

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN SISTEMAS FISURADOS

Jorge Montaña XAVIER¹
Ernani Francisco da ROSA FILHO²
Eduardo Chemas HINDI²

RESUMEN

Se ha desarrollado un método de evaluación de la vulnerabilidad en acuíferos fisurados que consiste en la identificación en la zona no saturada de los "amortiguadores" químicos y físicos más importantes en el retardo del pasaje de contaminantes no conservativos.

Los primeros están relacionados con los valores de intercambio catiónico, resultantes principalmente de la presencia de materia orgánica y arcilla, componentes de los horizontes A y B de los suelos. Estos intercambiadores son capaces de retener e intercambiar elementos potencialmente contaminantes.

Los físicos están condicionados a los valores bajos de K_v (conductividad hidráulica vertical) que retardan el traslado vertical de sustancias, generando un tiempo de transferencia alto.

Palabras clave: vulnerabilidad, acuífero fisurado, amortiguación de contaminantes

ABSTRACT

A new method to evaluate vulnerability of fractured aquifers has been developed. It consists in the identification of the most important chemical and physical buffers for retardation of the non-conservative contaminants pathway in the unsaturated zone.

The chemical buffers are related to ion exchange values resulting from the presence of organic matter and clay, which are, both of them, components of the A and B soil's horizons. These buffers are capable of maintaining and exchanging elements potentially contaminant.

The physical buffers are conditioned by low values of K_v (vertical hydraulic conductivity) that retard the vertical movement of substances generating high transference time and minimizing the effects of degradable contaminants.

Keywords : Vulnerability, fractured aquifers, amortiguation of the contaminants

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de los acuíferos fisurados a nivel mundial radica principalmente en su gran extensión y la intensa actividad antrópica que se desarrolla en su ámbito.

En la mayor parte de la superficie terrestre afloran rocas ígneas y/o metamórficas, o se encuentran cerca de la superficie, bajo una delgada capa de depósitos superficiales. Podemos identificar las siguientes zonas: Canadá, NE y NW de EUA, Altiplano de la Guayana, Noreste de Europa (Escandinavia y Rusia), Asia (Siberia, Península Arábiga, India, Sri Lanka), Sudeste de Asia (Korea y China), Región del Pacífico (Australia) y zonas del E, W y centro de África.

La protección natural de estos acuíferos no existe o está constituida por una cobertura de poco espesor determinando zonas con alta susceptibilidad frente a la actividad de los contaminantes. Si a este panorama le sumamos que en grandes extensiones de estas placas precámbricas existe un importante desarrollo poblacional como por ej: 40 millones de habitantes en Latinoamérica, 70 millones en África y cientos de millones en Asia, se genera una situación de gran peligro a la degradación de los recursos hídricos fisurados a nivel mundial.

Además, parte de estos dominios geológicos se encuentran en regiones calificadas como las menos desarrolladas del mundo, con menores niveles desarrollo tecnológico y precaria o nula

¹ Universidad de la República – Facultad de Ciencias – INGEPA (Uruguay)

² Universidad Federal do Paraná – Departamento de Geología (Brasil)

planificación y protección de los recursos hídricos subterráneos.

En este marco una de las discusiones que se presenta a menudo en la implementación de los estudios sobre vulnerabilidad de acuíferos es la determinación de los parámetros que influyen en los procesos de contaminación y amortiguación natural. Es reconocida la complejidad geológica e hidrogeológica que presentan los sistemas discontinuos, por ello es que abrimos una discusión a partir de esta propuesta metodológica de estudio de vulnerabilidad de sistemas fisurados.

Los estudios sobre Vulnerabilidad de sistemas fisurados pueden enfocarse sobre dos ámbitos principales:

- A) Geometría del sistema fisurado
- B) Zona no saturada

Cada región geológica ha sufrido una serie de esfuerzos con generación de fracturas asociadas que componen la historia tectónica del lugar. En hidrogeología los eventos tectónicos que tienen importancia son los que generan fracturas abiertas, potenciales portadoras de agua subterránea.

A su vez en cada región se generará un tipo de fracturación diferente en función del tipo de roca y del tipo de esfuerzo o esfuerzos tectónicos que la afecten, determinando así las dimensiones e interconexión de fracturas, la porosidad de fractura, etc.

En este marco vamos a definir como Sistema Acuífero Fisurado (SAF) a cada región geológica afectada por una misma "historia tectónica", generando un mismo padrón de fracturación abierta o portadora de agua.

Denominamos Unidades de Acuíferos Fisurados (UAF) a las áreas de fracturación que se pueden individualizar por presentan continuidad hidráulica dentro del contexto del SAF. Estas unidades poseen un comportamiento asimilable al de "mallas" interconectadas (Larsson, 1985). En ellas los niveles hidráulicos tienen vinculación y soportan el trazado de líneas equipotenciales. O sea que la sumatoria de Unidades de Acuíferos Fisurados formarán el SAF.

2. GEOMETRÍA DEL SISTEMA FISURADO (SAF)

Uno de los conceptos que mayor dificultad presenta en los estudios de los Sistemas de Acuíferos Fisurados (SAF) es la definición de su geometría. En este sentido en un ámbito de fracturación es tremendamente difícil por medios directos e indirectos poder establecer las dimensiones de la fracturación intercomunicada que constituye la geometría del SAF.

Como parte de la metodología de estudio se propone considerar dos situaciones: zonas sin antecedentes de pozos y zonas con antecedentes.

Cuadro 1. Geometría del acuífero – Metodología de estudio

GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO				
AREAS SIN ANTECEDENTES DE POZOS	Extensión superficial precisa y subsuperficial aproximada	Estudios Directos	<i>Tectónicos</i>	Extensión superficial de la fracturación
		Estudios Indirectos	<i>Geofísicos</i>	Profundidad de Fracturación
AREAS CON ANTECEDENTES DE POZOS	Extensión superficial y subsuperficial precisas	Estudios Directos	<i>Tectónicos</i>	Extensión superficial de la fracturación
			<i>Hidrogeológicos</i>	Profundidad de fracturación
		Estudios Indirectos		<i>Geofísicos</i>
				Profundidad de Fracturación

2.1. Zonas sin antecedentes de pozos:

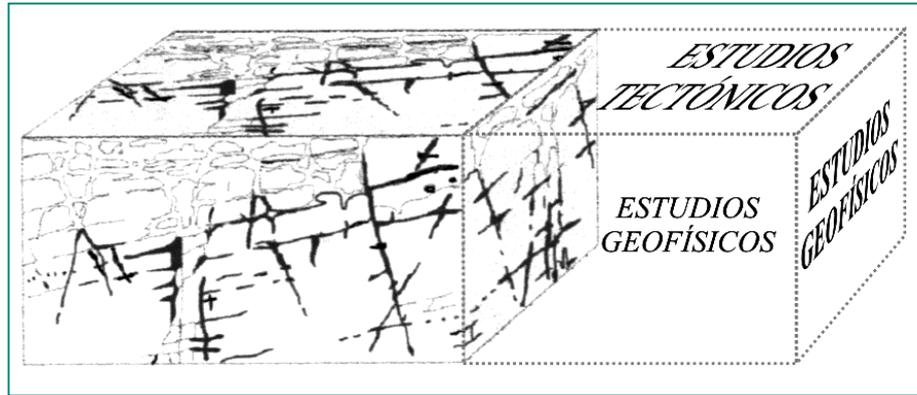
Geometría de la zona de Fracturación

Para los casos dónde no existen datos directos del SAF como antecedentes de pozos o manantiales, solamente se puede tener un

conocimiento aproximado del sistema, siendo posible identificar áreas con fracturas "abiertas" que potencialmente pueden ser portadoras de agua, mediante:

- a. **Estudios directos:** Tectónicos: a partir de fotointerpretación es posible delimitar zonas de fracturación y analizar sus dimensiones y carácter compresivo o distensivo. Posteriormente se comprueban en el campo los resultados de la fotointerpretación para lograr finalmente la delimitación superficial del área de fracturación.

Figura 1. Geometría del SAF – Estudios directos e indirectos.



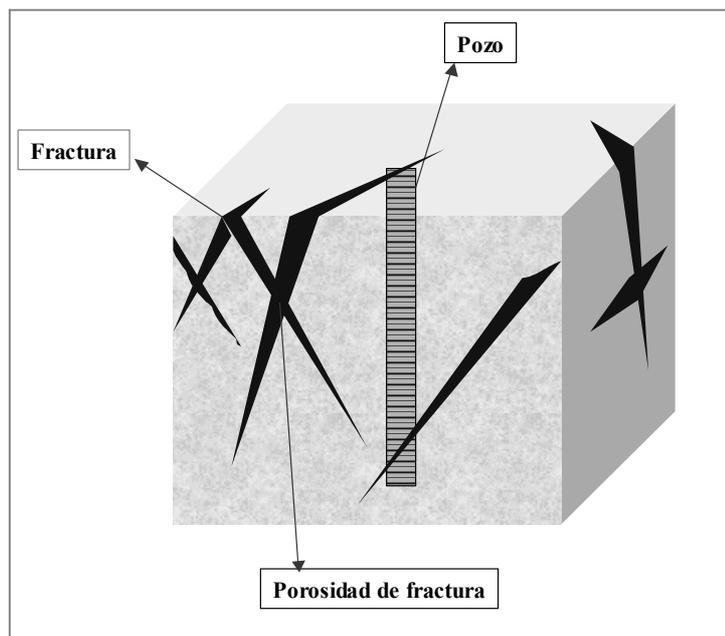
- b. **Estudios Indirectos:** A partir de la aplicación de estudios geofísicos como ser VLF o estudios geoelectrónicos, se logra información sobre profundidad y forma de la fracturación. Los resultados de estos trabajos determinarán zonas de fracturación potencialmente portadoras de aguas subterráneas, con dimensiones precisas en la horizontal y aproximadas en la vertical, con lo cual se podrá establecer a grandes rasgos la geometría del SAF.

Como primer paso se desarrollan los estudios directos e indirectos aplicados en el caso de zonas sin antecedentes.

La presencia de pozos en acuíferos fisurados produce una perturbación en el sistema mucho más importante que en los sistemas porosos. Esto es debido principalmente a que los pozos en los SAF además de funcionar como una captación hidráulica conectan estructuras (fracturas, fallas), portadoras de agua con potenciales hidráulicos diferentes, esta situación es frecuente en medios discontinuos y por ello aún sin bombeo, puede existir circulación vertical dentro del pozo (Figura 2).

2.2. Zonas con antecedentes de pozos

Figura 2. Conductor Hidráulico. Esquema.



El sistema de pozo- bloque- fracturas se denomina **conductor hidráulico** (Gustafson y Krasny, 1994). A medida que aumenta la densidad de pozos aumenta el área de interconexión del sistema, ampliando su extensión. O sea que las dimensiones del sistema pueden variar al integrarse nuevos pozos que conecten diferentes fracturas tanto en sentido vertical como horizontal. En estos casos donde existe información de pozos y afloramiento de agua, la geometría del acuífero se puede determinar o calcular a partir del desarrollo de la siguiente metodología:

3. GEOMETRÍA DE LAS UNIDADES DEL SAF

3.1. Profundidad de fracturación

En general este dato se obtiene de la descripción geológica del pozo, realizada durante ejecución de la perforación. Cuando no se cuenta con dicha descripción, mediante la utilización de medidores de diámetro o "caliper" se puede identificar la posición de las zonas fracturadas.

3.2. Capacidad de almacenamiento

Este factor es importante dado que determina

la mayor o menor posibilidad de dilución de un contaminante en un SAF: a mayor almacenamiento de agua mayor poder de dilución. Depende de los siguientes factores:

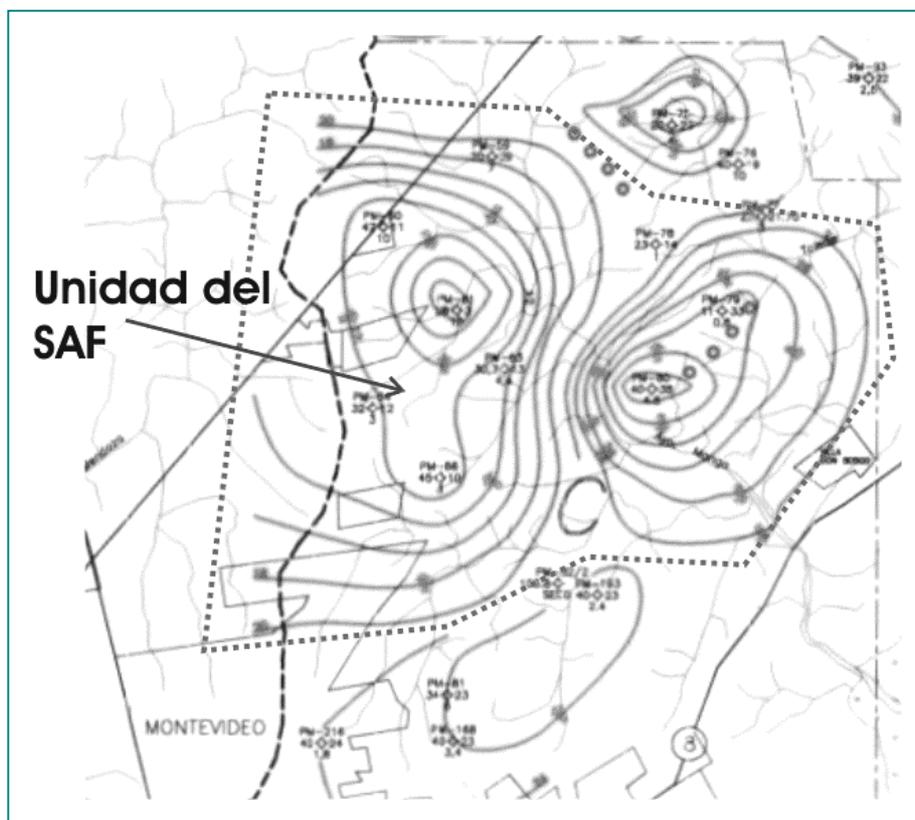
- Tipo y tamaño de la fractura
- Interconexión de fracturas
- Tipo de roca donde se produce la fracturación
- Porosidad de fractura
- Número de eventos tectónicos sufridos por la roca

3.3. Determinación de los límites de las unidades del SAF

Los sistemas de acuíferos fisurados presentan, como se ha visto, una gran variación en función principalmente del tipo de roca que constituye el subsuelo y factores tectónicos que afectaron el área.

Las zonas acuíferas estarían representadas por las que constituyen las Unidades del SAF, áreas que efectivamente se debería conservar y proteger dentro de los ámbitos de rocas duras, dejando de considerar las áreas no fracturadas. Representan zonas con interconexión de fracturas cuyos límites serían contornos del mapa potenciométrico (Figura 3).

Figura 3. Unidad del SAF - Mapa potenciométrico Cuenca A° Carrasco, Uruguay



Una vez que se identifiquen los límites superficiales a partir de los mapas potenciométricos se le sumarán los datos de

profundidad de fracturación, para establecer una primera aproximación de la geometría de cada unidad del SAF. La sumatoria de cada unidad

(UAF) constituirá el SAF, y solamente sobre estas unidades se realizarán los estudios de vulnerabilidad.

4. ZONA NO SATURADA

La zona no saturada comprende desde la superficie del suelo hasta el nivel saturado o

comienzo del acuífero. Por las diferencias en el comportamiento físico y químico de las diferentes zonas y su papel de amortiguador frente al pasaje de los contaminantes se detalla sus características principales y su incidencia en la vulnerabilidad del sistema.

Cuadro 2. Zona no saturada – Parámetros necesarios

ZONA NO SATURADA	PARAMETROS NECESARIOS
Amortiguación Química	<i>CIC</i>
Amortiguación Física	<i>Kv</i>
	<i>Tiempo de tránsito</i>

4.1. Suelo

Es uno de los principales factores que regulan el grado de vulnerabilidad de los acuíferos, debido a la función que cumplen en la amortiguación física, química y biológica, principalmente frente a la contaminación difusa debida a prácticas agrícolas.

El suelo o franja edáfica constituye generalmente la sección superior de la zona subsaturada o no saturada. Sus características físicas y químicas le imponen cierta actividad protectora frente a la llegada de un contaminante, la que denominamos amortiguación, que puede ser de tipo física o química.

4.1.1. Zona Edáfica

Constituye la capa órgano-mineral comprendida desde la superficie hasta la roca madre y merece especial atención por representar la primera y más importante defensa natural contra la contaminación de las aguas subterráneas. El flujo de agua en el suelo es normalmente lento, restringiéndose a los poros más pequeños con mayor superficie específica. La condición química es normalmente aeróbica y frecuentemente alcalina.

Las principales acciones "amortiguadoras" a la acción de contaminantes en la zona no saturada son:

- Intercepción, sorción y eliminación de bacterias y virus.
- Atenuación de metales pesados y otros componentes químicos inorgánicos a través de precipitación como carbonatos, sulfuros o hidróxidos, sorción o intercambio de cationes, o fijación por la materia orgánica carbonosa.
- Sorción y biodegradación de muchos hidrocarburos y compuestos orgánicos sintéticos.

- Horizontes de suelo con baja permeabilidad como por ejemplo los B2T, que limitan el flujo descendente.

Los procesos citados dependen del comportamiento estructural, geométrico, químico y biológico de los suelos; por ello a continuación se describirán en forma detallada las características principales de los mismos.

4.1.2. Los suelos y su potencial de amortiguación química

Como parte del análisis de vulnerabilidad, se debe analizar los suelos con el fin de establecer las propiedades relacionadas con la amortiguación química y física al pasaje de contaminantes hacia los acuíferos.

El suelo constituye un poderoso medio de depuración natural y de reciclaje de las aguas del cual es necesario conocer su comportamiento y sus límites. Los procesos de depuración natural más activos se producen en las dos primeras capas, (horizontes A y B, principalmente en el primero), constituyendo una alternativa valiosa respecto de las técnicas en depuración artificial.

4.2. Amortiguación química

Gracias a las propiedades de **adsorción e intercambio** debidas a la presencia de coloides minerales y orgánicos, el suelo puede retener un gran número de sustancias muy diversas en cuanto a su tamaño y propiedades. El origen de las posiciones de intercambio se genera a partir de la superficie específica de la fracción arcilla, particularmente de la materia orgánica, además de otros componentes que difieren químicamente y por lo tanto en las propiedades de sus superficies.

Entre los constituyentes activos como intercambiadores de los suelos, se pueden citar: **arcillas cristalizadas; óxidos e hidróxidos**

relativamente bien cristalizados y sus geles generalmente amorfos; y materia orgánica. Todos tienen propiedades de adsorción más o menos importantes (0,05 a 1,5 mol/Kg para las arcillas según su tipo, 2 a 3 mol/Kg para la materia orgánica). En forma específica las posiciones de intercambio de los coloides

minerales se originan a partir de un desequilibrio de cargas en las estructuras de los mismos. Seguidamente se resume el trabajo de Black 1967 donde se establecen las capacidades de intercambio catiónico (C.I.C) de los componentes más comunes del suelo.

Cuadro 3. CIC para los componentes más comunes del suelo

ELEMENTOS		C.I.C. (meq/100g)
Arcillas 1:1	Caolinita	3-15
	Halloysita	5-10
Arcillas 2:1	Illita	10-40
	Clorita	10-40
	Montmorillonita	80-150
	Vermiculita	100-150
Aluminosilicatos amorfos	Alofán	70-100
	Materia orgánica	110-200

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que los suelos con mayor capacidad para retener iones son los que presentan mayor proporción en materia orgánica y arcillas 2:1.

Este será uno de los factores utilizados para calificar a la Vulnerabilidad.

4.2.1. Amortiguación Química de los Suelos

La capacidad de intercambio de los suelos funciona como un factor de retención química, constituyendo la Amortiguación Química de los Suelos; por lo tanto se la tomará como elemento esencial de retención de posibles poluentes.

Como fue dicho anteriormente la C.I.C. aumenta en los horizontes con abundante materia orgánica y arcillas, el espesor de estos horizontes también incide en la CIC pues controla la cantidad de intercambiadores químicos disponibles.

A modo de ejemplo se presentan en el siguiente cuadro las CIC de diferentes suelos de la cuenca del Arroyo Carrasco, en Uruguay:

Cuadro 4. CIC en suelos (Cuenca del Arroyo Carrasco, Uruguay)

SUELO	Horizonte	Color (1)	Clase (2)	C.I.C. a pH 7 (meq/100g)
Brunosol éútrico sobre basamento	A	Negro	F Ac	47.8
	B2T	Negro	Ac	53.4
Brunosol sobre limos o arcillas	A1-A3	Pardo osc. A negro	F Ac	21.3
	B21T	Pardo gris osc	Ac	36.4
Planosol	A1-A2	Pardo	Ar F	6.5
	B2T	Gris Moteado	Ac – Ar	22
Arenosol	A	Pardo	Ar	4

- (1) Color traducido de la tabla de Munsel
- (2) F = franco; Ac = arcilloso; Ar = arenoso; L = limoso

En el siguiente cuadro se presenta la calificación a la amortiguación química de los diferentes tipos de suelos de la cuenca

anteriormente mencionada, en función de sus capacidades de intercambio catiónico.

Cuadro 5. Amortiguación química de los suelos de la Cuenca del Arroyo Carrasco

SUELOS	C.I.C. (meq/100g)	AMORTIGUACIÓN QUÍMICA
Brunosoles	20-50	ALTA
Planosoles	6-22	MEDIA
Arenosoles	< 5	BAJA

De la tabla anterior se desprende que las zonas con suelos brunosoles contribuirían a una menor vulnerabilidad del sistema acuífero al ser potencialmente capaces de retener e intercambiar un mayor volumen de elementos químicos potencialmente poluentes. En consecuencia, con los valores de C.I.C. se determinaron tres categorías de amortiguación química:

Alta (C.I.C. entre 20 y 50 me/100g).

Media (entre 6 y 22 me/100g).

Baja (inferior a 5 me/ 100g).

4.3. Amortiguación física de los suelos

Otra propiedad importante que presentan los suelos son los niveles (iluviales) de acumulación de arcillas generalmente expansivas en el horizonte B, con su mayor expresión en los denominados horizontes texturales o B₂T por los agrónomos. Estos niveles cuando se encuentran en condiciones de humedad alta, se expanden y generan "barreras" de muy baja permeabilidad, limitando y muchas veces impidiendo el pasaje

de agua y por lo tanto de contaminantes hacia el subsuelo y convirtiéndose en amortiguadores físicos.

Para medir el efecto de estos amortiguadores se utiliza el tiempo de tránsito, que representa la duración del pasaje de un probable contaminante conservativo por la capa menos permeable del suelo. Este parámetro es importante por indicar la permanencia de un contaminante en un medio química y biológicamente muy activo, con una relación directa entre la degradación del mismo y su estancia en el suelo.

4.3.1. Tiempo de tránsito

Como parámetro cuantificable se elige el tiempo de tránsito cuyo valor se obtiene midiendo las velocidades de infiltración en los niveles de menor permeabilidad del suelo. A modo de ejemplo se presentan en el cuadro 4 los grados de vulnerabilidad en función del tiempo de transferencia en los suelos correspondientes a suelos de la cuenca del Arroyo Carrasco, Uruguay.

Cuadro 6. Grados de vulnerabilidad en función del tiempo de transferencia

SUELO	TIEMPO DE TRANSFERENCIA (meses)	VULNERABILIDAD
BRUNOSOL	2.4	BAJA
PLANOSOL	2.1	BAJA
ARENOSOL	3×10^{-3}	ALTA

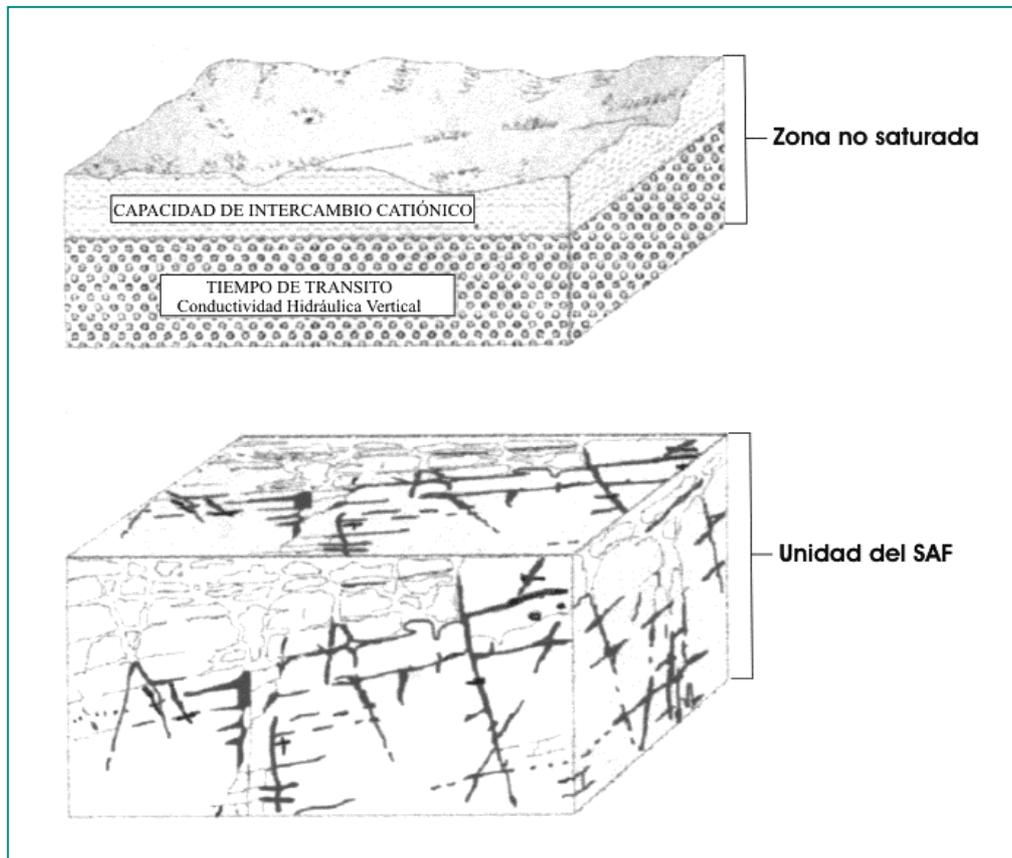
A partir de este método se concluye que existe un importante efecto de amortiguación física, química y biológica en los Brunosoles y Planosoles, lo que constituye zonas con mayor protección de los acuíferos. En los arenosoles la amortiguación es muy baja, representando áreas muy vulnerables frente a la contaminación.

4.4. Zona geológica no saturada

Es muy importante en la protección del

agua subterránea principalmente en regiones donde no existen suelos y también en las que los suelos están presentes porque refuerza la acción de amortiguación de estos. Cuando está compuesta por materiales de baja permeabilidad, se crea un cierto confinamiento protector de las aguas subterráneas. Los parámetros más importantes que caracterizan a esta zona son: espesor, litología y permeabilidad vertical (Kv).

Figura 4. Importancia de la zona no saturada. Esquema



4.4.1. Amortiguación Geológica

Cuadro 7. Sumatoria de Amortiguación Edafológica y Geológica

AMORTIGUACION EDAFOLOGICA	Q U I M I C A	C. I. C. (meq/g)		
		<i>BRUNOSOL</i>	<i>PLANOSOL</i>	<i>ARENOSOL</i>
		20 - 50	6 - 22	< 4
AMORTIGUACION		A L T A	M E D I A	B A J A

AMORTIGUACIÓN EDAFOLÓGICA	F I S I C A	TIEMPO DE TRANSFERENCIA (años)		
		<i>BRUNOSOL</i>	<i>PLANOSOL</i>	<i>ARENOSOL</i>
		104	117	< 1
AMORTIGUACION		A L T A	M E D I A	B A J A
COEFICIENTE		1	1	< 1

AMORTIGUACIÓN GEOLÓGICA	F I S I C A	TIEMPO DE TRANSFERENCIA (años)			
		<i>arcillas</i>	<i>limos arcillosos</i>	<i>arcillas</i>	<i>Basamento aflorante</i>
		<i>limos arcillosos</i>		<i>Basamento</i>	
		<i>Basamento</i>	<i>Basamento</i>	<i>Basamento</i>	
		56,06	54,79	1,26	0
AMORTIGUACION		A L T A	A L T A	M E D I A	N U L A
COEFICIENTE		1	1	0,5	0

5. RESULTADOS

La vulnerabilidad en este método se basa en la protección que ofrece la cobertura primitiva amortiguando la llegada de probables contaminantes al sistema hidrogeológico discontinuo.

En relación al basamento, como ya se señaló, lo que se considera son los sistemas discontinuos comprobados, descartándose los

sectores con baja o ausente densidad de fracturas.

De las cuantificaciones de amortiguaciones edafológicas y geológicas (química y física), representadas por los coeficientes de amortiguación, se determina la vulnerabilidad del sistema distinguiendo distintas zonas que se detallan en el cuadro siguiente:

Cuadro 8. Cálculo de la Vulnerabilidad

Suelo	BRUNOSOL				PLANOSOL				ARENOSOL			
Coef de amortiguación edafológica	1	1	1	1	1	1	1	1	< 1	< 1	< 1	< 1
Subsuelo	arcillas	limos arcillosos	arcillas	Bas Cris	arcillas	limos arcillosos	arcillas	Bas Cris	arcillas	limos arcillosos	arcillas	Bas Cris
	limos arcillosos				limos arcillosos				Bas Cris			
	Basamento Cristalino	Bas Cris	Bas Cris		Bas Cris	Bas Cris	Bas Cris		Bas Cris	Bas Cris	Bas Cris	
Coef. de amortiguación geológica	1	1	0,5	0	1	1	0,5	0	1	1	0,5	0
Amortiguación resultante	1	1	0,5	0	1	1	0,5	0	1	1	0,5	0
VULNERABILIDAD	BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA

Los resultados del cuadro en relación a la vulnerabilidad son:

- Basamento cristalino sin cobertura de suelo
- Si el basamento no tiene fracturación no es SAF y queda afuera del cuadro
- Si el basamento presenta fracturación constituye un SAF; son las zonas más vulnerables por no tener techo protector.
- Basamento cristalino con cobertura de suelo.
En estos casos las áreas más vulnerables son las que están compuestas por suelos con valores altos de conductividad hidráulica (arenosol) y baja C.I.C. La presencia de suelos con horizontes B2T o B muy arcillosos (brunosoles, planosoles) con conductividades bajas y alta CIC resultan en una vulnerabilidad media a baja.
- Basamento cristalino con cobertura geológica y de suelos. La existencia de las formaciones geológicas y suelos asociados resultan en valores de vulnerabilidad media a baja dependiendo de los valores de conductividad hidráulica y espesores de cada formación.

5. CONCLUSIONES

- Los sistemas acuíferos fisurados son elementos altamente susceptibles a ser adversamente afectados por la actividad del

- hombre.
- La metodología de estudio sobre vulnerabilidad de un acuífero fisurado se fundamenta en la determinación de su geometría y de la amortiguación de la zona no saturada.
- En la geometría del acuífero se deben tener en cuenta aspectos geológicos como el tipo de roca, tectónicos, tipo de fracturación y porosidad de fractura, además de aspectos hidráulicos como el desarrollo de mapas potenciométricos, resultando en la identificación de diferentes unidades fisuradas (UAF) que en su conjunto, para una misma región, constituyen los Sistemas Acuíferos Fisurados (SAF).
- La zona no saturada (ZNS) funciona como amortiguador químico y físico al pasaje de contaminantes. La importancia de la amortiguación dependerá de su estructura y composición.
- La amortiguación química se determina a partir de los valores de C.I.C. (capacidad de intercambio catiónico) como elemento de retardo de contaminantes no conservativos.
- En la estructura de los suelos existe un estrato que tiene menor conductividad hidráulica generalmente coincidente con el horizonte B, el cual gobierna la velocidad de infiltración de todo el perfil, generando un

retardo en la llegada del contaminante. El valor elegido para establecer el grado de amortiguación física es el tiempo de transferencia.

dan una estimación de los valores de vulnerabilidad o sea del grado de protección natural de la zona no saturada que constituye el techo de la mayoría de los SAF.

7. Las amortiguaciones químicas y físicas nos

6. BIBLIOGRAFIA

- AUGE M. 1986: Hidrodinamic behavios of the Puelche acuífer in Matawza Riner Basin, Groundwater v.25, 636-642 Dublin, Ohio.
- BITTENCOURT, A.: "Hidroquímica", pp 23-53, en *Memória del 1° Curso Sul-Americano sobre Avaliacao e Vulnerabilidade de Aquíferos*, (4 a 22 de julio de 1994). Curitiba-FR, EFPR, Departamento de Geología, 1994.
- BLACK, 1967.: Propiedades físico - químicas de los suelos. Elseiver.
- DOS SANTOS OLIVIERA ANTONIO M., CORREA FILHO DIOGO 1981: "Esaios de Permeabilidade en Solos". Orientações para sua execução no campo. I.P.T. do Estado de S. Paulo.
- FOSTER, S & HIRATA, R. 1998: Groudwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. CEPIS. Tech. Report. (WHO-PAHO-CEPIS), Lima.
- GUSTAFSON Y KRÁSNÝ 1994: Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Applied Hydrogeology* 2 (2): 64-65.
- JUAREZ BADILLO E., A. RICO RODRIGUEZ 1990: "Mecánica de suelos" 3^a edición. Editorial Limusa, México. Tomo I- Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo III- Flujo de agua en suelos.
- LARSSON, I. 1985: Aguas Subterráneas en rocas duras. UNESCO.
- MONTAÑO, J.: "Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos Subterráneos", pp 95-166, en *Memória del 1° Curso Sul-Americano sobre Avaliacao e Vulnerabilidade de Aquíferos*, (4 a 22 de julio de 1994), Curitiba-PR, UFPR, Departamento de Geología, 1994.
- MONTAÑO, J. 1999: "Caracterización y Vulnerabilidad de Sistemas Hidrogeológicos Discontinuos. Cuenca del Arroyo Carrasco, Montevideo, Uruguay". Tesis Doctoral, ABAS, Argentina.
- OLIE F. J. y POS W. J. 1994: Ground Water Contamination Control from Land Fills using MICROFEM; Case Studies in the Netherlands and Poland. Paper a ser presentado en Praha, Mayo del 1995.