

INFLUENCIA DEL LAVADO DE NITRATOS DEL SUELO SOBRE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO CUATERNARIO DE VITORIA-GAZTEIZ (PAIS VASCO).

SANCHEZ-PEREZ, J.M. ⁽¹⁾, ANTIGUEDAD, I. ⁽²⁾, ARRATE, I. ⁽²⁾,
RUIZ, M. ⁽²⁾ y MORELL, I. ⁽³⁾

⁽¹⁾ Centre d'Études et de Recherches Eco-Géographiques (CEREG-URA 95 CNRS), 3 rue de l'Argonne. 67083 Strasbourg Cedex, France.

⁽²⁾ Grupo de Hidrogeología. Departamento de Geodinámica. Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea. 48940 Leioa (Bizkaia).

⁽³⁾ Departamento de Ciencias Experimentales, Universitat Jaume I, Carretera de Borriol, km 1, 12004 Castelló.

Laburpena

Gasteiz-Vitoriako akuifero koaternarioko lurpeko uren izaera kimikoa kontrolpean izan da azken bost urteetan. Urok osagai nitrogenatuetan duten edukia 20-40 mg/l-ko gorakada agertu dute urtez urte. Urtean zehar ere ba da gorabeherarik, edukirik altuenak neguan eta baxuenak uda partean ageri direlarik.

1993-1994 denboraldian ikerketa zehatzagoa burutu genuen, koaternarioko lursailetan nekazariak erabiltzen dituzten ongarrien eragina lurpeko eta zoruko uretan agerian uzteko asmoz. Ikerketa bi prestatu genituen horretarako, bata Arkauteko Patataren Hobakuntzarako Ikertokiaren nekazal lur landuan, eta bestea Jungituko lur ez landu batean. Helburua lurron jokabide desberdinak ikustea zen. Zoruko urak sakonera desberdinetan kokaturiko keramika porotsuen bidez lagindu ziren. Lurpeko uren laginak, ordea, putzuetan hartu ziren.

Zoruko urek dituzten nitrato-edukien denborako bilakaera guztiz lotuta dago ongarriztapen sasoiarekin eta euriteekin. Horrela, ongarriztatu ondoren gertatzen diren eurijasek zoruko nitratoak beheantza bultzatzen dituzte, goikaldea neurri batean garbituz eta behelaldeko uren nitrato-edukiak handitaraziz. Argi geratzen da hau putzuetako uren analisiak ikusita.

Nekazal lurra ez den Jungituko horretan zoruko urek dituzten nitrato-edukiak eskasak dira, Arkauteko nekazal lurzoruko uren edukiakin alderaturik behinik behin. Horrela, Arkauten zoruko nitratoen erreserba 15 kg NO₃⁻. ha⁻¹-koa da Ekainean eta 903 kg-raino handitzen da Urtarrilean, udazkenaren azkenean izandako ongarriztapen eta momentuko eurien ondorioz. Jungitun, berriz, 12 kg-tik 89 kg-ra aldatzen da, denbora berean, zoruko nitratoen erreserba. Bestalde, euri-uretan bertan datozen nitratoen ekarpena kontuan hartzekoa da lur ez landuetako zoruetan, Jungituko kasuan hortxe lixibiatutako nitratoen ehuneko 36a jatorriz atmosferikoa zen eta. Arkauten, osterara, ehuneko 2a baino ez zen izan, hango nitrato gehien-gehiena ongarriei dagokie eta.

Resumen

La composición química de las aguas subterráneas del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz ha sido estudiada durante los últimos 5 años. El aumento de las

concentraciones en compuestos nitrogenados de estas aguas se incrementa del orden de 20 a 40 mg.l⁻¹ por año. El aumento de la contaminación por compuestos nitrogenados sigue una evolución anual caracterizada por fuertes concentraciones en los meses de invierno y una disminución de las mismas durante los meses de verano.

Durante el periodo 1993-94 se estudió el impacto de los aportes fertilizantes sobre la composición de las soluciones del suelo y de las aguas subterráneas en dos parcelas experimentales. Una parcela se situó en una zona cultivada de la Granja Experimental para la Mejora de la Patata de Arkaute y una segunda se ubicó en una zona no cultivada (Jungitu). Las soluciones del suelo se muestrearon mediante cerámicas porosas a varias profundidades.

La evolución temporal de las concentraciones en nitratos en las soluciones del suelo es función del periodo de aporte de los fertilizantes y de los episodios de lluvias. Durante los episodios lluviosos de fuerte intensidad las aguas subterráneas se recargan con aguas procedentes del lavado de las soluciones intersticiales del suelo, lo que ocasiona un aumento de las concentraciones en nitratos del acuífero.

Durante el periodo estudiado los volúmenes de fertilizantes lixiviados en la zona no cultivada son inapreciables si los comparamos con las cantidades arrastradas en la zona cultivada. La evolución temporal de las reservas en nitratos en la zona cultivada varía entre los 15 kg NO₃ .ha⁻¹ del mes de Junio, en los periodos sin abonados y con fuertes lluvias, a los 903 kg NO₃ .ha⁻¹ a finales de Diciembre con posterioridad al abonado de finales del otoño.

En la zona no cultivada las reservas varían entre los 89 kg NO₃.ha⁻¹ en el mes de Enero y los 12 kg NO₃ .ha⁻¹ de Junio. Durante el mismo periodo los aportes atmosféricos representan 28 kg NO₃ .ha⁻¹ en la zona no cultivada (36% de los nitratos lixiviados) y 15 kg NO₃ .ha⁻¹ en la zona cultivada (2% de los nitratos lixiviados). Una parte de las reservas en nitratos presentes en las dos zonas podría atribuirse a la mineralización de la materia orgánica.

Introducción

La degradación de las aguas subterráneas en zonas rurales se atribuye frecuentemente a las prácticas agrícolas que implican un uso incontrolado de fertilizantes y pesticidas. El impacto de estas actividades sobre la calidad de las aguas subterráneas ha sido puesta de manifiesto en numerosos trabajos (Gustafson, 1983; Andersen and Kristiansen, 1984; Sanchis, 1991; Bernhard *et al.*, 1992; Guimera, 1993; Ramos y Varela, 1993; Sánchez-Pérez *et al.*, 1994). En estas zonas las actividades agrícolas, en ocasiones combinadas con la recirculación de las aguas subterráneas mediante los riegos, han ocasionado un incremento de las concentraciones en compuestos nitrogenados y en pesticidas en las aguas subterráneas (Ritter *et al.*, 1990; Arrate *et al.*, 1993).

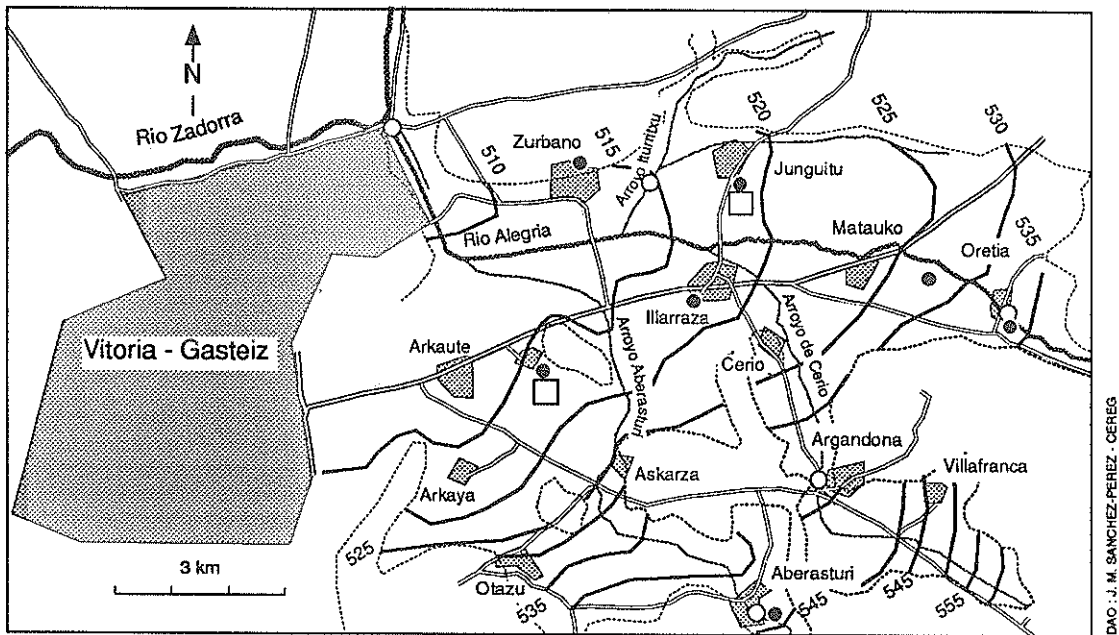
En los últimos 20 años la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales en zonas con una fuerte densidad demográfica ha alcanzado niveles preocupantes. En un gran número de casos los recursos hídricos de estas zonas han sido afectados de tal forma que las aguas no son utilizables sin un tratamiento previo.

La contaminación de las aguas superficiales puede desaparecer en cortos periodos de tiempo si se elimina el foco de contaminación, pero en

el caso de las aguas subterráneas la contaminación puede persistir varios años y las estrategias necesarias para su depuración implican un esfuerzo investigador y económico muy importante.

Los aportes de compuestos nitrogenados pueden contaminar las aguas subterráneas varios días con posterioridad al abono o varios meses después de éstos. El transporte de estos compuestos nitrogenados hacia la zona saturada está condicionado por el contenido en nitratos de las soluciones del suelo, los aportes atmosféricos y el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos.

El primer objetivo de este trabajo es poner de manifiesto la importancia de los aportes de abonos nitrogenados en la contaminación de las aguas subterráneas a partir del estudio comparativo de las concentraciones en nitratos en la zona no saturada de dos sectores bien contrastados: una zona cultivada y una zona no cultivada. En cada una de las zonas se ha establecido un balance de exportación de nitratos hacia la zona saturada. El segundo objetivo ha sido relacionar la evolución de las concentraciones en nitratos con los aportes atmosféricos y el funcionamiento hidrogeológico del acuífero.



DAG: J. M. SANCHEZ-PÉREZ - CEREG

Leyenda (Red de puntos de control)

- Aguas subterráneas
- Aguas superficiales
- Parcelas experimentales
- Límite del acuífero
- - Línea isopieza

Figura 1. Situación de la zona de estudio

Metodología

Descripción de la zona de estudio

En el sector oriental del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz se

instalaron dos parcelas experimentales. En esta zona el acuífero está constituido por gravas heterométricas en matriz areno-arcillosa. El depósito cuaternario constituye un acuífero libre con porosidad intergranular (Arrate, 1994). El nivel freático se encuentra situado a una profundidad que varía entre 0,5 - 2 m de la superficie del suelo.

La recarga del acuífero se realiza fundamentalmente a partir de las lluvias, la infiltración de aguas superficiales procedentes de los bordes del acuífero y los aporte de las aguas de los ríos que circulan por la zona durante los periodos de crecida.

Diseño experimental

El estudio se llevó a cabo durante los años 1993-94 en dos parcelas experimentales: una parcela se situó en un sector cultivado en la Granja Experimental para la Mejora de la Patata de Arkaute y una segunda parcela se instaló en un sector no cultivado, próximo al primero, en la localidad de Jungitu (Figura 1).

Los suelos tienen una textura areno-arcillosa en la parte superior (0-0.4 m) y más arenosa en profundidad (0.4-0.9 m) en la parcela de Arkaute, y de tipo arcillosa en superficie (0-0.3 m) a arcillo-limosa en profundidad (0.3-1 m) en la parcela de Jungitu (Tabla 1).

Profundidad cm	Arkaute			Jungitu		
	0-30	30-40	40-90	0-30	30-50	50-100
Arena Gruesa %	7,3	5,7	29,0	1,1	6,3	2,7
Arena fina %	36,2	38,0	45,0	9,4	37,2	8,8
Limo %	21,3	17,7	16,3	36,6	21,2	49,4
Arcilla %	35,2	38,5	9,8	52,9	35,3	39,0
pH (1:2,5) agua	8,5	8,3	8,8	8,6	8,4	8,8
P, Olsen ppm	32,3	21,4	0,2	10,4	22,4	1,7
CO ₃ Ca %	21,3	11,4	60,7	24,5	20,4	67,3
Ca meq/100gr	33,4	39,3	18,6	42,8	33,9	25,5
Mg meq/100g	0,71	1,04	0,21	3,12	0,75	1,69
Na meq/100g	0,07	0,13	0,07	0,10	0,06	0,04
K, ppm	169	205	20	200	150	70
N-NO ₃ ⁻ , ppm	13,0	9,5	5,0	18,7	24,5	12,5
N-NH ₄ ⁺ , ppm	9,2	18,3	27,0	15,5	11,5	12,0

Tabla 1. Características texturales y físico-químicas de los suelos de las dos parcelas estudiadas.

En cada una de las parcelas experimentales se instalaron 5 muestreadores de succión equipados con cerámicas porosas a 0.15, 0.35, 0.55, 0.75 y 0.95 m de profundidad. La instalación del dispositivo de Arkaute se realizó en Enero de 1993 y la del de Jungitu en Febrero 1993. Los muestreadores de succión están formados por una cerámica porosa

(50 mm de diámetro exterior y 70 mm de longitud) prolongada por un tubo de PVC del mismo diámetro. Los muestreadores de succión fueron limpiados en laboratorio antes de su instalación, para ello se realizaron varios lavados de los mismos con agua desionizada en condiciones de depresión hasta obtener en el interior de los tomamuestras un agua con una conductividad eléctrica próxima a la del agua destilada siguiendo la metodología descrita en Sánchez-Pérez y Morell (1994).

Los tomamuestras se instalaron en el suelo en posición vertical en un agujero realizado previamente mediante un taladro de diámetro similar al de los tomamuestras. El material extraído del suelo a la profundidad de implantación de cada tomamuestras fue utilizado para hacer una pasta con agua desionizada que se introdujo en el agujero con el fin de obtener un buen contacto entre el tomamuestras y el suelo. Los muestreos en el terreno se realizaron aplicando una succión de 60 cbar. Las primeras muestras obtenidas fueron desechadas. Los tomamuestras fueron muestreados regularmente cada 15 días durante el periodo de estudio, aunque durante algunos episodios lluviosos de fuerte intensidad los muestreos se realizaron varias veces por semana.

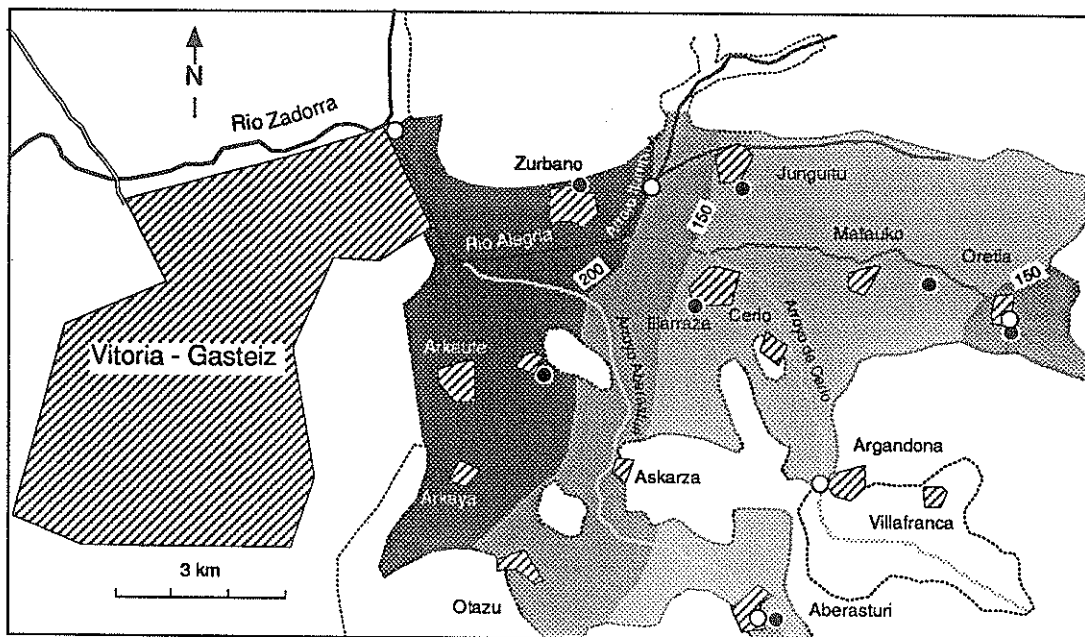
La humedad del suelo se determinó mediante Reflectometría en el Dominio Temporal con un sistema TDR (TRIME System Imko, Alemania) a las mismas profundidades de los muestreos con sondas de dos varillas (3.5 mm de diámetro, 100 mm de longitud y 20 mm de distancia entre las varillas).

En la parcela de Arkaute se plantaron patatas (*Solanum tuberosum L.*) en el mes de Junio 1993. En el mes de Diciembre del mismo año se procedió a la siembra de avena (*Avena sativa L.*). Las dosis de abonos aportadas en el mismo periodo fueron 650 kg.ha⁻¹ de nitratos a primeros de Junio con anterioridad a la siembra y 200 kg.ha⁻¹ en el mes de Noviembre. En la parcela de Jungitu no se procedió a ningún aporte de abonos.

Las precipitaciones fueron medidas en una estación climática en cada una de las parcelas, situada a 200 m de distancia en el caso de Arkaute y 5 m en el caso de Jungitu. En ambas estaciones se procedió al muestreo de las aguas de lluvia para su análisis en laboratorio.

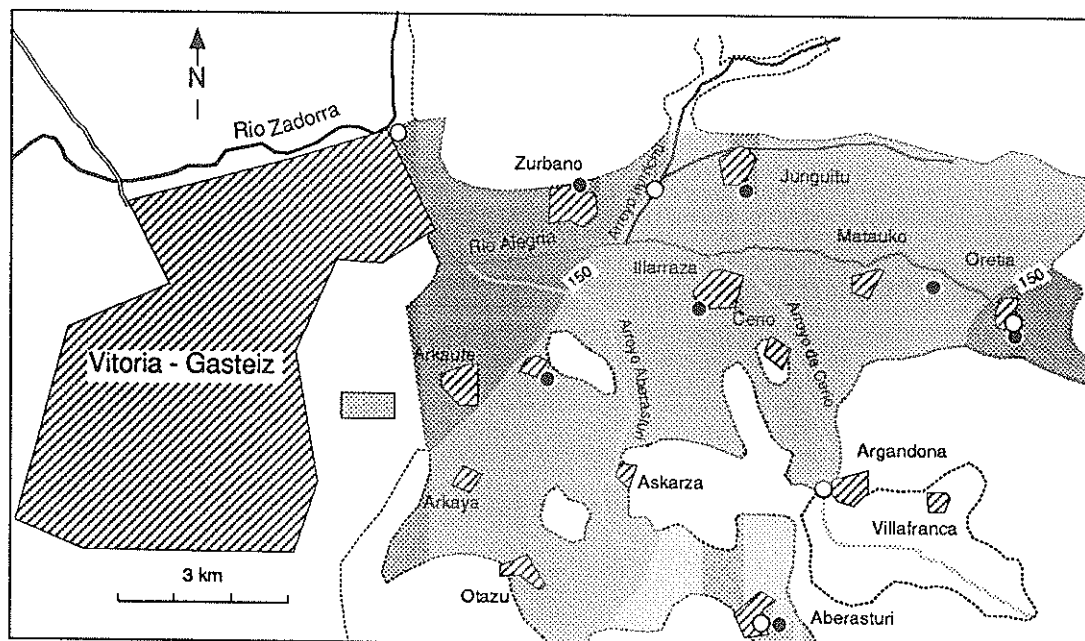
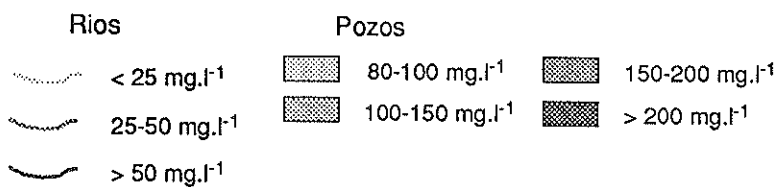
En la parcela de Arkaute el 29 de Junio de 1993 se procedió a la instalación de un sistema de riego por goteo. El sistema se retiró dos meses después. Durante este periodo se controló diariamente la tensión del suelo a tres niveles 0.15, 0.30 y 0.50 m. El sistema de riego se ponía en funcionamiento cuando la tensión alcanzaba los 50 kPa a 0.35 m de profundidad. Durante el periodo de riego se aplicaron 40.9 l.m⁻²; en el mismo periodo los aportes por aguas de lluvia medidos en la estación de Arkaute fueron 86.6 l.m⁻².

Con el objeto de conocer las fluctuaciones del nivel piezométrico se procedió a la instalación de un limnógrafo en cada una de las zonas. Las



DAO: J. M. SANCHEZ-PEREZ - CEREG

Mapa de isocontenidos en nitratos, febrero 1993



DAO: J. M. SANCHEZ-PEREZ - CEREG

Mapa de isocontenidos en nitratos, junio 1993

Figura 2. Mapas de isocontenidos en nitratos en los meses de Febrero y Junio 1993.

aguas subterráneas fueron muestreadas con la misma periodicidad que los tomamuestras. Los análisis de nitratos se realizaron mediante métodos colorimétricos. En la zona no saturada los volúmenes de nitratos fueron calculados multiplicando las concentraciones por el contenido en agua a cada nivel del suelo.

La conductividad eléctrica y el pH de las muestras de agua procedentes de la zona no saturada fueron medidos en el campo. En las muestras de aguas subterráneas además se procedió a medir la temperatura y el oxígeno disuelto.

Resultados y discusión

Prácticas agrícolas y contaminación de las aguas subterráneas

En los últimos años, el cambio del cultivo tradicional de cereal al cultivo de patatas y remolacha conlleva una fuerte demanda de agua durante los meses de verano que es tomada del acuífero. Este cambio de tipo de cultivo implica a su vez grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas, que en gran medida circulan hasta el agua subterránea. La superficie ocupada por cultivos de regadío ha pasado sucesivamente de 1 % (1954) a 11.5 % (1968) y a 67.5 % (1982) del área del acuífero cuaternario. Paralelamente, las zonas con cultivos de secano han pasado de 78.9% en 1954 a solamente 11.4% en 1982.

La evolución temporal de la contaminación por compuestos nitrogenados se manifiesta como un aumento de las concentraciones año tras año. En el mes de Abril 1986 las concentraciones en nitratos en las aguas subterráneas presentan valores medios superiores a 50 mg.l^{-1} . En el mes de Febrero 1990 las concentraciones se han duplicado y llegan a alcanzar valores medios superiores a 100 mg.l^{-1} . En Noviembre 1991, las concentraciones han aumentado un 50% más, y alcanzan ya valores medios de 170 mg.l^{-1} (Arrate *et al.*, 1994). En Enero 1993, los contenidos medios superan los 200 mg.l^{-1} .

Si observamos la evolución de la contaminación a nivel mensual podemos observar que ésta presenta unos ciclos caracterizados por fuertes contaminaciones en los meses de invierno y concentraciones inferiores en los meses de verano (Figura 2). Este funcionamiento cíclico de la contaminación puede relacionarse con las épocas de abono y con el funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

Contaminación por nitratos en las aguas subterráneas y superficiales

La contaminación de las aguas subterráneas se hace patente en los fuertes contenidos en nitratos, aunque en algunos casos esta contaminación esta acompañada de fuertes concentraciones en potasio y fosfatos. Este hecho podría explicarse en el origen de los abonos utilizados caracterizados por la presencia de estos tres constituyentes.

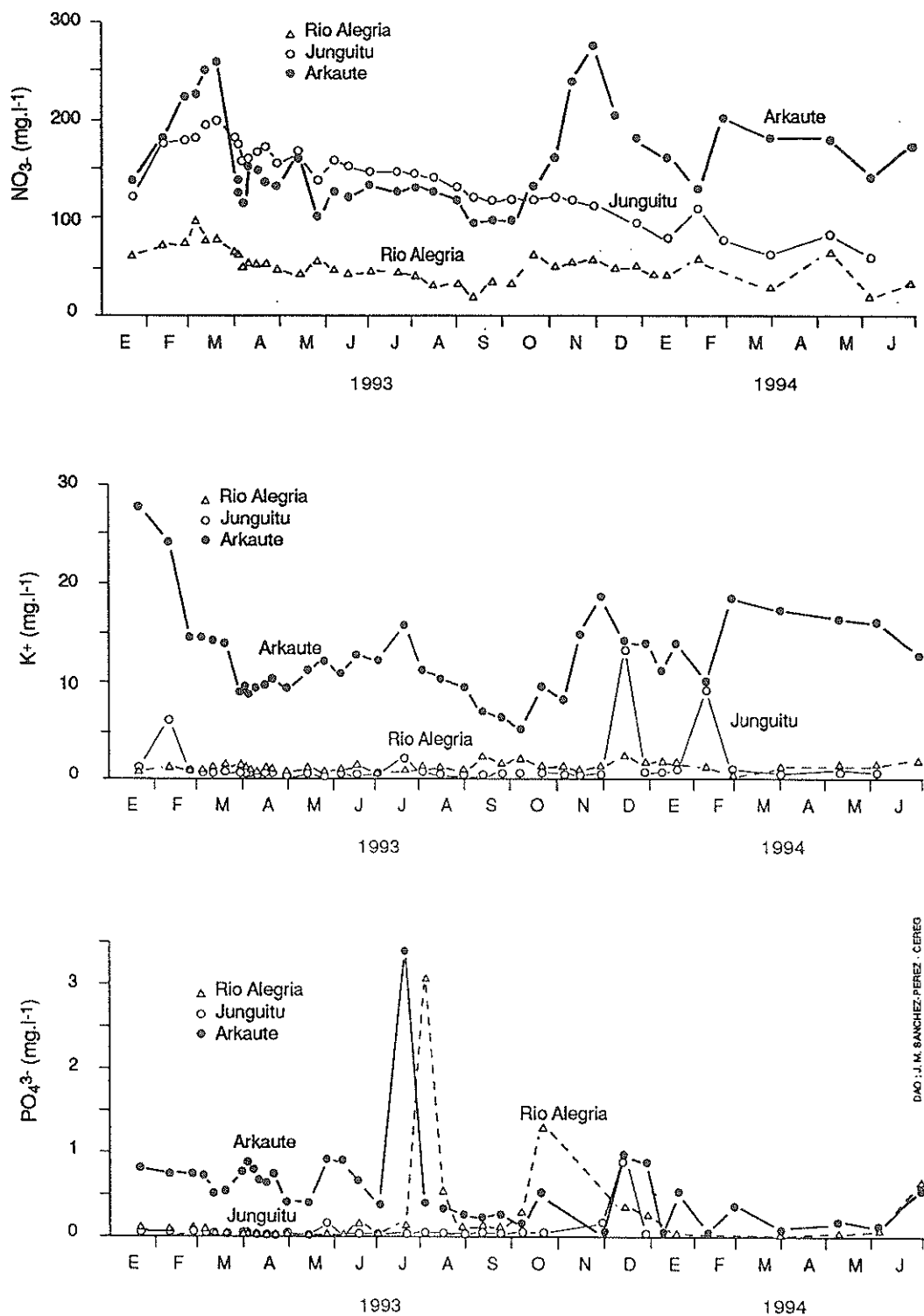


Figura 3. Evolución temporal de las concentraciones en nitratos, fosfatos y potasio en los pozos de Arkaute, Junguitu y en el río Alegria a la salida del acuífero cuaternario.

En la Figura 3 se ha representado la evolución temporal de las concentraciones en nitratos, potasio y fosfatos en los pozos situados en

las proximidades de las dos parcelas experimentales; además, se han representado las concentraciones en el río Alegria a la salida del sistema.

Las concentraciones en nitratos en las aguas subterráneas son similares en los dos pozos y presentan una concentración media sobre los 150 mg.l^{-1} . Las aguas superficiales se caracterizan por un menor contenido en nitratos con un valor medio próximo a los 50 mg.l^{-1} . La evolución de las concentraciones en potasio muestran cómo en Arkaute, situado en una zona con fuerte actividad agrícola, son mucho mayores que en los otros dos puntos. Además, esta contaminación tiende a persistir ya que las concentraciones no bajan en ningún momento de 5 mg.l^{-1} , lo que podría indicar una sobresaturación de los suelos en este elemento. En lo que respecta al fósforo las concentraciones más elevadas se localizan en Arkaute, y puntualmente en las aguas del río Alegria, con picos que pueden alcanzar los 3 mg.l^{-1} .

Condiciones climáticas

Durante el periodo de estudio se registraron las precipitaciones mensuales indicadas en la Tabla 2. Se puede destacar la presencia de fuertes lluvias en primavera con episodios lluviosos, en ocasiones, de fuerte intensidad, 50 l.m^{-2} en un día (Figura 4). Durante el verano del año 1993 se registraron pocas precipitaciones aumentando éstas a finales del otoño y principios del invierno. La pluviosidad está directamente relacionada con los caudales en el río Alegria y los niveles en los dos pozos.

	Lluvia (mm)		Lluvia (mm)
Enero 1993	0,3	Octubre	71,4
Febrero	60,3	Noviembre	46,5
Marzo	28,6	Diciembre	131,8
Abril	125,6	Enero 1994	58,5
Mayo	81,7	Febrero	30,2
Junio	53,2	Marzo	19,2
Julio	26,5	Abril	78,4
Agosto	62,5	Mayo	67,5
Septiembre	101,5	Junio	73,0

Tabla 2. Precipitaciones mensuales en la estación climática de Arkaute.

La evolución temporal de las temperaturas medias muestran una evolución clásica para estas regiones con máximos estivales y mínimos invernales. No obstante se puede reseñar un aumento de las temperaturas de 5° C durante la primera semana de Diciembre 1993 (Figura 4).

Concentraciones en nitratos en las soluciones del suelo

Los contenidos en nitratos en las soluciones del suelo son muy diferentes en las dos zonas. En el caso de la parcela de Arkaute las

concentraciones superan los 50 mg.l⁻¹, llegando a alcanzar valores próximos a los 300 mg.l⁻¹ en algunos muestreos (Figura 5). En Jungitu las concentraciones máximas alcanzan los 114 mg.l⁻¹ en superficie, pero en general las concentraciones no superan los 20 mg.l⁻¹. Durante la primavera las concentraciones en nitratos en las soluciones del suelo (25 a 120 mg.l⁻¹) son inferiores a las concentraciones en las aguas subterráneas (114 a 260 mg.l⁻¹). Después de un episodio lluvioso de 70 l.m⁻² en cuatro días las concentraciones en las soluciones disminuyen de forma importante hasta valores de 1.5 a 7.2 mg.l⁻¹.

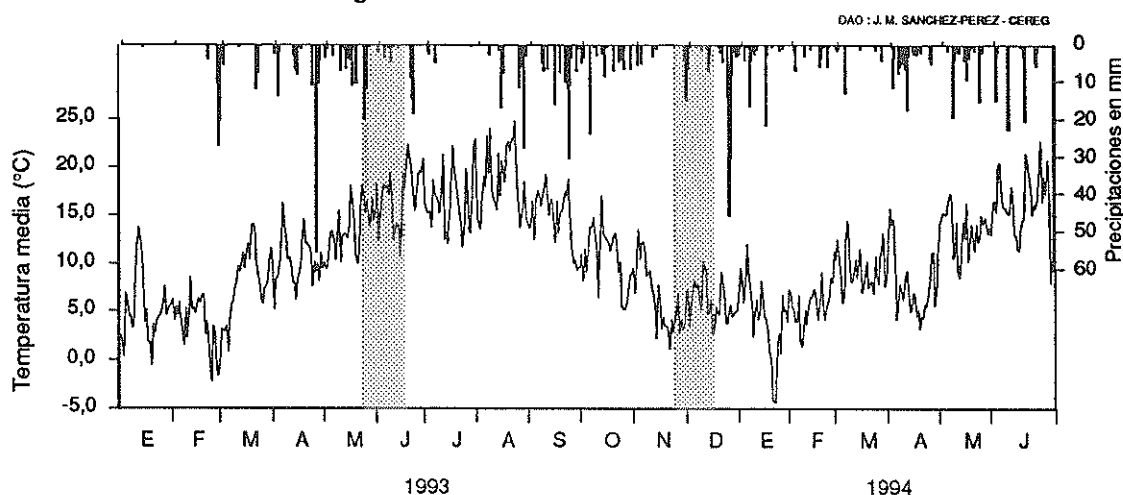


Figura 4. Evolución de las temperaturas medias diarias y de las precipitaciones durante el periodo de estudio en la estación climática de Arkaute.

Durante los periodos de lluvia de fuerte intensidad los nitratos retenidos en el suelo son lavados hacia las aguas subterráneas (Figura 5). En éstas las concentraciones en nitratos disminuyen con las fuertes lluvias y aumentan con el lavado de los nitratos del suelo (por ejemplo durante los meses de Abril y Diciembre 1993; Figura 7). Las máximas concentraciones en nitratos en las soluciones del suelo se observan en los meses de verano-otoño con posterioridad al aporte de fertilizantes. Las concentraciones máximas se localizan en la parte más superficial del suelo (0 a 20 cm); en esta zona las concentraciones aumentan de 58 mg.l⁻¹ antes a 314 mg.l⁻¹ después de la fertilización.

Las concentraciones en nitratos en la zona cultivada son mucho mayores que las de la zona no cultivada. En Arkaute el volumen de nitratos retenidos en el suelo en Marzo 1993 es del orden de 460 kg.ha⁻¹, mientras que en la zona no fertilizada el contenido es de 89 kg.ha⁻¹. El muestreo realizado en Junio 1993, después de un episodio de fuertes lluvias, es similar en las dos zonas, 14 kg.ha⁻¹ en Arkaute y 12 kg.ha⁻¹ en Jungitu.

En Arkaute el volumen de nitratos retenidos en los primeros 80 cm del suelo pasa de 460 kg.ha⁻¹ en Marzo 1993 a 173 kg.ha⁻¹ en el mes de Mayo para disminuir progresivamente hasta un volumen de 14 kg.ha⁻¹ en el

mes de Junio, lo que implica un lavado de $445 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 6). La disminución de las reservas en el suelo puede explicarse por el lavado de las soluciones del suelo a partir de las precipitaciones en forma de nieve de principios del mes de Marzo y de las lluvias de fuerte intensidad que tuvieron lugar en el mes de Abril.

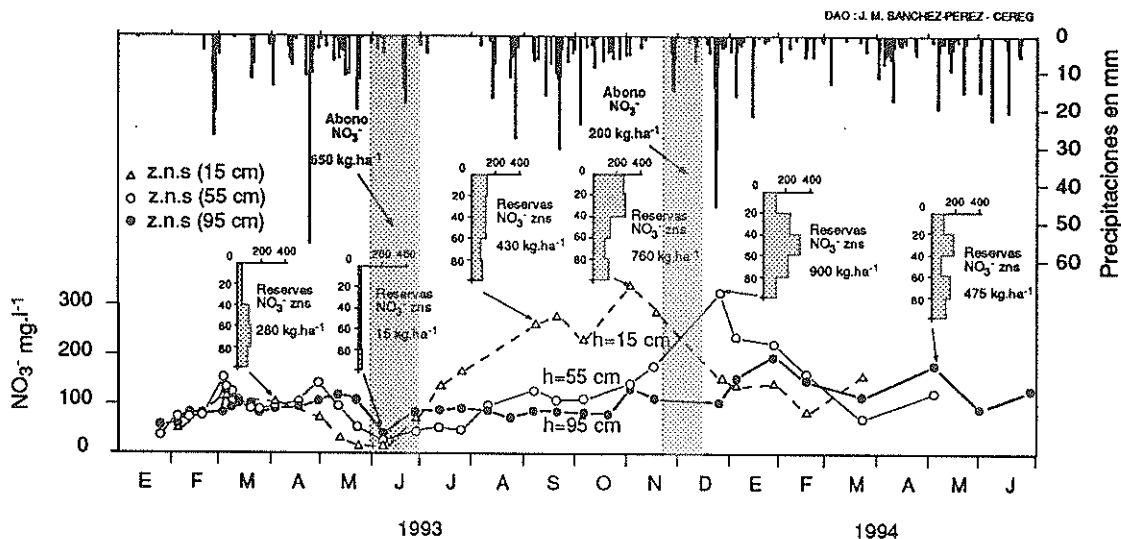


Figura 5. Evolución de las concentraciones en nitratos en la zona no saturada (a 15, 55 y 95 cm de profundidad) en la parcela experimental de Arkaute. Volúmenes de nitratos en los 80 primeros cm del suelo.

En el sector de Jungitu la evolución de las reservas de nitratos del suelo (Figura 6) muestra una evolución similar, caracterizada por una disminución continua del volumen de nitratos. El volumen de nitratos acumulados en el suelo pasa de $89 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en Marzo 1993 a $24 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en Mayo para alcanzar solamente $12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Junio. El volumen de nitratos lavados en este sector representa $76 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (17% del volumen lavado en el sector agrícola).

Los aportes en nitratos a partir de la lluvia durante este periodo son pequeños si los comparamos con las concentraciones en el suelo de la zona agrícola (Figura 6). El volumen máximo aportado durante el periodo Abril 1993 a Abril 1994 es de $14,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ frente a los $280 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ presentes en el suelo en el mes de Abril 1993. En cambio, en el sector no agrícola los aportes de nitratos durante el mismo periodo son mayores que las reservas del suelo. Estos representan $28,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ frente a los $15 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ presentes en el suelo en Abril 1993.

Con el objeto de reducir la influencia de la zona saturada sobre las reservas en nitratos hemos limitado nuestros cálculos a los primeros 80 cm del suelo, lo que aporta datos más próximos a la realidad. Aunque los ascensos del nivel freático pueden contaminar la solución intersticial del suelo, su importancia es pequeña si la comparamos con los aportes de origen agrícola. Las concentraciones medias en nitratos del agua de la zona

saturada presentan valores muy similares en las dos zonas: 136 mg.l⁻¹ (periodo Enero 1993 a Junio 1994) en el sector de Jungitu y 158 mg.l⁻¹ en el sector de Arkaute (zona cultivada).

Por otro lado el nivel piezométrico se encuentra situado en las dos zonas a una profundidad media muy parecida (100 - 120 cm del suelo), y con similares fluctuaciones. No obstante, las concentraciones en nitratos de la zona no saturada son mucho mayores en el sector agrícola. El efecto de la contaminación de las soluciones del suelo por ascenso del nivel freático no puede, por tanto, ser el único causante de la contaminación de la zona no saturada en el caso del sector agrícola. En la zona no cultivada, el aumento de las concentraciones en nitratos de la zona no saturada puede explicarse como el resultado de la contaminación por ascenso del nivel freático y del aporte de nitratos de origen atmosférico.

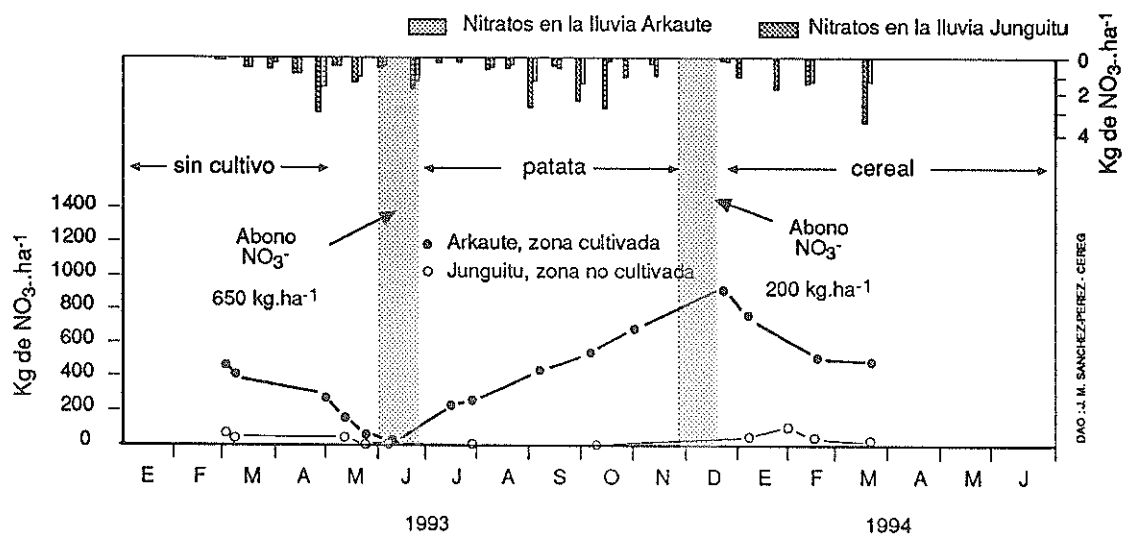


Figura 6. Evolución de las reservas de nitratos en el suelo en relación con el régimen de lluvias y el uso del suelo en las parcelas de Arkaute y Jungitu.

Condiciones hidrogeológicas

Si comparamos la evolución de las concentraciones en nitratos en el suelo (Figura 5) con las de la zona saturada (Figura 7) podemos observar que la relación causa-efecto entre lavado del suelo y contaminación del acuífero no es del todo evidente. En los primeros meses del estudio (Enero-Febrero 1993) las concentraciones de las aguas subterráneas presentan un aumento importante, llegando a alcanzar los 260 mg.l⁻¹. A finales de Febrero un episodio de nieves produce una fuerte disminución de las concentraciones en la zona saturada, posiblemente como resultado de un fenómeno de dilución. En el suelo las concentraciones en nitratos en la solución intersticial presentan en ese mes un ligero aumento, que puede asociarse con el incremento de las concentraciones en la zona saturada,

posiblemente como consecuencia de la contaminación a partir del ascenso del nivel freático.

Un episodio lluvioso de fuerte intensidad en el mes de Abril provoca una nueva disminución de las concentraciones de la zona saturada seguida por un ligero aumento de su concentración que puede atribuirse en parte al lavado de la zona no saturada. El efecto del lavado de los nitratos del suelo durante el mes de Mayo no se observa claramente en las concentraciones en nitratos de la zona saturada. El aumento de las concentraciones en nitratos en las soluciones del suelo durante el mes de Julio resulta de la aplicación del abonado previo al cultivo de la patata. Durante este periodo las concentraciones en nitratos de las aguas subterráneas muestran un aumento similar. El efecto del abonado de Diciembre 1993 no está asociado a un aumento de las contaminación en las aguas subterráneas.

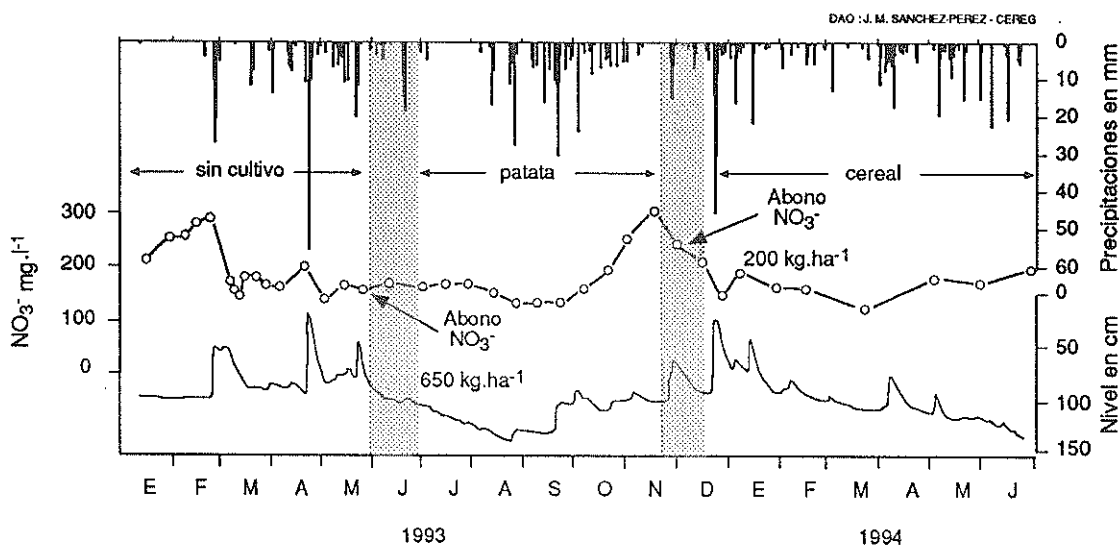


Figura 7. Evolución de las concentraciones en nitratos en las aguas subterráneas de la parcela de Arkaute en relación con la fluctuación de niveles, el régimen de precipitaciones y las prácticas agrícolas.

Las relaciones causa-efecto entre contaminación de las aguas subterráneas y aporte de nitratos no pueden precisarse completamente en base a los datos de la parcela. En efecto, las concentraciones en nitratos en la zona saturada resultan de un efecto a nivel regional, de manera que la contaminación de las aguas subterráneas en un pozo refleja los aportes de nitratos en una amplia zona aguas arriba del mismo. Esto puede explicar que el abono del mes de Diciembre, no generalizable al conjunto de la zona, no conlleve un aumento de la contaminación de las aguas subterráneas. Además las fuertes lluvias del mes de Diciembre pueden haber producido una fuerte dilución de la contaminación.

Conclusiones

En un trabajo anterior relativo a los seis primeros meses de estudio (Sánchez-Pérez *et al.*, 1994) se puso de manifiesto la influencia del lavado de nitratos del suelo en relación con el funcionamiento hidrogeológico del acuífero. Así, se preveía que durante los meses de Octubre a Diciembre el efecto del lavado de los suelos se reflejaría en un aumento de la contaminación de la zona saturada. Las previsiones han sido confirmadas en este trabajo: el ritmo de abonados y la repartición de las precipitaciones condicionan la evolución de la contaminación de las aguas subterráneas.

El lavado de los nitratos del suelo está directamente relacionado con los aportes atmosféricos, los aportes de nitratos mediante abonos y con las reservas existentes en la zona no saturada. Los episodios de lluvias producen un lavado de los abonos y en consecuencia de los nitratos del suelo produciendo la contaminación de las aguas subterráneas. Los resultados obtenidos en este trabajo pueden generalizarse a toda la zona cultivada de la llanada alavesa.

La contaminación de las aguas subterráneas por compuestos nitrogenados de origen agrícola es evidente en las zonas con un fuerte aporte de fertilizantes. El seguimiento de las concentraciones en nitratos de las soluciones del suelo es un buen método para el control de la contaminación de las aguas subterráneas.

Dado el nivel de contaminación por compuestos nitrogenados de las aguas subterráneas de esta zona sería posible utilizar éstas como agua de riego sin aplicar ningún fertilizante. En estas condiciones el uso de abonos con un menor porcentaje de nitrógeno sería conveniente. Con el uso de las dosis actualmente utilizadas podemos prever un aumento regular de la contaminación del orden de $25 \text{ mg.l}^{-1}.\text{año}^{-1}$.

En este trabajo hemos puesto de manifiesto cómo el estudio de la evolución de las concentraciones en nitratos de las soluciones del suelo en medio no saturado permite establecer un balance de exportación de contaminantes hacia la zona saturada.

El lavado de la zona no saturada por medio de la lluvia o de los riegos está directamente relacionado con el lavado del suelo, si bien su importancia es función de las cantidades de agua aportadas. No obstante, las relaciones causa-efecto entre lavado del suelo y contaminación de las aguas subterráneas no pueden precisarse a nivel de la parcela sin un conocimiento de las prácticas agrícolas a nivel regional o local.

Agradecimientos

Agradecemos la contribución de R. Echeandia (Propietario de la parcela de Jungitu) y al personal de la Granja Experimental para la Mejora de la Patata de Arkaute.

Referencias

- ANDERSEN, L.J. & KRISTIANSEN, H. (1984). Nitrate in groundwater and surface water related to land use in the Karup basin, Denmark. *Environm. Geology*, 5(4), 207-212.
- ARRATE, I. (1994). Estudio hidrogeológico del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (Araba, País Vasco). *Tesis de Doctorado*, Universidad del País Vasco. 251 p.
- ARRATE, I., MORELL, I. y ANTIGUEDAD, I. (1992). La contaminación por nitratos en el Acuífero Cuaternario de Vitoria-Gasteiz. Distribución espacial y evolución temporal. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. Vol. XVI, 113-127.
- ARRATE, I., ANTIGUEDAD, I., IRIBAR, V. & SANCHEZ-PEREZ, J.M. (1993). Problems related to management of the water resources in the Quaternary Aquifer of Vitoria-Gasteiz (Basque Country). *Memoires of International Conference on Environmental Pollution (ICEP2)*, vol. 1, 95-103. Barcelona.
- ARRATE, I., SANCHEZ-PEREZ, J.M., ANTIGUEDAD, I., y IRIBAR, V. (1994). Problemas de contaminación del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (Araba, País Vasco). Influencia de la gestión de los recursos hídricos y de las prácticas agrícolas. *Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas*, T.1, 323-338. Alcala.
- ARRATE, I., SANCHEZ-PEREZ, J.M., ANTIGUEDAD, I., y IRIBAR, V. (1995). Hidrogeoquímica del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (Araba, País Vasco). Influencia de la gestión de los recursos hídricos y de las prácticas agrícolas. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, en prensa. Sevilla.
- BERNHARD, C., CARBIENER, R., CLOOTS, A.R., FROELICHER, R., SCHENCK, CH. & ZILLIOX, L. (1992). Nitrate pollution of groundwater in the alsatian plain (France). A multidisciplinary study of an agricultural area: the central ried of the Ill river. *Environ. Geol. Water. Sci.*, 20(2), 125-137.
- GUSTAFSON, A. (1983). Leaching of nitrates from arable land into groundwater in Sweden. *Environmental Geology*, 5(2), 65-71.
- GUIMERA, J. (1993). Metodología de estudio de la contaminación de acuíferos por nitratos. Aplicación al acuífero del Maresme. En: L. Candela y M. Varela (eds), *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: métodos, medición y modelos*, pp. 197-219, Ed. CIMNE (Barcelona).
- RITTER, W.F., CHIRNSIDE, A.E.M., & SCARBOUGH, R.H. (1990). Soil nitrate profile under irrigation on coastal plain soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116 (6), 738-750.
- SÁNCHEZ-PÉREZ, J.M., ANTIGUEDAD, I., ARRATE, I., RUIZ, M. Y MORELL, I. (1994). La zona no saturada y la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas en el acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (País Vasco). En: I. Morell Evangelista (Ed): *Investigación en zona no saturada*. Col.lecció Summa. Ciènces experimentales. 53-66. Universitat Jaume I, Castelló.
- SÁNCHEZ-PÉREZ, J.M Y MORELL, I. (1994). Precauciones de uso de tomamuestras de succión equipados con cerámicas porosas. En: I. Morell Evangelista (Ed): *Investigación en zona no saturada*. Col.lecció Summa. Ciènces experimentales. 9-16. Universitat Jaume I, Castelló.
- SANCHIS, E.J. (1991). Estudio de la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas de la provincia de Valencia. Ed. Graficuatre, 340 p.
- RAMOS, C. y VARELA, M. (1993). Lixiviación de nitratos en dos parcelas experimentales en regadío de Valencia. En: L. Candela y M. Varela (eds), *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: métodos, medición y modelos*. 183-197, Ed. CIMNE (Barcelona).

