elementos entonces analizados (materia orgánica, nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, potasio y CIC), favorecido por la textura arcillosa ahí predominante. En lo que respecta a nitratos y amonio, sin embargo, no hay una pauta espacial clara ni relación con la textura del suelo.

La analítica de 2003 se realizó con muestras recogidas dos meses después de la extracción del cultivo. El objetivo era contrastar los datos previos a la siembra y abonado con los obtenidos a posteriori. Se analizó el pH, fósforo, magnesio, potasio, amonio y nitratos (tabla 1). Respecto a la situación inicial, al final del cultivo es clara y notoria la disminución en el contenido en nitratos en todos los horizontes muestreados y para todos los tratamientos efectuados.

Aunque no se han analizado los suelos en épocas intermedias del cultivo, se puede pensar que esa pérdida generalizada de nitratos del suelo se ha producido, en buena medida, al menos, en los episodios de infiltración al acuífero (figura 7), relacionados con los momentos de riego y con las fuertes lluvias.

Por el contrario, el amonio no disminuye tan fácilmente, debido probablemente a su carga positiva que le permite unirse a las arcillas y a la materia orgánica, permaneciendo retenido durante más tiempo. Mientras que al inicio del cultivo hay poca diferencia en la concentración de amonio entre los horizontes superior e inferior, al final del cultivo la diferencia es notable, con un mayor contenido en el nivel superficial (A), superior al del inicio, y escaso en profundidad (B), menor que al inicio. Esta ganancia de amonio en superficie puede ser debida a los procesos de mineralización de la materia orgánica, más abundante en los horizontes superficiales.

También se aprecia, en general, una pérdida en fósforo, potasio y magnesio desde el inicio al final del cultivo, si bien hay excepciones que no permiten fijar una tendencia clara, ni siquiera por tratamientos. Sí se observa que,

normalmente, el horizonte profundo posee menor concentración en esos elementos que el superficial.

La disminución de contenidos durante el periodo de cultivo ha sido más evidente en el horizonte superficial, siendo las variaciones en profundidad menores. Como resultado de esta disminución el suelo al final del cultivo presenta una mayor homogeneidad que al inicio.

Tabla 1. Analítica de suelos 2002-2003. Unidades: mg N-NO₃/kg, mg N-NH₄⁺/kg, P (mg/kg), Mg (meq/100 g), K (mg/kg).

		pH	NO3	NH4	P	Mg	K
2002	P. 1 A	8,27	11,39	0,31	2,93	1,56	69
	P. 1 B	7,94	3,25	0,14	1,68	1,43	60
	P. 2 A	7,58	10,60	0,16	18,91	1,91	191
	P. 2 B	7,94	12,11	0,37	17,17	1,99	231
	P. 3 A	7,98	4,58	0,18	14,69	1,77	140
	P. 3 B	8,24	6,35	0,13	1,77	1,36	65
	P. 4 A	7,81	5,58	0,14	21,15	2,40	247
	P. 4 B	8,21	12,66	0,28	1,62	1,25	55
	P. 5 A	7,85	10,30	0,36	13,62	2,39	189
	P. 5 B	8,07	6,33	0,22	1,01	1,52	63
	P. 6 A	8,15	9,34	0,30	1,33	1,36	65
	P. 6 B	7,86	12,76	0,15	2,26	1,64	69
	P. 7 A	7,76	6,32	0,20	27,04	2,77	232
	P. 7 B	7,71	8,16	0,17	32,40	2,91	270
	P. 8 A1	7,83	4,02	0,24	27,00	2,71	265
	P. 8 A2	8,05	8,27	0,23	7,80	2,99	187
P. 8 B	8,44	5,10	0,19	1,77	1,82	73	
2003	P. 1 A	7,89	0,53	0,23	15,54	1,54	150
	P. 1 B	8,42	1,3	0,04	3,59	1,54	92
	P. 2 A	8,28	3,02	0,22	12,17	1,27	133
	P. 2 B	8,34	0,69	< l.d	1,8	1,33	80
	P. 3 A	8,03	2,86	0,35	22,76	1,75	175
	P. 3 B	8,28	0,79	< l.d	3,86	1,27	80
	P. 4 A	7,97	2,56	0,3	11,67	1,48	138
	P. 4 B	8,39	1,18	0,03	2,05	1,27	73
	P. 5 A	8,07	2,27	0,47	16,65	1,69	133
	P. 5 B	8,51	0,57	0,01	1,24	1,19	58
	P. 6 A	7,88	1,36	0,59	34,34	2,1	185
	P. 6 B	8,46	1,54	0,14	4,41	1,06	65
	P. 7 A	7,99	2,46	0,51	24,85	2,23	180
	P. 7 B	8,33	1,85	0,14	2,98	1,25	70
	P. 8 A1	7,91	2,07	0,39	18,63	2,06	190
	P. 8 A2	8,31	2,45	0,06	3,19	1,17	93

3.4. Estudio analítico de las aguas del suelo

La periodicidad del muestreo de aguas del suelo se ha visto condicionada por la meteorología. Durante los meses de mayor pluviosidad la frecuencia fue mayor (cada 10 ó 15 días), mientras que en el periodo de estiaje los muestreos fueron mensuales (figura 4). Durante los meses de verano la cantidad de muestras recogidas fue mínima, así como su volumen de agua, lo que dificulta mucho, la interpretación analítica. Ya se ha comentado (apartado 2.1)

el problema de vaciado que suele darse en los Tensionic por efecto de una excesiva desecación del suelo.

Las muestras tomadas en estos meses son de Tensionic profundos mientras que los someros (50 cm) permanecieron secos. No fue hasta noviembre cuando se recogieron con normalidad muestras en el nivel superficial.

En las 13 campañas se tomaron 415 muestras, y se determinaron los principales aniones (nitratos, fosfatos, cloruros, sulfatos) y cationes (calcio, magnesio, sodio, potasio, zinc).

Hay dos periodos claramente diferenciados en las características de las aguas. Por un lado, de mayo a agosto y, por otro, de octubre hasta el final del seguimiento en diciembre. Como ejemplo más ilustrativo la figura 8 recoge la evolución de nitratos hasta agosto, por tratamientos y por profundidades, al ser este elemento el objetivo primordial del estudio. Se hace ahora una descripción general de las variaciones observadas en el espacio y en el tiempo.

- NO_3^- : Hasta agosto los contenidos en nitratos, valores medios por tratamiento (figura 8), oscilan entre 70 y 180 mg/l. En profundidad es evidente la mayor presencia en *Agricultor*, siendo similar, espacialmente, en el resto. En superficie los valores resultan algo mayores en *Fisiostart* y *Umstart*, y claramente menores en *Testigo*. De todas formas, no hay una relación neta entre la presencia de nitratos en el agua y el tipo de abono que se mantenga en las dos bandas de cada tratamiento. Lo que sí es muy evidente es la pérdida de nitratos después del verano, con valores medios en todos los casos inferiores a 25 mg/l, algo menores en el nivel profundo que en el superficial.

- Cl^- : Tiene mayor presencia en profundidad con contenidos medios de 30-40 mg/l, propios de las aguas subterráneas del acuífero.

En superficie son mucho menores y sin tendencia por bandas. Después del verano hay una importante disminución. Hay que señalar que este elemento es el que mejor discrimina las aguas del acuífero y las aguas del suelo. En el acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz tiene un origen antrópico relacionado, sobre todo, con el uso intensivo de fertilizante N-P-K en la Zona Vulnerable, que aporta cantidades importantes de cloruros (Grupo de Hidrogeología, 2003); en nuestra parcela este fertilizante fue usado de forma puntual, de manera que la mayor presencia en profundidad hay que relacionarla con ascensos del nivel freático, lo que origina una cierta contaminación del suelo en profundidad que hay que tenerla en cuenta a la hora de interpretar la analítica de las aguas del suelo.

- Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ : Los cationes presentan un comportamiento similar. Hasta agosto las concentraciones son mayores, y más variables espacialmente, en el horizonte superficial, mientras que hay mayor homogeneidad en el horizonte profundo. No se observa relación clara entre las concentraciones y los tratamientos, pudiendo encontrar los máximos valores en cualquiera de ellos, incluido el Testigo. A partir de octubre hay una disminución clara de concentración en todo el perfil, sobre todo en superficie, y en todas las bandas, alcanzándose una

mayor homogeneización espacial, sobre todo en profundidad.

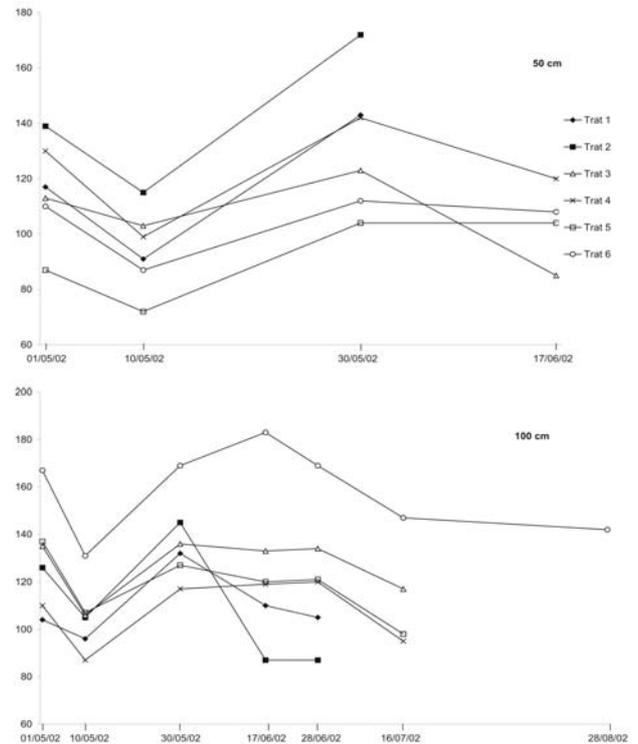


Fig. 8. Variación de nitrato en las aguas del suelo (NO_3^- mg/l) de mayo a agosto. 1: Urea. 2: Fisiostart. 3: Habitual. 4: Umstart. 5: Testigo. 6: Agricultor

Con objeto de visualizar mejor la evolución temporal se ha realizado un Análisis en Componentes Principales (ACP) con todos (50 y 100 cm) los datos hasta agosto. El factor I (29,7 %) claramente discrimina entre Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , en su lado positivo (caracterizan claramente las aguas superficiales), y Cl^- en el negativo (caracteriza las aguas más profundas), siendo estos los elementos que mejor caracterizan las aguas del suelo. El resto de elementos analizados, sobre todo SO_4^{2-} , interviene bastante menos en la explicación del conjunto de la información existente en la matriz inicial de datos.

Entre las aguas superficiales (50 cm), durante el periodo entre mayo y agosto, las más ricas en Mg^{2+} - Na^+ - K^+ son las del tratamiento de *Urea*, y luego, en orden decreciente, *Habitual*, *Fisiostart*, *Agricultor*, *Umstart* y *Testigo*. En cualquier caso, en todos los tratamientos se observan diferencias apreciables entre las aguas de cada una de las dos bandas, e incluso en ocasiones también entre las aguas de los dos Tensionic de cada banda. Todo esto es indicativo de la variabilidad espacial del quimismo de las aguas a nivel de la parcela.

Respecto a la evolución temporal la figura 9 sintetiza lo observado en el plano factorial I-III del ACP, siendo el factor III el caracterizado por los nitratos. En general el patrón de evolución es similar en todo el perfil, si bien, comparativamente, las variaciones observadas son mayores

a 50 cm, con una mayor dispersión de datos.

Así, entre la primera (1 mayo) y la segunda campaña (10 mayo) hay una recarga al acuífero, por lluvias, con consiguiente ascenso del nivel freático (figura 5), que explicaría la disminución en los contenidos. El incremento en NO_3^- , también en fósforo y calcio, de la tercera campaña (30 mayo), sería indicativo de la llegada a esas profundidades de fertilizantes puestos en superficie en el abonado de fondo (mediados de marzo). El aumento de contenidos de la cuarta campaña (17 junio) habría que relacionarlo con la importante recarga producida pocos días después del abonado de cobertera (31 mayo). A partir de ese momento no se dan lluvias de consideración, y se produce una pérdida de humedad en el suelo hasta el inicio de los regadíos a primeros de julio. La consiguiente infiltración produce una progresiva disminución de los contenidos, como se observa en la figura 8 para nitratos.

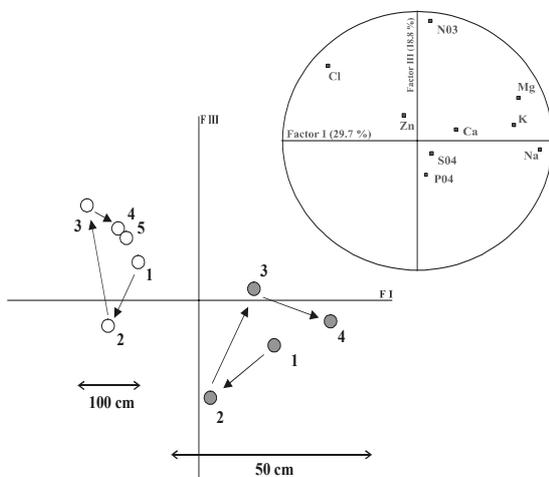


Fig. 9. Patrón de evolución temporal de las aguas del suelo, hasta agosto. Los números indican el orden de las campañas.

En cuanto al periodo entre octubre y diciembre, decir que los datos analíticos de las aguas son bastante caóticos. Si bien es notable la disminución generalizada de contenidos respecto al periodo anterior, debido al lavado del suelo por la percolación y a la toma de nitratos por el cultivo, en este periodo la heterogeneidad es tal, incluso entre Tensionic de la misma banda y profundidad, que ninguna tendencia resulta netamente evidente. El hecho de que el suelo haya estado sometido a fuerte desecación en algunos momentos, con la influencia que ello tiene en el buen funcionamiento de los Tensionic, junto con el escaso volumen de muestra tomado con frecuencia, en absoluto ayuda a una mejor interpretación de estos datos, algunos de los cuales pudieran incluso ser de dudosa fiabilidad.

En cualquier caso, excepción hecha del tratamiento *Agricultor*, en el resto hay siempre mayor concentración en nitratos en las aguas del horizonte superficial, normalmente entre 10 y 25 mg/l, mientras que en profundidad los contenidos son muy bajos, inferiores normalmente a 5 mg/l. Hay que tener en cuenta que a mediados de noviembre y, sobre todo, a primeros de diciembre ha habido episodios importantes de percolación al acuífero.

4. Discusión y conclusiones

En la investigación de la parcela se han seguido tres caminos distintos: estudio del suelo antes y después del cultivo, caracterización de las aguas del suelo a dos profundidades (50 y 100 cm) durante el periodo de cultivo, y realización del balance hídrico del suelo. El periodo de seguimiento se extendió desde febrero de 2002 a febrero de 2003.

La caracterización inicial de los suelos evidenció una notable dispersión espacial de los elementos analizados en la parcela, con un, en general, mayor contenido de los elementos en superficie, allí donde la fracción arcillosa y la materia orgánica son más abundantes. Comparativamente, en la caracterización post-cultivo, los suelos muestran una mayor homogeneidad, con una pérdida generalizada de contenidos en todo el perfil, sobre todo en superficie. Esta pérdida es mucho más notable para los nitratos, debido a la lixiviación y a la absorción por el propio cultivo; previo al abonado de fondo la reserva de nitratos en el suelo era de 104 kg N/ha y al final de 7-10 kg N/ha, según tratamientos (García-Linares *et al.*, 2003).

El balance hídrico del suelo de la parcela ha permitido verificar la evolución piezométrica deducida de las medidas de potencial hídrico en los Tensionic. Para una entrada total de 687 mm (200 mm por riego) la infiltración estimada es de 207 mm (30%), con eventos de infiltración claramente relacionados con los riegos, por un lado, y las fuertes lluvias, por otro. Así, de los 200 mm de riego unos 65-70 mm se habrían infiltrado, lixiviando nitratos hacia el acuífero.

Resulta esencial ubicar el estudio realizado en su contexto climático, ya que mientras las escasas lluvias del invierno previo a la siembra de la remolacha justifican la notable reserva de nitratos del suelo, las importantes lluvias del invierno siguiente justifican, en buena medida, la pérdida de nitratos en el suelo y en las aguas del suelo. Este hecho muestra la importancia que tiene conocer las condiciones antecedentes de reservas en el suelo a la hora de hacer seguimiento del impacto de un cultivo sobre el medio.

La analítica de las aguas del suelo, por su parte, evidencia lo observado en los suelos: disminución generalizada en el contenido de los elementos analizados, en todo el perfil y en todas las bandas después del verano, sobre todo en nitratos que pasan de valores por encima de 70-80 mg/l a valores por debajo de 20 mg/l. Buena parte de esta disminución se relaciona con los episodios de infiltración antes citados. A pesar de ello, no se aprecia tendencia clara alguna entre la evolución espacial de los contenidos de los distintos elementos en las aguas del suelo y los diferentes tratamientos realizados; la variabilidad, incluso entre bandas del mismo tratamiento, es habitual.

Considerando los valores medios por tratamiento sí que se evidencia mayores contenidos en *Agricultor*, en relación con las mayores dosis aplicadas. Para el resto de tratamientos efectuados no hay una diferenciación clara, ni siquiera en las bandas *Testigo*, lo que significa que los nitratos lavados del suelo estaban presentes con anterioridad al abonado de fondo. La evolución temporal

es similar y está condicionada por los episodios de abonado e infiltración.

Las conclusiones derivadas de esta investigación valen para condiciones similares a las experimentadas. Es evidente que la “vulnerabilidad” a la contaminación por nitratos de origen agrícola (la zona de estudio está declarada Zona Vulnerable) no sólo depende de las condiciones intrínsecas inherentes al medio físico (suelo), sino también del tipo y secuencia de los cultivos, del tipo de práctica de abonado, incluyendo riegos, y de las condiciones atmosféricas, aspectos, sobre todo los últimos muy variables en el tiempo. De ahí el interés de situar el estudio realizado en su contexto. Pretendemos estudiar parcelas en contextos diferentes dentro de la Zona, con objeto de ir definiendo un catálogo de situaciones específicas que puedan ir generalizándose y ayude en la consecución del objetivo último de protección de los recursos hídricos.

Agradecimientos. Esta investigación (Grupo de Hidrogeología, 2003) fue auspiciada por la Dirección de Aguas del Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritza, y se enmarca en un estudio más amplio sobre los trazadores, naturales y antrópicos, en diferentes sistemas hidrológicos (Proyecto

REN2002-01705 del MCYT). Agradecimiento especial para el agricultor Javier Saez de Castillo.

Referencias

- Allen, R.G., Smith, M. y Pereira, L.S. (1994). An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* 43(2), 1-34, 35-92.
- García-Linares, C., Antigüedad, I., Gonzalo, J.M. y Mugerza, I. (2001). *Actualización de métodos para la estimación de la evapotranspiración. Aplicación en ámbitos concretos del País Vasco.* Servicio Vasco de Meteorología. 53 p. Inédito.
- García-Linares, C., Martínez, M., Sánchez-Pérez, J.M., Justes, E. y Antigüedad, I. (2003). Aplicación del modelo STICS para la determinación de la lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha azucarera en la zona no saturada del suelo. *Estudio en la Zona no Saturada del Suelo. Vol VI.* Este mismo volumen.
- Grupo de Hidrogeología (2003). Seguimiento en parcelas experimentales en la Zona Vulnerable a la contaminación por nitratos de Vitoria-Gasteiz. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea. Inédito. 81 p.
- FAO (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements.* FAO Irrigation and Drainage Paper 56. 300 p.
- Saxton, K.E. et al. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50(4), 1031-1036.