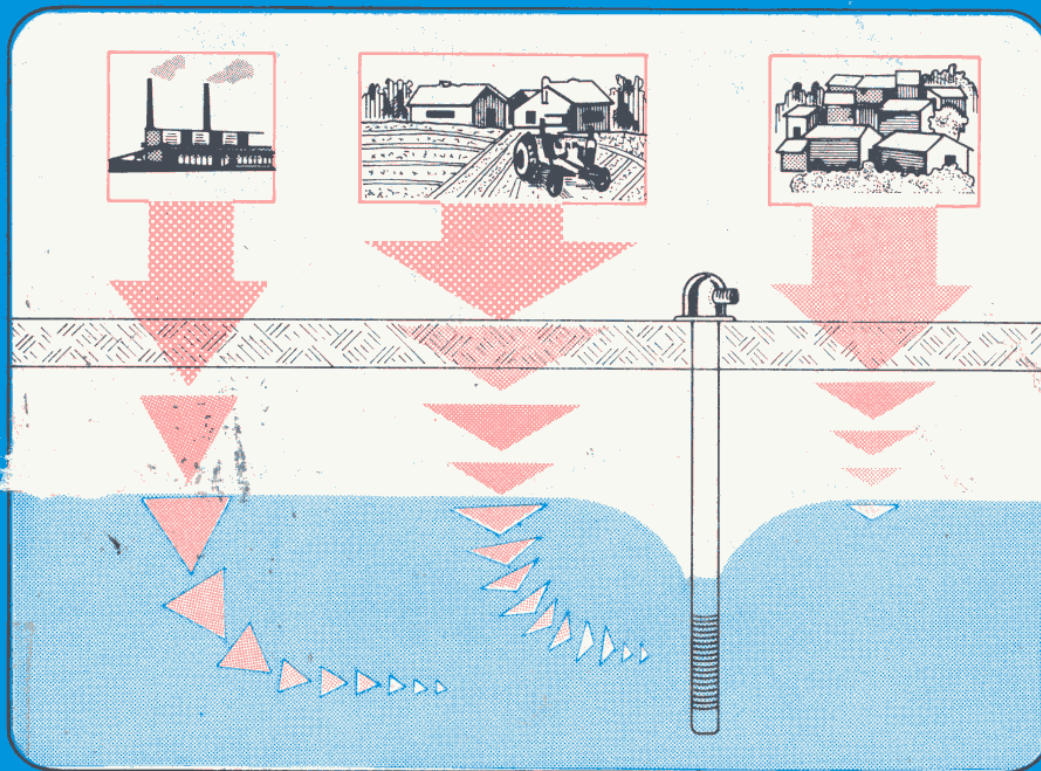




CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y
CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS)
Programa Regional de Prevención y Control de la Contaminación
de Aguas Subterráneas

DETERMINACION DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS



600
77
5053

una metodología basada en datos existentes



ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD
ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD
Programa de Salud Ambiental (HPE)



9600/F77/25053
48701

DETERMINACION DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE
AGUAS SUBTERRANEAS

una metodología basada en datos existentes

Dr. Ing. Stephen Foster
Asesor en Aguas Subterráneas, OPS-CEPIS

Ing. Geol. Ricardo Hirata
Ex-Profesional Joven Residente, CEPIS
Departamento de Agua e Energía Eléctrica, DAEE
Sao Paulo, Brasil

2da edición revisada
agosto 1991

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA
SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE
CEPIS

Lima, Perú

Organización Panamericana de la Salud
Organización Mundial de la Salud

Programa de Salud Ambiental (HPE)

CONTENIDO

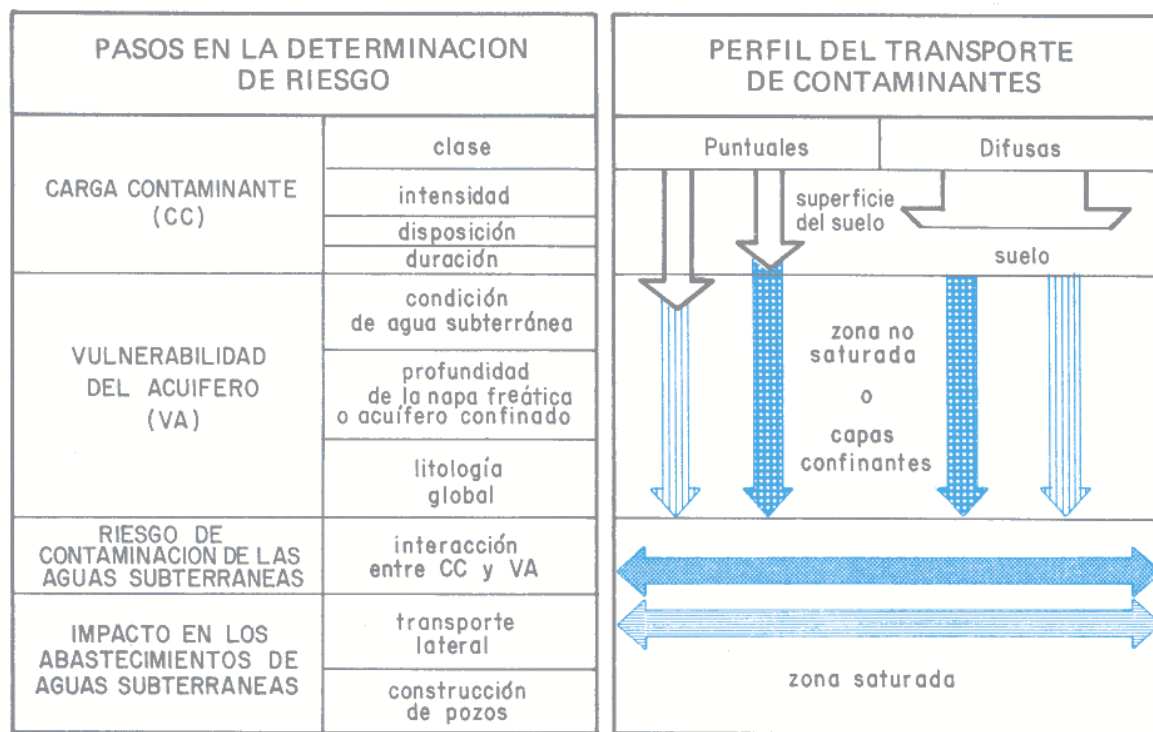
	<u>Página</u>
RESUMEN	
PREFACIO	
Importancia de las Aguas Subterráneas.....	v
Antecedentes del Programa Regional.....	vi
Alcance de la Metodología Desarrollada.....	vi
Agradecimientos.....	vii
1. EL RIESGO DE CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS.....	1
1.1 Comportamiento de Contaminantes en el Subsuelo.....	1
1.2 Concepto Fundamental del Riesgo de Contaminación.....	5
1.3 Importancia de la Zona No Saturada.....	7
1.4 Función de los Suelos.....	10
2. BASES ESTRUCTURALES PARA LA DETERMINACION DEL RIESGO.....	11
2.1 Estrategia y Determinación del Riesgo.....	11
2.2 Selección de la Zona y Escala de Estudio.....	14
2.3 Requerimientos de Personal.....	16
2.4 Adquisición de Datos Básicos.....	16
3. CARACTERIZACION DE LA CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO.....	18
3.1 Clasificación de Actividades Contaminantes.....	18
3.2 Requerimientos Optimos.....	18
3.3 Restricciones Prácticas.....	21
3.4 Determinación de Carga Contaminante de Fuentes Dispersas.	24
3.4.1 Areas Residenciales Urbanas.....	24
3.4.2 Uso Agrícola del Suelo.....	29
3.5 Determinación de Carga Contaminante de Fuentes Puntuales.	37
3.5.1 Actividad Industrial.....	37
3.5.2 Lagunas de Efluentes.....	43
3.5.3 Disposición de Residuos Sólidos.....	48
3.5.4 Aguas Superficiales Contaminadas.....	53
4. CARACTERIZACION DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO.....	57
4.1 Concepto de la Vulnerabilidad.....	57
4.2 Limitaciones Prácticas.....	57
4.3 Esquema de Clasificación.....	58
4.4 Índice de Vulnerabilidad.....	61

	<u>Página</u>
5. IMPLEMENTACION DE PROYECTOS DE RECONOCIMIENTO.....	65
5.1 Procedimientos Cartográficos.....	65
5.2 Evaluación Final del Riesgo.....	69
5.3 Implicancias para el Abastecimiento de Agua Subterránea.....	69
5.4 Estrategias de Protección.....	71
6. BIBLIOGRAFIA.....	72
7. ANEXO: Hojas de Inventario para el Reconocimiento de la Carga Contaminante al Subsuelo.....	76

RESUMEN

Se presenta una guía para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, basada en metodologías para la caracterización de vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación y de la carga contaminante al subsuelo. Se indica una clasificación de peligro potencial de las fuentes más comunes de contaminación puntual y difusa para su uso en estudios de amplia escala.

Este procedimiento es el primer paso en la evaluación sistemática del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. En muchos casos se requerirá de un seguimiento de investigación y monitoreo en el campo antes de que medidas prácticas para el control de la contaminación puedan ser definidas.



ADVERTENCIAS:

“una vulnerabilidad general a un contaminante universal en un típico panorama de contaminación es un concepto científicamente inválido”

“a la larga, todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes móviles y persistentes”

“los acuíferos menos vulnerables no son fácilmente contaminados, pero una vez contaminados son los más difíciles de restaurar”

TRANSPORTE DEL CONTAMINANTE

Atenuación	Dilución	clave
X	O	
O	O	
X	X	
O	X	

Figura 0

ESQUEMA CONCEPTUAL PARA LA DETERMINACION DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

RESUMEN

Se presenta una guía para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, basada en metodologías para la caracterización de vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación y de la carga contaminante al subsuelo. Se indica una clasificación de peligro potencial de las fuentes más comunes de contaminación puntual y difusa para su uso en estudios de amplia escala.

Este procedimiento es el primer paso en la evaluación sistemática del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. En muchos casos se requerirá de un seguimiento de investigación y monitoreo en el campo antes de que medidas prácticas para el control de la contaminación puedan ser definidas.

PREFACIO

Importancia de las Aguas Subterráneas

No existen datos completos acerca de la proporción de los abastecimientos de agua municipal y doméstica que proviene del recurso hídrico subterráneo. Tampoco existe información confiable sobre la proporción de todos los abastecimientos de agua, para cualquier propósito, derivados del recurso hídrico subterráneo. Así, para ilustrar el rol clave que juegan las aguas subterráneas en el abastecimiento de agua potable en América Latina y el Caribe, se tiene que recurrir a estimaciones cualitativas y ejemplos específicos.

Al menos, en tres grandes centros urbanos, las ciudades de México, Lima y La Habana, las aguas subterráneas suministran la mayor parte del abastecimiento de agua municipal, y en algunos otros, incluyendo Buenos Aires, Santiago de Chile, San José de Costa Rica, San Salvador, Managua, Santo Domingo y la ciudad de Guatemala, representan una importante proporción. El agua subterránea también está siendo amplia y mayormente explotada para abastecimiento de agua potable en áreas rurales, ya que es normalmente el recurso más barato y seguro. Por ejemplo, provee más del 90% del abastecimiento rural en Costa Rica, El Salvador y Guyana.

El normalmente bajo costo y la excelente calidad natural del agua subterránea, ha justificado su amplia utilización para abastecimientos públicos, aún en las regiones más húmedas. Por ejemplo, ha sido rápidamente explotada para el abastecimiento de agua municipal en San José de Costa Rica, Santo Domingo-Rep. Dominicana y Georgetown-Guyana, desde 1965. En el estado brasileño de Sao Paulo, 750 Ml/d de aguas subterráneas abastecen más de 500 ciudades. También es de gran importancia en muchas islas del Caribe, por ejemplo Barbados que es totalmente dependiente de las fuentes subterráneas que proveen 110 Ml/d. Debido a razones similares las aguas subterráneas han sido consideradas como la fuente más atractiva de abastecimiento de agua potable para innumerables pueblos a través de la Región.

En vista de la importancia de estos abastecimientos de agua, se podría pensar que la protección de acuíferos para prevenir el deterioro de la calidad del agua subterránea debería haber recibido ya una atención detallada, particularmente dentro y alrededor de grandes áreas urbanas. Sin embargo, por un sinnúmero de razones, no se le ha dado todavía mucha consideración en la Región de América Latina y el Caribe a la protección de los acuíferos. El flujo de agua subterránea y el transporte de contaminantes no son fáciles de observar ni medir. Ambos procesos son generalmente lentos. Es por esto que existe una amplia despreocupación acerca del riesgo de contaminación del agua subterránea, aún entre los administradores de recursos de agua y de suelo. Sin embargo, el asunto es de importancia práctica y directa por la escala y persistencia de muchos episodios de contaminación de agua subterránea, por su impacto en los abastecimientos de agua potable y por el costo excesivo o la impracticabilidad técnica de la rehabilitación de acuíferos.

Antecedentes del Programa Regional

El desarrollo de un Programa Regional de Control y Prevención de la Contaminación de Aguas Subterráneas es parte del plan a mediano plazo del CEPIS, adoptado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) para la Región de América Latina y el Caribe durante el período 1984-89.

Los elementos claves de este programa son:

- (a) Identificación de los principales problemas de contaminación de las aguas subterráneas que afectan su potabilidad.
- (b) Selección de instituciones con la responsabilidad y los recursos para aplicar un programa de control de la contaminación, y movilización de éstas a través del establecimiento de una red cooperativa con servicios de consultoría brindados por CEPIS.
- (c) Preparación y divulgación de manuales sobre la evaluación del riesgo de contaminación, e investigación de la calidad, de aguas subterráneas y sobre políticas de control apropiado para contexto regional.

La meta principal del Programa Regional es que para el año 1989 varios países de la Región hayan iniciado programas nacionales de control de contaminación de las aguas subterráneas, respaldados por procedimientos adecuados para la identificación del riesgo de contaminación y con políticas apropiadas para el control selectivo de la disposición de efluentes y las prácticas de uso del suelo.

Un reconocimiento técnico de los problemas de contaminación de aguas subterráneas que afronta la Región de América Latina y el Caribe ha sido recientemente publicado como producto del Programa Regional de Aguas Subterráneas de OPS-CEPIS (Foster et al, 1987).

Alcance de la Metodología Desarrollada

El informe presenta procedimientos que se consideran apropiados para la determinación del riesgo de la contaminación de aguas subterráneas en la Región de América Latina y el Caribe. A través del uso de esta guía, se espera brindar una consideración más sistemática de este riesgo. La metodología desarrollada se considera como un primer paso en la evaluación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Debería ser aplicada para establecer prioridades, pero no para sustituir la inspección y el monitoreo sistemático de campo. La metodología se refiere exclusivamente al riesgo de que el agua subterránea se contamine con concentraciones que excedan las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable, pero no al riesgo resultante para la salud humana.

Este informe enfoca el riesgo de contaminación del agua subterránea debido a la actividad del hombre. No se consideran otros importantes temas relacionados, tales como problemas de la calidad natural de aguas subterráneas, intrusión salina de acuíferos asociada con sobre-explotación, y reducción de la recarga del agua subterránea debido a la urbanización. El diseño de acabado sanitario de pozos y manantiales también está fuera del alcance de este trabajo.

El informe intenta servir como una guía para el planeamiento y ejecución de estudios sobre la vulnerabilidad de los acuíferos y el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Contiene mucha información sobre procesos hidrogeológicos y actividades contaminantes para la orientación general del usuario, no siendo necesarios todos éstos para el desarrollo de la metodología. Esta guía no es un manual con procedimientos establecidos, ya que simplemente no es posible dictar reglas para todas las actividades potencialmente contaminantes y para todas las condiciones hidrogeológicas. Tampoco se toma en cuenta el riesgo de contaminación de las aguas superficiales.

Se necesitará una adaptación de la metodología de acuerdo a los objetivos de estudio, y a la escala y disponibilidad de datos locales. Aparecerán circunstancias que la guía no cubra adecuadamente. Por ejemplo, ningún intento se ha hecho para presentar un procedimiento para la evaluación de la carga contaminante al subsuelo debido a la industria minera y petrolífera, ya que para éstas es muy difícil generalizar.

Esta primera impresión del informe se dirige a promover estudios de la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas a varias escalas en áreas seleccionadas de América Latina y el Caribe. Debería ser usado por un hidrogeólogo o ingeniero de aguas subterráneas en conjunto con un ingeniero sanitario o científico ambiental. Se espera que los usuarios de este manual adopten la metodología descrita, y de existir alguna interrogante, se sirvan dirigir al CEPIS y sugerir posibles mejoras para futuras ediciones.

Agradecimientos

Este informe ha sido revisado y perfeccionado por el Comité Técnico del Programa Regional de Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas Subterráneas del CEPIS, incluyendo representantes de instituciones en Argentina, Bolivia, Brasil, Costa Rica, Cuba, El Salvador, México, Paraguay, Perú, Puerto Rico, República Dominicana y Venezuela.

Los autores agradecen al Ing. Alberto Flórez Muñoz (Director del CEPIS) y al Ing. Geol. Geroncio de Albuquerque Rocha (DAEE) por el interés demostrado desde el inicio del programa y por su continuo estímulo en la preparación de este informe, a los Profesionales Jóvenes Residentes del CEPIS, Ing. José Lobos, de INCYTH (Argentina) e Ing. Geol. Daniel Gomes, de CETESB (Brasil) por sus discusiones en relación al problema de la determinación de la carga contaminante al subsuelo generada por actividad industrial y por la caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

También agradecemos el excelente trabajo secretarial de la Sra. Isabel Delgado de Risso en relación a la producción de este informe en sus versiones en español e inglés.

1. EL RIESGO DE CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

1.1 Comportamiento de Contaminantes en el Subsuelo

1.1.1 Los perfiles del suelo atenúan activamente un gran número, pero no todos, de los contaminantes del agua. Durante muchos años, han sido considerados como un sistema potencialmente efectivo para la disposición segura de excrementos humanos y efluentes domésticos (Idelovitch & Michail, 1984).

1.1.2 Los procesos involucrados en la atenuación de contaminantes (Figura 1) continúan, en menor grado, a mayores profundidades, especialmente en donde se encuentran sedimentos no consolidados en la zona no saturada.

1.1.3 Adicionalmente, la dispersión hidrodinámica asociada con el flujo del agua subterránea ocasiona la dilución de contaminantes móviles y persistentes, especialmente en la zona saturada de los acuíferos (Figura 1).

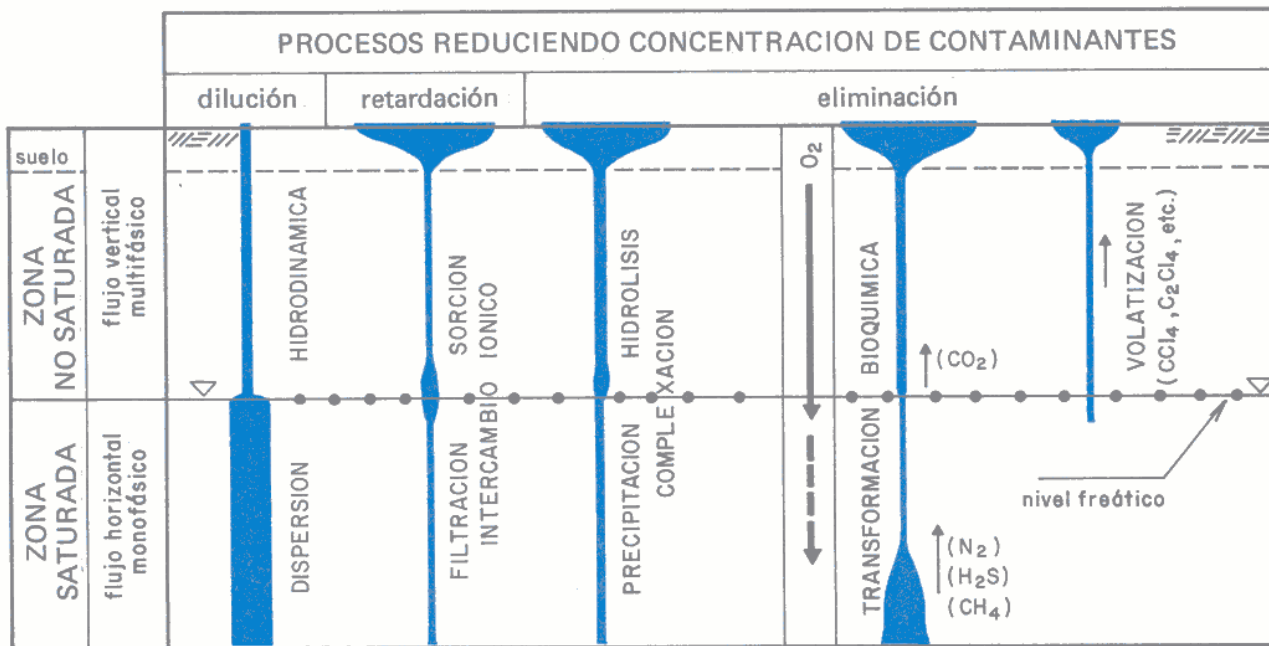


Figura 1

RESUMEN DE LOS PROCESOS DE ATENUACION DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS SUBTERRANEAS (modificado de Gowler, 1983)

El grosor de la línea correspondiente indica la importancia del proceso en el suelo, sobre y bajo el nivel freático. Las flechas indican desprendimiento de gases o una menor presencia de O₂

- 1.1.4 Habrá más dilución en pozos de bombeo porque ellos generalmente interceptan o inducen flujos de agua subterránea a varias profundidades y en varias direcciones, no todos los cuales estarán normalmente contaminados.
- 1.1.5 Sin embargo, no todos los perfiles del suelo y las condiciones hidrogeológicas son igualmente efectivas para la atenuación de contaminantes. Además, el grado de atenuación variará ampliamente según el tipo de contaminante y el proceso de contaminación en un ambiente dado (Freeze & Cherry, 1979; Jackson, 1980).
- 1.1.6 La actividad humana en la superficie de la tierra modifica los mecanismos de recarga del acuífero e introduce nuevos, cambiando la tasa, frecuencia y calidad de la recarga del agua subterránea. Esto es especialmente significativo en climas áridos, pero también ocurre en regiones húmedas. El entendimiento de estos mecanismos y el diagnóstico de tales cambios son importantes para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.
- 1.1.7 El flujo del agua y el transporte de contaminantes desde la superficie del suelo al nivel freático tiende a ser un proceso lento en muchos acuíferos (Figura 2). Esto significa que puede tomar muchos años, aún décadas, antes que se detecten los efectos de un episodio de contaminación por un contaminante persistente en los pozos de explotación.
- 1.1.8 La preocupación por la contaminación de las aguas subterráneas se relaciona principalmente a los acuíferos no confinados, especialmente donde su nivel freático es poco profundo. Un riesgo significativo de contaminación puede también presentarse aún en donde los acuíferos son semiconfinados, si las capas acuitardas confinadas son relativamente delgadas y permeables.
- 1.1.9 Los abastecimientos de agua potable bombeados de acuíferos más profundos y más altamente confinados, solamente serán afectados por los contaminantes más persistentes a muy largo plazo.
- 1.1.10 Es necesario considerar hasta qué punto las recomendaciones de la OMS para la calidad de agua potable se relacionan específicamente con la contaminación de las aguas subterráneas (Cuadro 1). En este contexto, es también relevante mencionar, en términos generales, la posibilidad de autoeliminación de contaminantes durante el transporte al subsuelo, como resultado de la degradación bioquímica y/o reacción química (Matthess et al, 1985).
- 1.1.11 Los procesos de retardación de contaminantes debido a fenómenos de sorción (Cuadro 1) son también de importancia (Figura 1). Aunque tales fenómenos no conducen a la eliminación de contaminantes desde las aguas subterráneas, ellos incrementan el período en que los procesos de eliminación pueden funcionar y afectan las variaciones temporales en la concentración de contaminantes.

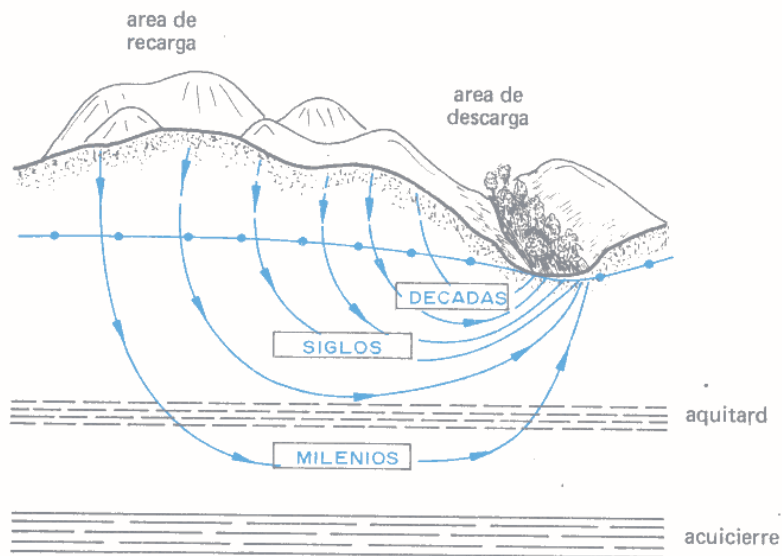
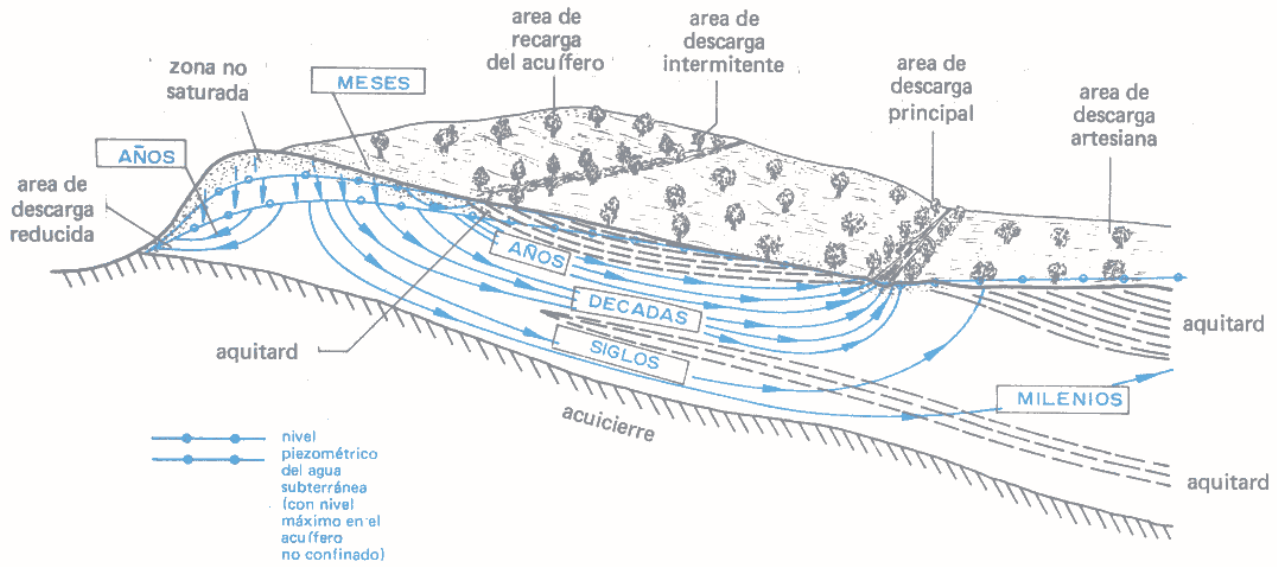


Figura 2

CORTES HIDROGEOLOGICOS HIPOTETICOS PARA ILUSTRAR EL REGIMEN DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRANEAS BAJO CONDICIONES DE CLIMA (A) HUMEDO Y (B) SEMI-ARIDO (modificado de Heath, 1983)

Los períodos de residencia indicados son valores de orden de magnitud típicos para el tiempo de recorrido desde el punto de recarga hasta el punto de descarga.

Cuadro 1

RESUMEN DE LAS GUIAS PARA LA CALIDAD DE AGUA POTABLE Y DEL
COMPORTAMIENTO DE CONTAMINANTES SELECCIONADOS EN EL SUBSUELO

(parcialmente compilado de Wilson & McNabb, 1983, y Frankenberger, 1984)

	RECOMENDACION OMS (ECC*)		TRANSFORMACION		REACCION		RETARDACION	
	Guía (µg/l)	Criterio	BIOQUIMICA		QUIMICA		FISICOQUIMICA	
			Aeróbic	Anaeróbic	Acid	Alcalin	Acida	Alcalina
Metales Pesados								
cadmio (Cd)	5	HS	o	o	o	**	o	*
cromo (Cr)	50	HS	o	o	*	o	**	o
cobre (Cu)	1000	OG	o	o	*	**	**	*
plomo (Pb)	50	HS	o	o	*	**	*	**
mercurio (Hg)	1	HS	*	o	*	**	*	**
plata (Ag)	-	-	o	o	*	**	*	**
cinc (Zn)	5000	OG	o	o	o	**	o	**
Metales No Inorgánicos								
amonio (NH ₄)	10	OG	**	o	o	o	o	**
nitrato (NO ₃)	45000	HS	o	**	o	o	o	o
sodio (Na)	200000	OG	o	o	o	o	o	*
sulfato (SO ₄)	400000	OG	o	**	o	*	o	o
fluoro (F)	1500	HS	o	o	*	*	**	o
cloro (Cl)	250000	OG	o	o	o	o	o	o
arsénico (As)	50	HS	o	o	*	o	*	**
selenio (Se)	10	HS	o	o	**	*	**	o
cianuro (CN)	100	HS	o	o	o	o	**	o
Compuestos Orgánicos								
hidrocarburo ali- fático	10	OG	**	o	o	o	**	**
fenoles	0.5	OG	**	*	o	o	*	*
benceno	10	HS	**	o	o	o	**	**
tolueno	-	-	**	o	o	o	**	**
poliaromáticos	0.1	HS	*	o	o	o	*	*
Compuestos Orgánicos Halogenados								
tricloroetileno	30	HS	o	*	o	o	o	o
tetracloroetileno	10	HS	o	*	o	o	*	*
1.1.1 tricloroetano	10	HS	o	*	o	o	*	*
tetracloro de carbono	3	HS	o	*	o	o	*	*
cloroformo	30	HS	o	*	o	o	o	o
clorometileno	-	-	*	*	o	o	o	o
clorobenceno	0.1	OG(HS)	**	o	o	o	**	**
clorofenoles	0.1	OG(HS)	**	*	o	o	*	*
Organismos Fecales								
coliformes fecales	1/100 ml	HS	o	o	o	o	*	*
bacteria patogénica	-	-	o	o	o	o	*	*
virus patogénicos	-	-	o	o	**	*	*	**

HS importancia para la salud
OG consideración organoléptica

o probablemente no ocurra
* puede ocurrir
** sí ocurre

- 1.1.12 Entre los constituyentes inorgánicos nombrados en las recomendaciones como adversos a la salud humana, se encuentra el nitrato como el más ampliamente distribuido y problemático por su movilidad y estabilidad en sistemas aeróbicos de aguas subterráneas.
- 1.1.13 Otros constituyentes de importancia organoléptica o estética, tales como el cloro, sulfato, sodio, hierro y manganeso, se encuentran ampliamente a niveles elevados en el agua subterránea, de forma natural, debido a la contaminación.
- 1.1.14 Los metales pesados, incluyendo cadmio, cromo, estaño, mercurio, se inmovilizan por precipitación y por otros procesos en muchos acuíferos, pero pueden tener un transporte significativo en sistemas de aguas subterráneas de bajo pH y Eh.
- 1.1.15 En lo que se refiere a constituyentes orgánicos, se debe reconocer que las recomendaciones no cubren aún el rango de compuestos orgánicos sintéticos que sean conocidos como contaminantes potenciales del agua, ya que no existe suficiente evidencia médica para establecer valores consistentes.
- 1.1.16 Aquellos compuestos que representan la mayor amenaza a la calidad de las aguas subterráneas y a la salud humana, son ciertos tipos de hidrocarburos halogenados, de grupos alifático y aromático (Cuadro 1). Son moderadamente solubles en el agua, relativamente móviles y persistentes en el subsuelo y de un uso muy amplio a toda escala industrial como solventes, desinfectantes y desodorantes sintéticos.
- 1.1.17 Los pesticidas no han sido incluidos en el Cuadro 1, pero se consideran más adelante. Cabe mencionar aquí que la mayoría de los pesticidas enumerados en las guías de OMS experimentan una fuerte sorción en el suelo, y resulta improbable que puedan contaminar las aguas subterráneas. Sin embargo, pocas investigaciones y análisis se han llevado a cabo. Otros pesticidas tóxicos son conocidos por ser móviles, pero éstos aún no se encuentran enumerados en las recomendaciones por falta de evidencia médica.
- 1.1.18 Los acuíferos superficiales son susceptibles a la contaminación microbiológica. La actual recomendación de la OMS para la calidad bacteriológica de agua para consumo humano indica que un abastecimiento debería ser considerado no satisfactorio si se detectan las bacterias indicadoras (coliformes fecales) en cualquier muestra de (MPN) 100 ml.

1.2 Concepto Fundamental del Riesgo de Contaminación

- 1.2.1 La definición más lógica del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es concebirlo (Poster, 1987) como la interacción entre (Figura 3):

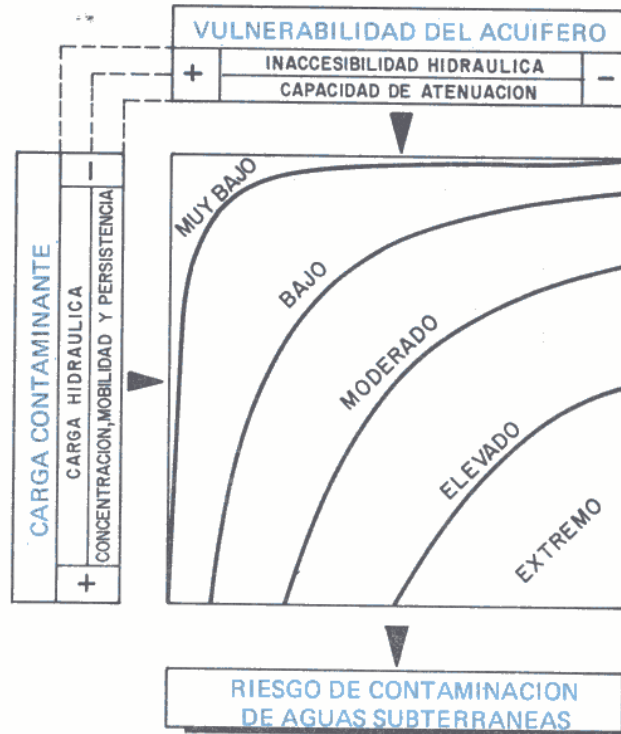


Figura 3

ESQUEMA CONCEPTUAL DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS
(modificada de Foster, 1987)

La interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero determina el riesgo de que la contaminación penetre al acuífero.

- (a) La carga contaminante que es, será, o pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de actividad humana.
- (b) La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, debido a las características naturales de los substratos que se cubren y se separan de la superficie.

ESTA ES LA BASE DE LA METODOLOGIA PRESENTADA (Figura 0), PERO LAS ADVERTENCIAS INDICADAS (Andersen, 1987) EN RELACION A LA APLICABILIDAD DEL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD DE ACUIFEROS A LA CONTAMINACION DEBERIAN SER TOMADAS MUY EN CUENTA.

- 1.2.2 Adoptando tal esquema podremos obtener una alta vulnerabilidad sin riesgo de contaminación, por la ausencia de una carga significativa de contaminantes, y viceversa. Ambos son perfectamente lógicos en la práctica. Aún más, la carga contaminante puede ser controlada o modificada, pero no la vulnerabilidad del acuífero, excepto en algunas actividades antrópicas que se sacan la cubierta de suelos o de material de la zona no saturada (minería p. ej.) y que puede reducir la vulnerabilidad natural.
- 1.2.3 El término vulnerabilidad del acuífero a la contaminación representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta. Es, en efecto, lo inverso a la capacidad de asimilación de contaminantes de un cuerpo receptor de agua superficial, con la diferencia que los acuíferos tienen una cubierta de substratos que proporciona una protección adicional.
- 1.2.4 El término riesgo de contaminación se define aquí como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la OMS para la calidad de agua de consumo humano.
- 1.2.5 El hecho que este riesgo pueda convertirse en una seria amenaza a la calidad de abastecimiento de agua subterránea ya desarrollado o por desarrollar, dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero mismo (Figura 0). Las consecuencias, en términos de costos de medidas correctivas y de salud humana, son temas complejos (Haines, 1984, Foster y Foster, 1987) y se consideran fuera de consideración en este tipo de determinación.

1.3 Importancia de la Zona No Saturada

- 1.3.1 La zona no saturada merece especial atención ya que ella representa la primera y más importante defensa natural contra la contaminación de las aguas subterráneas (Matthess et al, 1985; Foster, 1985a). Esto no es solamente por su posición estratégica entre la superficie y la napa freática sino también porque su ambiente es generalmente más favorable para la atenuación y eliminación de los contaminantes (Figura 1).
- 1.3.2 El flujo de agua en la zona no saturada es normalmente lento y se restringe a los poros más pequeños con mayor superficie específica. La condición química es normalmente aeróbica y frecuentemente alcalina.
- 1.3.3 Por esto, en la zona no saturada encontraremos un mayor potencial para:
 - (a) Intercepción, sorción y eliminación de bacteria y virus.
 - (b) Atenuación de metales pesados y otros químicos inorgánicos a través de precipitación (como carbonatos, sulfuros o hidróxidos), sorción o intercambio de cationes.
 - (c) Sorción y biodegradación de muchos hidrocarburos y compuestos orgánicos sintéticos.

Sin embargo, el flujo de agua en la zona no saturada puede ser complejo y su capacidad para atenuar los contaminantes difícil de predecir.

- 1.3.4 Es importante apreciar que pueden ocurrir cambios marcados en el comportamiento de algunos contaminantes si la actividad genera suficiente carga orgánica o ácida para producir una variación significativa en el Eh o pH en la zona.
- 1.3.5 Adicionalmente, en el caso de contaminantes persistentes y móviles, la zona no saturada simplemente causa un gran retardo en su llegada a la napa freática, sin ninguna atenuación beneficiosa.
- 1.3.6 El grado de atenuación de muchos contaminantes dependerá del tiempo de recorrido o residencia en la zona no saturada, que a la vez puede ser estimado por sus características hidráulicas.
- 1.3.7 La zona no saturada está formada por partículas sólidas, poros llenos de aire y de agua en proporción constantemente variable. El flujo no saturado se rige por la Ley de Darcy que, en dirección vertical, puede ser escrita en la siguiente forma:

$$v_x = \frac{K(\theta)_x}{\theta} \cdot \frac{\delta h}{\delta x}$$

donde v_x es la velocidad de flujo, θ el contenido de humedad, $\delta h/\delta x$ la gradiente hidráulica no saturada y $K(\theta)$ la conductividad hidráulica no saturada que es una función del contenido de humedad.

- 1.3.8 El contenido de humedad y la conductividad hidráulica vertical no saturada son funciones del potencial hídrico del suelo, que es consecuencia de la afinidad del agua para superficies sólidas y es controlado por la distribución del tamaño de los poros. En el caso de formaciones heterogéneas, y especialmente en rocas fisuradas, la variación puede ser dramática ya que los macroporos y fisuras pueden retener y conducir agua solamente a muy bajo potencial hídrico.
- 1.3.9 Mientras que las tasas de flujo natural en la zona no saturada de casi todas las formaciones no exceden de 0.2 m/d a corto plazo, y menos aún promediadas a períodos más largos, la tasa del flujo de agua y de la penetración de algunos contaminantes en formaciones fisuradas pueden estar en un orden de magnitud más alto, cuando existe una carga hidráulica artificial. Este es un factor clave en la determinación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por contaminantes microbiológicos y biodegradables.
- 1.3.10 Aunque simplista, es normalmente razonable asumir que, bajo condiciones naturales, el tiempo de residencia en la zona no saturada es una función de la tasa de infiltración anual por precipitación y del promedio del contenido de humedad de la zona, que alcanzará la retención

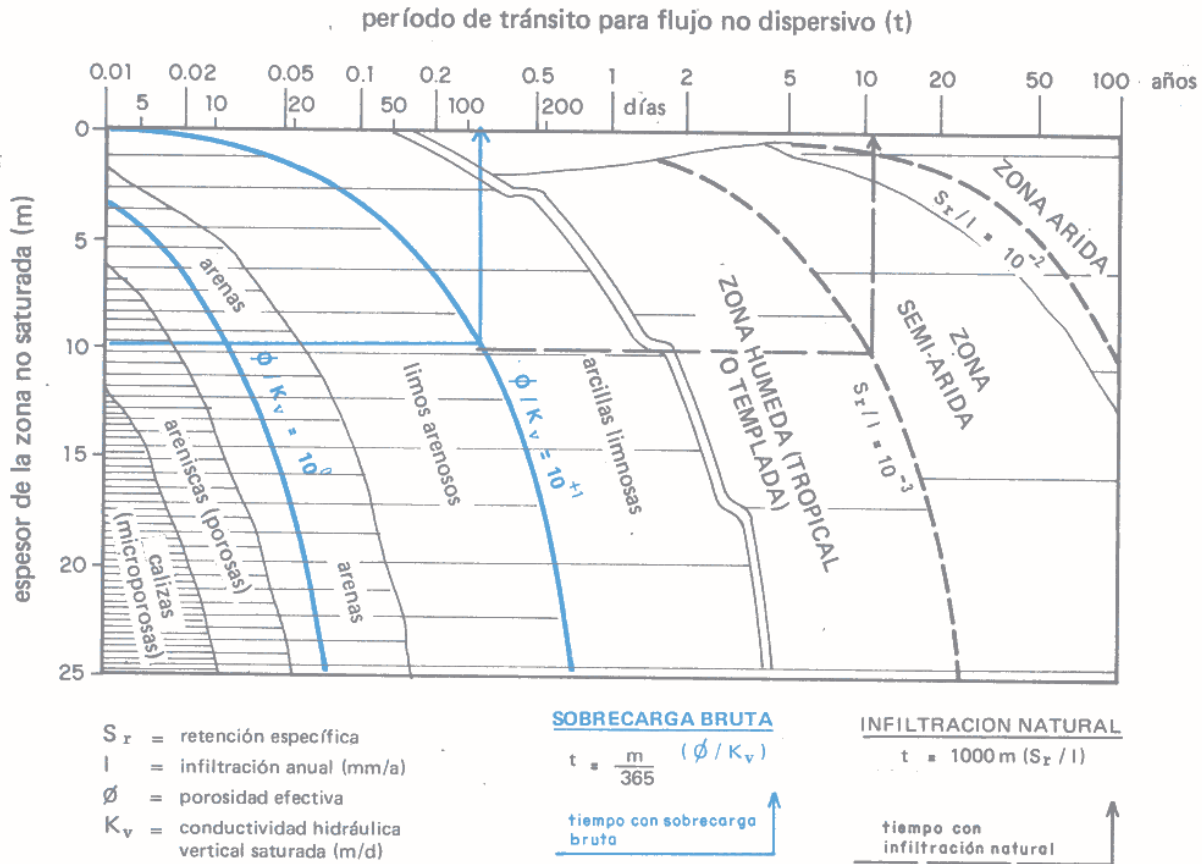


Figura 4

ESTIMACION DEL TIEMPO DE RECORRIDO EN LA ZONA NO SATURADA
 (Foster, 1985a)

Los estimados se basan en cálculos simplificados bajo condiciones de precipitación natural y fuerte recarga artificial. Ya que las variaciones de I y K_v son mucho más grandes que aquellas de S_r y ϕ , es evidente que, para un grosor dado de la zona no saturada, el tiempo de recorrido es predominantemente controlado por I y por K_v en los casos respectivos.

Las grandes reducciones en tiempo de recorrido en la presencia de recarga artificial son también aparentes.

específica después de un drenaje prolongado. Puesto que esta última función varía muy poco entre las diferentes formaciones geológicas comparadas con las variaciones climáticas de la infiltración anual por precipitación, las tasas del flujo en la zona no saturada variarán principalmente según el clima (Figura 4).

- 1.3.11 Se puede obtener una indicación de la reducción del tiempo de recorrido de la zona no saturada con aumento en la carga hidráulica asumiendo que, bajo condiciones de alta recarga artificial, será una función de porosidad efectiva y conductividad hidráulica vertical saturada. Aunque este caso sólo se alcanza bajo condiciones especiales, demuestra (Figura 4) que en la mayoría de formaciones geológicas, con la excepción de finos sedimentos no consolidados, los tiempos de recorrido son radicalmente reducidos.
- 1.3.12 A pesar de la importancia del factor climático y su influencia en los tiempos de residencia en la zona no saturada, es más lógico tratar la carga hidráulica, incluyendo el componente natural de la infiltración por precipitación, como parte de la carga contaminante en consecuencia de la alta recarga hidráulica artificial asociada con muchas actividades contaminantes.
- 1.3.13 Aún más, mientras que la presencia de tasas bajas de infiltración natural reducirán el riesgo de lixiviación de residuos sólidos dispuestos en el suelo en climas áridos, también ocasionará una menor dilución de la contaminación de otras fuentes.

1.4 Función de los Suelos

- 1.4.1 La mayoría de los procesos que causan la atenuación y eliminación de contaminantes en el subsuelo son mucho más activos en la zona del suelo biológicamente activa (Figura 1), como resultado de su mayor contenido de arcilla y materia orgánica, y de su población bacteriana mucho más grande.
- 1.4.2 Las características de esta zona influenciarán grandemente en la escala de lixiviación de nutrientes y pesticidas de una actividad agrícola dada y en la neutralización de una deposición ácida aérea.
- 1.4.3 Sin embargo, en muchas fuentes puntuales de contaminación, la carga contaminante al subsuelo es aplicada bajo esta zona, en la base de excavaciones tales como pozos, zanjas, lagunas, sumideros y canteras, y la capacidad de atenuación de esta zona no contribuye a la reducción de la vulnerabilidad del acuífero.
- 1.4.4 Así, es preferible no incorporar la capacidad de atenuación del suelo a la vulnerabilidad del acuífero (Foster, 1987), pero hay que tomarlo en cuenta indirectamente cuando se estime la carga contaminante al subsuelo de diversas fuentes de contaminación dispersa.

2. BASES ESTRUCTURALES PARA LA DETERMINACION DEL RIESGO

2.1 Estrategia de Determinación del Riesgo

- 2.1.1 En vista de la complejidad de los factores que afectan el transporte de los contaminantes en las aguas subterráneas, de la importancia potencial de factores muy detallados y de la singularidad de cada situación de campo o área de evaluación, sería lógico tratar cada actividad contaminante en un ambiente hidrogeológico dado a mérito individual y llevar a cabo investigaciones independientes para evaluar el riesgo de contaminación (Foster, 1987).
- 2.1.2 Sin embargo, el costo de investigaciones hidrogeológicas e hidróquímicas es relativamente alto y un simple y económico (pero consistente) procedimiento para determinar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas se requiere inicialmente (Cuadro 2), para priorizar las investigaciones posteriores en campo. La determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas debería ser un elemento de un esquema más amplio para la evaluación y administración del recurso hídrico subterráneo (Figura 5).
- 2.1.3 El requerimiento de un procedimiento simple también emana de los limitados presupuestos y recursos humanos generalmente disponibles para el planeamiento y ejecución de programas de protección de acuíferos, a menudo resultante de la dividida responsabilidad institucional por las aguas subterráneas.
- 2.1.4 La determinación debe ser diseñada para que pueda llevarse a cabo en forma relativamente rápida con recursos humanos limitados, y en muchos casos utilizando datos básicos recolectados para otros propósitos.
- 2.1.5 Estos datos generalmente no están todavía publicados, sino que se encuentran en archivos de diferentes organizaciones y, algunas veces, poco ordenados. Normalmente sería necesario un limitado reconocimiento de campo para confirmar y ampliar datos existentes, pero no se contempla el muestreo ni el análisis de efluentes, pozos y suelos, ya que sería muy costoso y requeriría de mucho tiempo.
- 2.1.6 La metodología también puede ser aplicada en el caso que el objetivo sea evaluar el riesgo de contaminación causada por una actividad futura. Esto es, que puede ser usada en el contexto de un estudio global del impacto ambiental (Covello et al, 1985).
- 2.1.7 Hasta en el mejor de los casos, tales determinaciones pueden producir solamente una evaluación preliminar. Por otra parte, las limitaciones en el estado actual del conocimiento científico del comportamiento de contaminantes en la subsuperficie, y las características de la carga contaminante al subsuelo asociada con ciertas actividades humanas, reducen la capacidad para interpretar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Quadro 2
 NIVELES DE EVALUACION DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE
 LAS AGUAS SUBTERRANEAS

NIVEL DE EVALUACION	ASPECTOS CLAVES			ESCALA DE TRABAJO	DOCUMENTOS DE CEPIS
	BASADO EN DATOS EXISTENTES	SIN MUESTREO	ENFASIS ASPECTOS CUALITATIVOS		
I. Reconocimiento Preliminar (existencia del riesgo)			ENFASIS ASPECTOS CUALITATIVOS	normalmente estado/provincial 1:250,000 a 1:500,000 (datos 10 km)	DETERMINACION DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS
				normalmente urbana/municipal 1:50,000 a 1:100,000 (datos 1-2 km)	
II. Evaluación Sistemática (grado de riesgo)			ENFASIS ASPECTOS CUALITATIVOS	local urbano/municipal 1:25,000 1:50,000 (datos 200-500 m)	MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS
III. Reconocimiento del Campo		REQUIERE RECOLECCION DE DATOS DE CAMPO	REQUIERE MUESTREO Y ANALISIS	REQUIERE NO PERFORACION JUSTIFICABLE	
				REQUIERE PERFORACION	
IV. Investigación por Red de Monitoreo			ENFASIS ASPECTOS CUALITATIVOS	local 1:25,000 a 1:50,000 (datos 200-500 m)	
V. Investigación Completa del Campo			ENFASIS ASPECTOS CUALITATIVOS	local 1:10,000 a 1:25,000 (datos 50-100 m)	

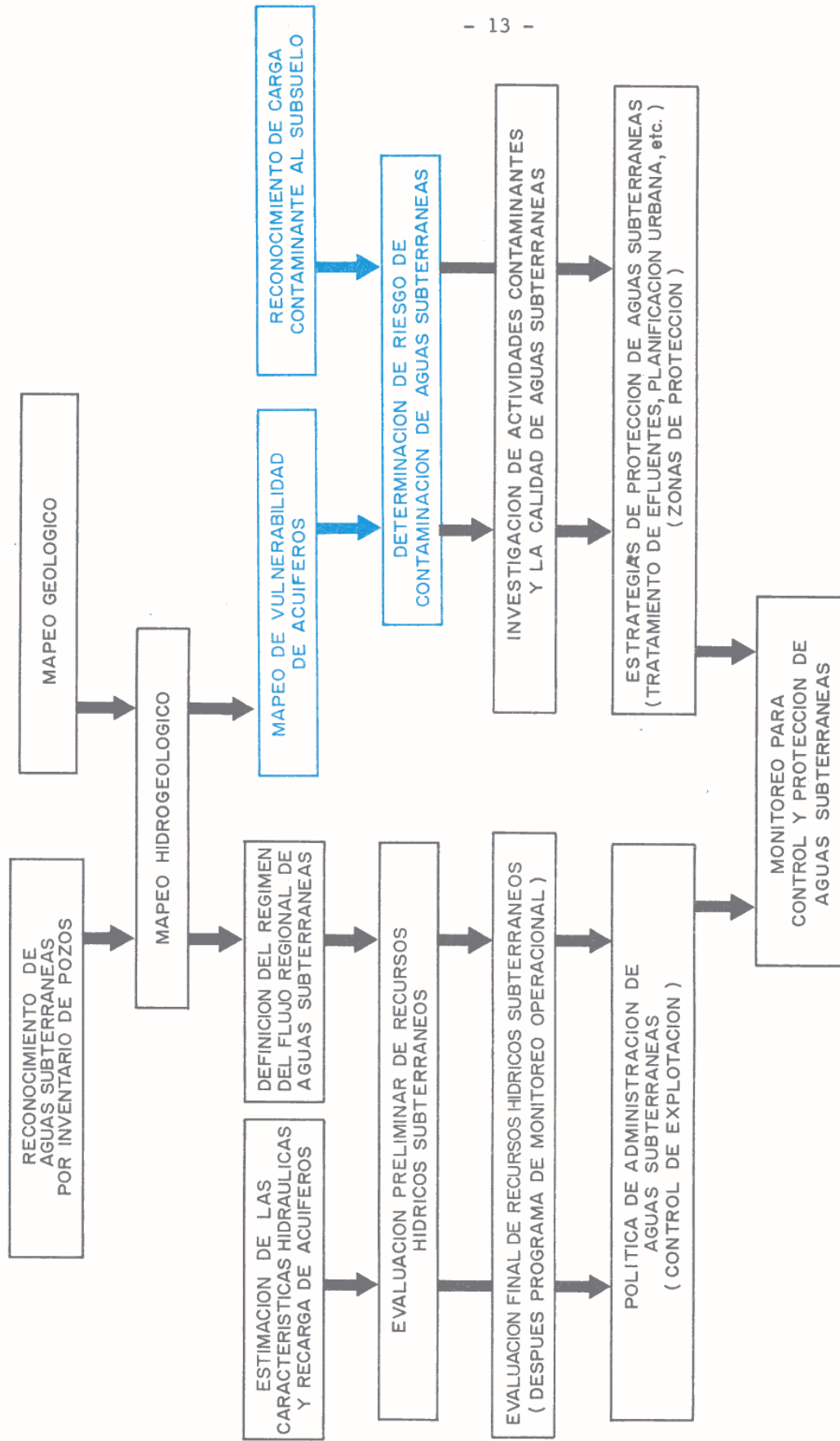


Figura 5
 POSICION DE LA DETERMINACION DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL ESQUEMA GLOBAL DE EVALUACION Y ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO SANITARIO

2.1.8 La determinación del riesgo debería servir al menos para identificar los acuíferos, o partes de acuíferos, más vulnerables, y determinar las actividades causantes del máximo riesgo de contaminación en estas áreas. De esta manera, la determinación servirá para llamar la atención sobre estas actividades y establecer prioridades para la investigación y el monitoreo de campo.

2.2 Selección de la Zona y Escala de Estudio

2.2.1 Se reconocen distintos niveles para la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (Cuadro 2). El requerimiento más común parece ser la evaluación sistemática del riesgo existente en extensas áreas urbanas, generalmente en la escala de 1:50,000 ó 100,000 (II en el Cuadro 2).

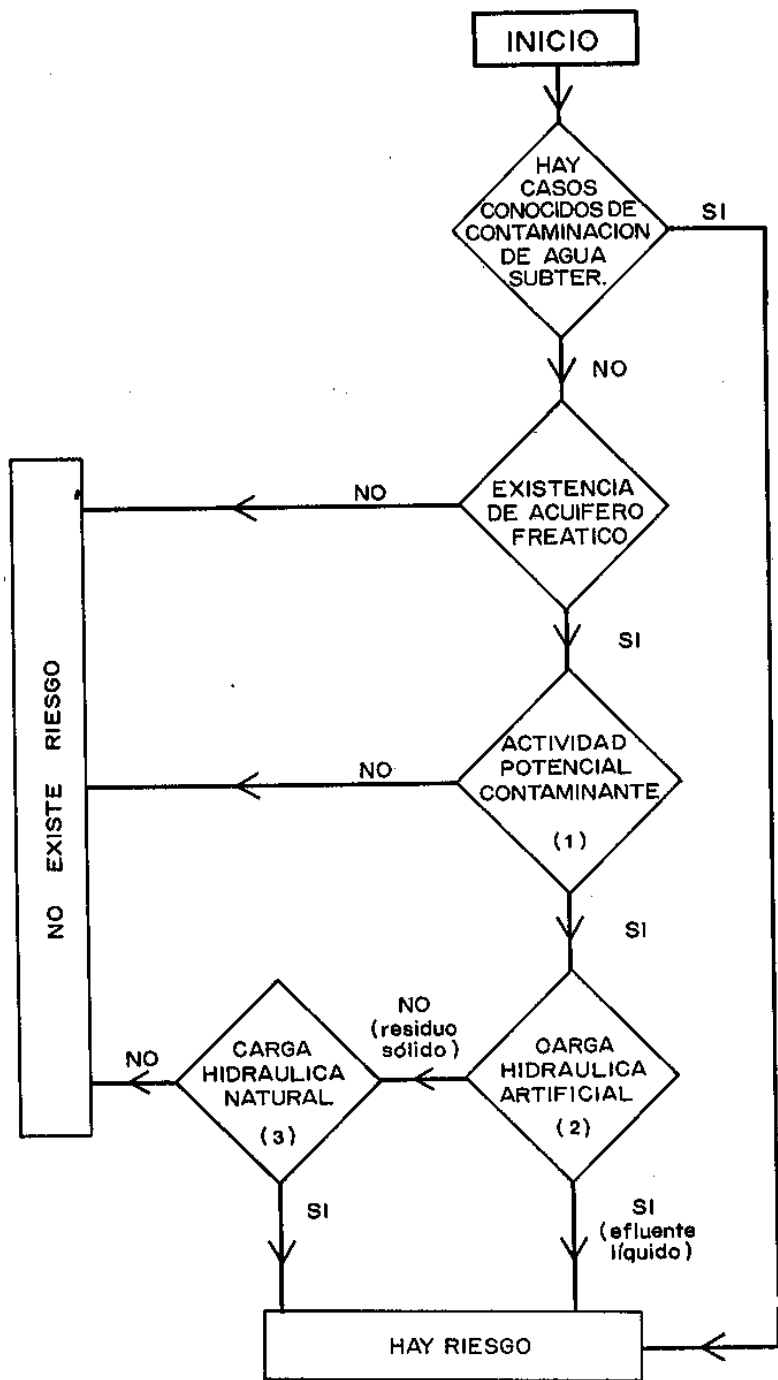
2.2.2 En algunos países, estados o provincias, puede existir la necesidad de llevar a cabo un reconocimiento más amplio a mayor escala, por decir 1:250,000 o 500,000 (I en el Cuadro 2). En algunos casos, la metodología podría ser tan simple como aquella que se muestra en la Figura 6, que requeriría solamente de datos cualitativos de las condiciones hidrogeológicas y fuentes de carga contaminante, pero en la mayoría de los casos, sería deseable clasificar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y determinar la carga contaminante al subsuelo.

2.2.3 Los límites del área de evaluación pueden ser definidos con criterios físicos, políticos o económicos (WHO, 1982). Cada cual tiene sus méritos. En términos científicos, es preferible definir el área de evaluación en base física que tenga que ver con el acuífero entero o una subcuenca de aguas subterráneas dentro de un acuífero.

2.2.4 La definición del área de evaluación debería también ser considerada en relación a otros factores, tales como problemas conocidos o sospechados de contaminación, ó distribución de fuentes de agua subterránea desarrolladas o designadas.

2.2.5 La selección del área dependerá considerablemente del nivel y de la escala del estudio que se está llevando a cabo. Estudios a escalas mayores que 1:100,000 considerarán un acuífero entero o una subcuenca de aguas subterráneas dentro de un acuífero, mientras que estudios de reconocimiento a escalas menores de 1:250,000 incluirán varios acuíferos.

2.2.6 En muchos casos, la determinación del riesgo de contaminación será seguida por un estudio más detallado de las condiciones hidrogeológicas y de la carga contaminante, incluyendo el muestreo y el análisis de aguas subterráneas y efluentes, y en muchos casos, la perforación de pozos de investigación y monitoreo (III-IV en el Cuadro 2).



(1) estas actividades incluyen principalmente:

- urbanización con saneamiento in-situ
- industrias utilizando sustancias tóxicas
- rellenos sanitarios o botaderos
- reuso de aguas servidas
- ríos contaminados
- agricultura de cultivo intensivo
- actividad minero o petrolífera

pero diversos accidentes ambientales, fugas de alcantarillado y tanques de almacenamiento, cementerios, etc., también pueden ocasionar un riesgo.

(2) asociada con el contaminante y dirigido al subsuelo

(3) resultando en posibilidad de lixiviación de residuos sólidos

Figura 6

NIVEL MAS SIMPLE DE ESTIMACION DEL RIESGO DE CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Tal esquema podría servir para un reconocimiento preliminar, pero en la mayoría de los casos se necesitará una metodología más detallada para una mejor definición de la situación en áreas donde exista algún riesgo.

- 2.2.7 Una innovación en la modelación matemática de la contaminación de aguas subterráneas, comprende la asignación de probabilidades estadísticas para aquellos parámetros y factores que afecten el transporte de contaminantes, y la determinación del modo cómo estas probabilidades interactúan para determinar el riesgo de contaminación usando técnicas estocásticas (Schwartz, 1977). Sin embargo, si se desea obtener resultados útiles, este método sólo puede ser aplicado donde ya exista un detallado conocimiento de la hidrodinámica del acuífero.

2.3 Requerimientos de Personal

- 2.3.1 El procedimiento propuesto requiere de dos profesionales calificados, un hidrogeólogo o ingeniero en aguas subterráneas y un ingeniero sanitario ó un científico ambiental, apoyado por personal auxiliar no calificado con una oficina base y transporte de campo. Uno de los dos profesionales debería ser nominado como jefe de grupo.
- 2.3.2 Estos dos profesionales pueden pertenecer a diferentes instituciones, pero se requerirá de una estrecha comunicación para producir una buena evaluación.
- 2.3.3 Siguiendo la metodología aquí presentada, tal equipo debería completar una evaluación dentro de un período de 2-12 meses, dependiendo del tamaño y complejidad del área de evaluación.
- 2.3.4 Aunque el procedimiento está simplificado, será necesario para el personal profesional tener un conocimiento básico y cierta experiencia práctica en la contaminación de aguas subterráneas porque tendrán que desarrollar la habilidad de clasificar algunos componentes de la vulnerabilidad del acuífero y la carga contaminante en base a la limitada información.

2.4 Adquisición de Datos Básicos

- 2.4.1 La determinación del riesgo de contaminación normalmente se llevará a cabo en áreas que abarquen recursos importantes de aguas subterráneas, que estén sujetas a un desarrollo urbano, industrial y/o agrícola. Por consiguiente, es probable que existan estudios previos de la distribución de aguas subterráneas y que los datos relevantes hayan sido compilados. Esto ayudaría considerablemente en la adquisición de datos básicos.
- 2.4.2 La determinación contempla utilizar, en lo posible, datos normalmente existentes y a minimizar la necesidad de programas de trabajo de campo. Muchos de los datos básicos requeridos para la evaluación están disponibles en varios departamentos y agencias de gobierno y el procedimiento se basa esencialmente en tales datos.

- 2.4.3 Gran parte de la información requerida para el procedimiento puede ser archivada en versión borrador y no clasificada o procesada. En este caso, tendrá que hacerse un esfuerzo considerable para compendiar, procesar y clasificar estos datos.
- 2.4.4 Es posible que sea muy difícil determinar cuáles son los datos esenciales. Existe el peligro de omitir alguna información importante si no se hace un cuidadoso análisis, pero, por otro lado, los requerimientos de esfuerzo humano aumentan considerablemente si muchos datos sin importancia se recuperan y procesan.
- 2.4.5 Durante el proceso de compilación, todos los datos coleccionados tendrán que ser organizados, evaluados mediante revisión y discusión, y verificados cuando sea necesario. Este proceso ayudará a identificar aspectos con insuficientes datos, ya que no toda la información necesaria se puede obtener siempre a través de agencias del gobierno.
- 2.4.6 Para obtener información adicional, frecuentemente se tendrá que entrevistar personal no estatal de sectores industriales o agrícolas. Tal proceso requiere de mucho tiempo y se tendrá que hacer un balance entre la necesidad de contar con los datos y el esfuerzo requerido para obtenerlos.
- 2.4.7 Las fuentes de todos los datos usados deberían ser mencionadas en el informe de evaluación para permitir su futura verificación y ampliación (WHO, 1982). La confiabilidad de los datos debería ser estimada en la medida de lo posible por medio de una verificación con información de otras fuentes.
- 2.4.8 Inevitablemente existirán deficiencias en los datos básico y a menudo se tendrán que hacer suposiciones subjetivas para completar el procedimiento. Esto es aceptable en este tipo de metodología, siempre y cuando todos los datos deficientes estén claramente indicados en el informe y sean usados para evaluar la precisión de la determinación y que sirvan como guía de prioridades para el mejoramiento de los datos básicos (WHO, 1982).
- 2.4.9 La autorización para el acceso a los datos básicos debería ser obtenida de los departamentos correspondientes del gobierno y de empresas privadas, ya que es importante fomentar un espíritu de cooperación entre el equipo de evaluación y aquellos que proveen datos básicos (WHO, 1982). Tal cooperación facilitará la recolección de datos más completos y precisos, y así se establecerá una colaboración que es fundamental para la implementación futura de posibles medidas de control de la contaminación.

3. CARACTERIZACION DE LA CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO

3.1 Clasificación de las Actividades Contaminantes

- 3.1.1 Se le debe dar mucho más consideración a la carga contaminante al subsuelo generada por actividades humanas en la superficie. Aunque hay un amplio rango de actividades humanas que generan cierta carga contaminante, a menudo se encuentra que sólo unas pocas son responsables por el máximo riesgo de contaminación de aguas subterráneas en un área dada.
- 3.1.2 Habría que obtener mejor información para permitir una evaluación más precisa del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, y para definir medidas efectivas para controlar los componentes más peligrosos de la carga contaminante.
- 3.1.3 La caracterización inadecuada de la carga contaminante al subsuelo impide en gran manera la investigación detallada de episodios de contaminación de aguas subterráneas y de la predicción de la futura calidad de aguas subterráneas resultantes de tales episodios. El llamado "input factor" es invariablemente uno de los que no se pueden definir adecuadamente en los modelos numéricos de contaminación de aguas subterráneas.
- 3.1.4 Una lista de actividades potencialmente generadoras de carga contaminante al subsuelo se presenta y clasifica en el Cuadro 3. Algunas de estas actividades que causan un serio riesgo de contaminación en naciones en desarrollo son comparables a aquellas presentes en países altamente industrializados, pero otras son diferentes.
- 3.1.5 Es fundamental la división entre la contaminación por fuentes puntuales (que son fáciles de identificar) y por fuentes difusas. Así también, es importante la subdivisión entre las actividades en las que la generación de la carga contaminante al subsuelo es parte integral de su diseño, y de aquellas en las que el componente es incidental o accidental, especialmente considerando su implicación para la prevención y control de contaminación.
- 3.1.6 Aunque algunos informes existentes proporcionan estimados de la descarga al ambiente de industrias específicas y presentan resúmenes de datos reales de descarga a cursos de agua y/o al aire (e.g. WHO, 1982), ninguno se dirige al problema de caracterización de la carga contaminante al subsuelo.

3.2 Requerimientos Optimos

- 3.2.1 Desde un punto de vista teórico, se necesita establecer cuatro características semi-independientes de la carga contaminante al subsuelo (Foster, 1987) para cada actividad contaminante:

Cuadro 3

RESUMEN DE ACTIVIDADES POTENCIALMENTE GENERADORAS DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO

Las actividades en letra mayúscula son de ocurrencia más frecuente en América Latina.

ACTIVIDAD	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA CONTAMINANTE			
	Categoría de Distribución	Principales Tipos de Contaminantes	Relativa Carga Hidráulica	Desvío de Suelo
<u>Urbanización</u>				
SANEAMIENTO SIN ALCANTARILLADO	u/r P-D	n f o	+	*
Fugas de desagües (a)	u P-L	o f n	+	*
LAGUNAS DE OXIDACION DE DESAGUES (a)	u/r P	o f n	++	*
Aplicación de desagües al suelo	u/r P-D	n s o f	+	
DESCARGA DESAGUES AL RIO	u/r P-L	n o f	++	*
Lixiviación de rellenos/botadores (a)	u/r P	o s h		*
Almacenamiento de combustibles	u/r P-D	e		*
Drenaje por sumideros	u/r P-D	s o	+	*
<u>Industrial</u>				
Fugas de tanques/tuberías (b)	u P-D	o h		*
Derrames accidentales	u P-D	o h	+	
LAGUNAS DE EFLUENTES	u P	o h s	++	*
APLICACION DE EFLUENTES AL SUELO	u P-D	o h s	+	
DESCARGA EFLUENTES AL RIO	u P-L	o h s	++	*
Lixiviación de botadores	u/r P	o h s		*
Drenaje por sumideros	u/r P	o h	++	*
Precipitaciones aéreas	u/r D	s o		
<u>Agrícola (c)</u>				
a. CULTIVO DEL SUELO				
- CON QUIMICOS AGRICOLAS	r D	n o		
- E IRRIGACION	r D	n o s	+	
- con lodos	r D	n o s		
- IRRIGACION DE AGUAS RESIDUALES.	r D	n o s f	+	
b. Cría de ganado/procesos de cosechas				
- lagunas de efluentes	r P	f o n	++	*
- descarga efluentes al suelo	r P-D	n s o f		
- descarga efluentes al río	r P-L	o n f	++	*
<u>Extracción de Minerales</u>				
Modificación régimen hidráulico	r/u P-D	s h		*
Descarga de agua del drenaje	r/u P-D	h s	++	*
LAGUNAS DE RELAVES	r/u P	h s	+	*
LIXIVIACION DE BOTADEROS	r/u P	s h		*

- (a) puede incluir componentes industriales n compuestos de nutrientes
 (b) puede ocurrir también en áreas no industriales f patógenos fecales
 (c) intensificación presenta el principal riesgo de contaminación o compuestos microorgánicos y/u carga orgánica
 P/L/D puntual/lineal/difusa s salinidad
 u/r urbano/rural h metales pesados

- (a) La clase de contaminante involucrado.
- (b) La intensidad de la contaminación.
- (c) El modo de disposición en el subsuelo.
- (d) El tiempo de aplicación de la carga contaminante.

Cada una de estas características depende de dos o más factores, cuyos estimados permitirían clasificar los componentes de la carga contaminante en una escala relativa de 0-1 (Figura A-B).

3.2.2 La clase(s) de contaminante(s) involucrado(s) en una actividad contaminante o episodio de contaminación dado, puede(n) ser definida(s) (Figura 7A) por:

- (a) Su tendencia hacia la degradación o transformación in-situ, como resultado de actividad bacteriológica o reacción química.
- (b) Su tendencia hacia el retardo con respecto al flujo de agua subterránea como resultado de procesos como intercambio de cationes, sorción, etc.

Estas propiedades variarán ampliamente para muchos contaminantes según las características litológicas del medio geológico involucrado, pero lo que es de interés es su posición relativa.

3.2.3 Se puede definir la intensidad de la contaminación (Figura 7B) por:

- (a) La concentración relativa de cada contaminante involucrado en relación a los valores recomendados por la OMS para la calidad de agua potable.
- (b) La proporción de la recarga local del agua subterránea afectada por la contaminación.

3.2.4 Se puede definir el modo de disposición del contaminante al subsuelo (Figura 7C) por:

- (a) La carga hidráulica asociada con el contaminante, incluyendo infiltración natural de precipitación.
- (b) La profundidad bajo superficie a la que el efluente es descargado o dónde la lixiviación de residuos sólidos ocurre.

3.2.5 Se puede definir el tiempo de aplicación de la carga contaminante (Figura 7D) considerando:

- (a) La probabilidad que el contaminante sea descargado al subsuelo, que en la mayoría de las situaciones será alta, con la excepción del caso de accidentes ambientales.
- (b) El período durante el cual se aplica la carga, que mostrará también una amplia variación de horas a décadas.

3.2.6 Cada una de estas características interactúa con un diferente componente de vulnerabilidad de contaminación del acuífero, y esta interacción determina el grado del riesgo de contaminación de las aguas

subterráneas. De esta manera, es difícil justificar los intentos para combinarlos dentro de un sólo índice que pretenda clasificar la carga contaminante al subsuelo.

3.3 Restricciones Prácticas

- 3.3.1 Dado el estado actual del conocimiento técnico y las restricciones económicas de los estudios de campo, no es posible obtener todos los datos ideales que se requieren. Sin embargo, estos requerimientos no deberían perderse de vista ya que pueden formar la base para un futuro estudio más detallado de la carga contaminante al subsuelo, incluyendo muestreo de efluentes, inspección de procesos, etc.
- 3.3.2 En el caso de plantas industriales, surgirán problemas por la dificultad para establecer cómo se descargan los efluentes. Esto sucede donde partes de un proceso industrial generan efluentes por separado, donde parte de la carga total del efluente está siendo removida del lugar por alcantarillado o por transporte a un lugar lejano de disposición, ó donde está siendo descargada al suelo a través de infiltración por lagunas, fosas, sumideros ciegos, etc.
- 3.3.3 En casos de cultivo agrícola y saneamiento sin alcantarillado en áreas de suelo permeable, no es fácil recolectar muestras de infiltración para análisis de lixiviados. Por este motivo los datos científicos disponibles para definir las concentraciones de contaminantes son muy limitados.
- 3.3.4 En relación a la clase de contaminante (Figura 7A), la retardación física y transformación química de contaminantes orgánicos son generalmente citados sólo para suelos netamente fértiles, alcalinos y aeróbicos. Aún en este caso, existe incertidumbre acerca del comportamiento de algunos compuestos orgánicos sintéticos. Es posible que los procesos de retardación y transformación sean significativamente más lentos o mínimos en:
- (a) Suelos arenosos permeables presentes en el afloramiento superficial de muchos acuíferos.
 - (b) En la parte más profunda de la zona no saturada, especialmente en arenas de cuarzo homogéneo o rocas calcáreas, como resultado de sus contenidos de arcilla y carbón orgánico muy bajos, y mucho más pequeñas poblaciones bacterianas.
- 3.3.5 Por otra parte, la presencia de altas cargas orgánicas y/o acídicas en los efluentes pueden resultar en un cambio significativo de pH y/o Eh en toda la columna de la zona no saturada, modificando radicalmente la posibilidad de retardación y/o transformación de contaminantes (Figura 7A).
- 3.3.6 Como consecuencia de estas complicaciones, las actividades contaminantes serán tratadas individualmente en un intento de caracterizar la carga contaminante que generan al subsuelo.

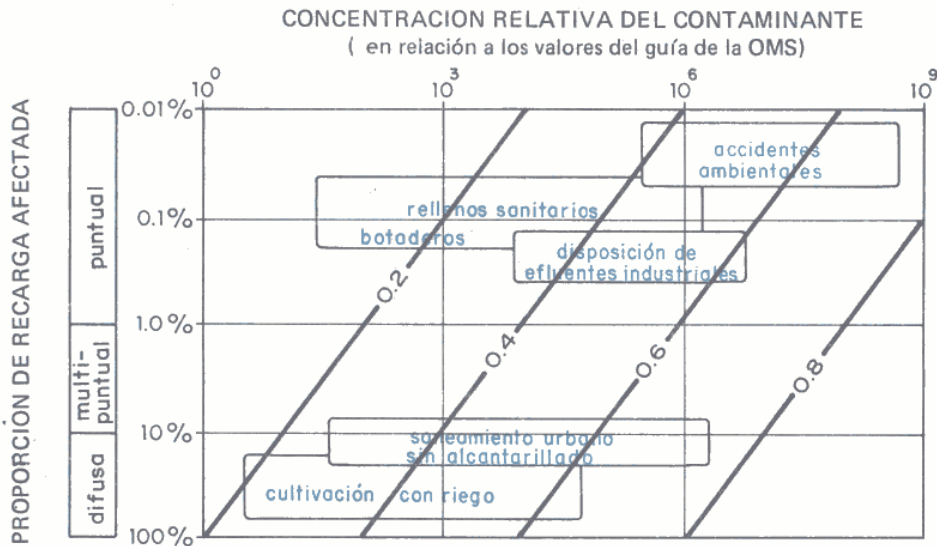
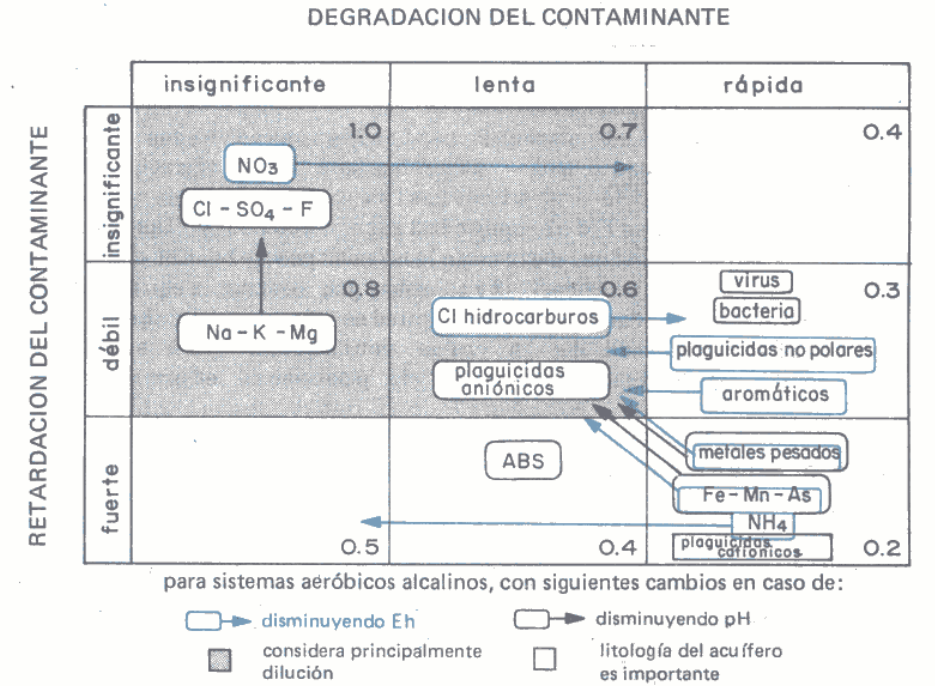
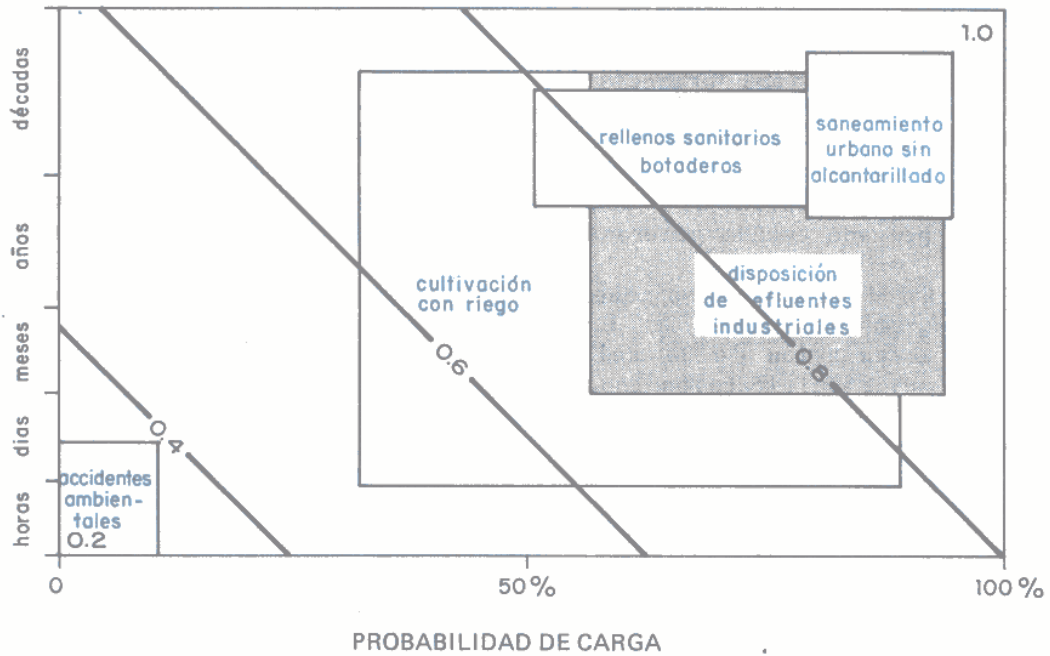
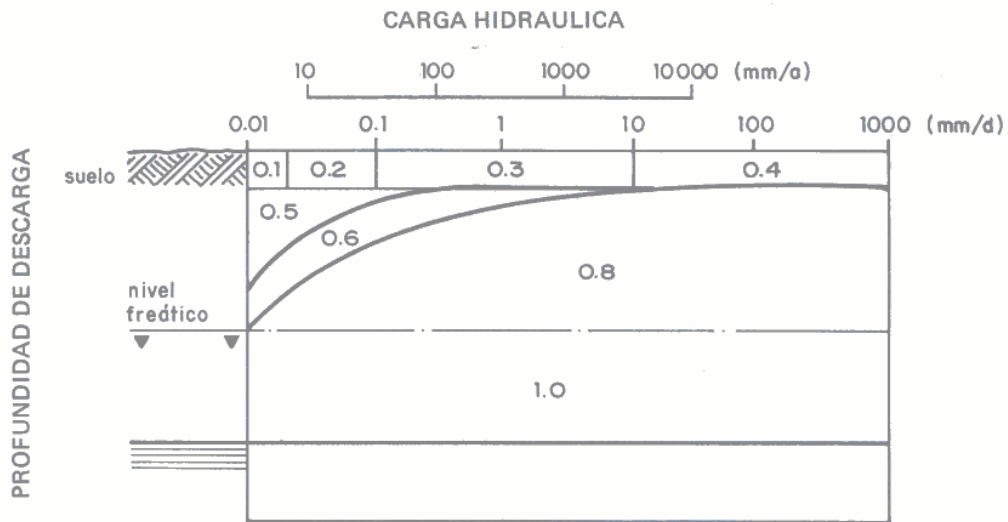


Figura 7

CARACTERIZACION TEORICA DE LOS COMPONENTES DE LA CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO

(A) CLASE DE CONTAMINANTE, (B) INTENSIDAD DE CONTAMINACION



(C) MODO DE DISPOSICION DEL CONTAMINANTE Y (D) DURACION DE LA CARGA CONTAMINANTE

En cada caso se indica un índice comparativo del riesgo en ascenso.

3.3.7 En el caso de algunas fuentes difusas de contaminación, se pueden dar estimados semi-cuantitativos de la concentración de ciertos contaminantes persistentes en la recarga del agua subterránea utilizando varias asunciones simplificantes. En el caso de las fuentes puntuales, lo mejor que se puede obtener es un estimado del peligro potencial basado en la clase de contaminantes involucrados y la probable carga hidráulica asociada, dada la incertidumbre acerca de la concentración de contaminantes y su disposición en el subsuelo.

3.4 Determinación de la Carga Contaminante de Fuentes Dispersas

3.4.1 Areas Residenciales Urbanas

- (a) La mayoría de las áreas urbanas presentan un panorama complejo de actividades humanas potencialmente contaminantes de las aguas subterráneas. Es esencial subdividir tales áreas de acuerdo a su manejo de aguas residuales para poder así intentar una evaluación correspondiente a la carga contaminante al subsuelo. Sin embargo, en la práctica, el cambio entre zonas será de forma irregular e inevitablemente la definición de los límites será, en cierta forma, arbitraria.
- (b) La principal preocupación es la carga contaminante al subsuelo asociada con saneamiento sin alcantarillado, como fosas, tanques sépticos y letrinas, en áreas residenciales con una conexión del alcantarillado incompleta o nula. También se debe tomar en consideración que puede existir una industria de servicio en pequeña escala generando una carga potencialmente contaminante.
- (c) Se debe reconocer que los procesos de urbanización ejercen una gran influencia en los mecanismos de recarga del acuífero y la instalación de la red de agua potable y/o de alcantarillado son muy significativos en este respecto.
- (d) En situaciones donde (i) no existe saneamiento básico o (ii) se han desarrollado esquemas de alcantarillado en pequeña escala con tratamiento y disposición inadecuados, existirá algún riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Sin embargo, sin una investigación específica es imposible determinar este riesgo. La carga contaminante al subsuelo asociada con la urbanización disminuirá grandemente si es que el área tiene un buen sistema de alcantarillado bien diseñado y cuidadosamente operado. Puede ocurrir alguna contaminación como resultado de rupturas y fugas de cloacas, lo que es siempre difícil de determinar. Ya que la misma área normalmente estará sujeta simultáneamente a tasas mucho más altas de fugas de la red de agua potable, la dilución será generalmente suficiente para que cualquier problema residual será de escala muy local.

- (e) En estudios de amplia escala no será posible evaluar la carga contaminante al subsuelo generada por urbanización pero se le puede asignar un riesgo potencial a base de (i) la extensión cubierta por alcantarillado y (ii) la densidad poblacional (Cuadro 4A).
- (f) Para estudios más detallados, los factores principales que afectan la escala y el carácter de la carga contaminante al subsuelo por saneamiento in-situ (Lewis et al, 1982; Foster, 1985b) se resumen en el Cuadro 4B. Los principales componentes de la carga son (i) nutrientes y sales, (ii) bacterias patógenas y virus, y (iii) compuestos solubles orgánicos, incluyendo trazas de algunos químicos sintéticos.

Cuadro 4

FACTORES QUE AFECTAN (A) LA CATEGORIA DE PELIGRO POTENCIAL Y
(B) LA CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO DEBIDO A SANEAMIENTO IN-SITU

A. CATEGORIA DE PELIGRO POTENCIAL

DENSIDAD DE POBLACION	COBERTURA DE ALCANTARILLADO		
	alta (>75%)	parcial (25-75%)	mínima (<25%)
baja (<100/ha)	baja	moderada	moderada
media (100-200/ha)	moderada	moderada	alta
alta (>200/ha)	moderada	alta	alta

B. CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO

TIPO DE URBANIZACION	Carga Hidráulica	TIPO DE CONTAMINANTE				
		N	PF	Org	HC	Sal
residencia tradicional	*	***	***	-	-	*
residencia moderna	**	***	**	*	*	*
- con estaciones de gasolina	-	-	-	**	**	-
- con talleres para vehículos	-	-	-	***	***	-
- con industrias de servicio	*	*	*	*	*	*

densidad poblacional	CONCENTRACION DE CONTAMINANTES				
	N	PF	Org	HC	Sal
uso del agua	***	-	-	-	***
otros servicios	*	*	***	***	*
tipo de clima (exceso de lluvia)	***	*	*	*	***
tipo de saneamiento	***	***	**	**	***

N nitrógeno
 PF patógenos fecales
 Org compuestos orgánicos sintéticos
 HC hidrocarburos
 Sal sales

*-**-*** grado de dependencia

- (g) En el primero de estos grupos, es posible hacer un estimado semi-cuantitativo de la concentración (C) en la recarga del agua subterránea para aquellos constituyentes como nitrato y cloro que pueden ser considerados como contaminantes móviles persistentes. El estimado se basa en la ecuación:

$$C = \frac{1000 a Af}{0.36 AU + 10 I}$$

dónde a es el contenido de NO₃-N o Cl en excrementos (4 y 2 kg/cap/a respectivamente).

- (h) Existe gran incertidumbre sobre la proporción del nitrógeno depositado (f) que será oxigenado y lixiviado en la recarga del agua subterránea. Se considera posible un rango de 20-60% (0.2-0.6) (Walker et al, 1973; Kimmel, 1984; Thomson & Foster, 1986). El valor real dependerá del uso de agua per cápita, de la proporción de pérdidas volátiles de compuestos nitrogenados y de nitrógeno que se extraerá durante la limpieza. Todo esto variará con el tipo de instalación involucrada. También puede existir cierta incertidumbre sobre la estimación de la tasa de infiltración natural por exceso de precipitación.
- (i) Sin embargo, es evidente que se presentan problemas de contaminación con nitratos (Figura 8), especialmente donde el uso del agua es bajo y/o la densidad poblacional es alta. Elevadas concentraciones ocurrirán en aquellas regiones áridas con bajo uso de agua per cápita.
- (j) El saneamiento in-situ también ocasiona una carga al subsuelo que contendrá grandes poblaciones de organismos de coliformes fecales (en exceso de 10⁶FC/100 ml) y números variables de organismos patógenos dependiendo en la salud de la población.
- (k) El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas presentado por este componente de carga contaminante dependerá en alto grado del tipo de instalación sanitaria, ya que esto determinará la carga hidráulica asociada y la profundidad de descarga bajo la superficie (Figura 9).
- (l) El impacto en los acuíferos también dependerá principalmente de la densidad poblacional y de la extensión urbana que controlará el potencial de dilución. El clima influirá en la sobrevivencia de patógenos, que durarán más tiempo en condiciones húmedas que en condiciones áridas.
- (m) Los cementerios en que los cadáveres son enterrados en el suelo, son una adicional fuente potencial de contaminación patógena del agua subterránea en áreas residenciales y deberían ser incluidos en el listado de actividades contaminantes (Pacheco, 1986).

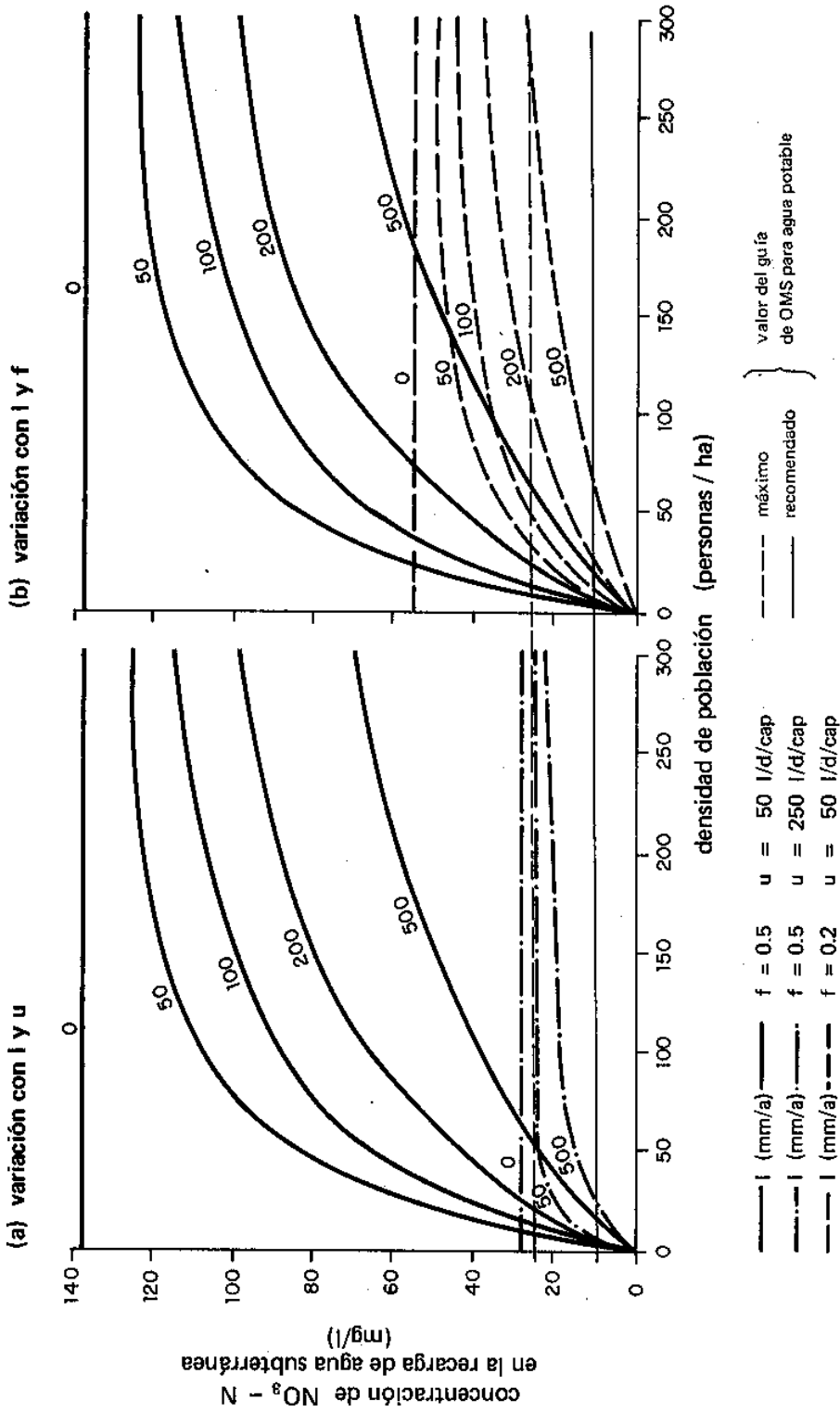


Figura 8

ESTIMACION DE LA CARGA POTENCIAL DE $\text{NO}_3 - \text{N}$ EN LA RECARGA DE AGUAS SUBTERRANEAS EN AREAS DE SANÉAMIENTO IN-SITU

Se demuestra la variación según la densidad poblacional (A en personas/ha), la infiltración por exceso de precipitación (I en mm/a) y la cantidad del desague generado (U en l/d/cap). Se debería notar que en una alta densidad poblacional, las concentraciones pueden ser afectadas por aumentos o disminuciones en I debido a la impermeabilización de la superficie y disposición de aguas de drenaje.

bajos valores en las guías para la calidad de agua potable (donde una pequeña cantidad puede contaminar un gran volumen del acuífero), asociado al gran número de estos servicios en una ciudad y la dificultad, sin una inspección cuidadosa para detectar fugas en los tanques subterráneos y tuberías.

- (q) En áreas urbanas existen innumerables pozos de abastecimiento de agua que han sido abandonados. Si éstos no se han sellado apropiadamente, podrían ser usados ilegalmente como lugar de disposición de residuos, surgiendo de esta manera altos riesgos de contaminación de aguas subterráneas (Figura 8). En consecuencia, estos pozos también tienen que ser registrados en el listado de actividades e instalaciones potencialmente contaminantes.
- (r) Otro problema de una contaminación difusa de aguas subterráneas es la movilización de metales pesados (especialmente cobre y aluminio) como resultado de precipitaciones ácidas causadas por contaminación aérea. Los más susceptibles en este respecto son los acuíferos no calcáreos en extensas áreas viento abajo de grandes ciudades industriales.

3.4.2 Uso Agrícola del Suelo

- (a) El cultivo y manejo agrícola del suelo ejerce una gran influencia en la calidad de las aguas subterráneas y tienen un control muy importante en las tasas de recarga de acuífero.
- (b) Algunas prácticas de uso del suelo son capaces de causar una seria contaminación difusa de las aguas subterráneas por nutrientes y/o pesticidas, especialmente en áreas con suelos de poco espesor, de buen drenado y/o textura arenosa (Foster et al, 1986; Vrba & Romijn, 1986; Lawrence & Foster, 1987), y un aumento de la salinidad de las aguas subterráneas especialmente en las regiones más áridas (Bouwer, 1987). En este subcapítulo se considera la evaluación de estos aspectos, pero no la disposición de efluentes por crianza intensiva de animales que se incluye bajo la agroindustria.
- (c) Los factores que determinan la tasa de lixiviación de compuestos nitrogenados y sales de los suelos cultivados son complejos. Los controles principales son enumerados en la Figura 10. En el Cuadro 6 se da una lista completa de compuestos fertilizantes comúnmente utilizados. El alcance más lógico es considerar el suelo como parte del sistema de producción agrícola, e intentar caracterizar la carga contaminante lixiviada que se infiltra al agua subterránea.
- (d) Varios de los factores son muy difíciles de determinar, especialmente la proporción de drenaje artificial y (en donde se aplique) las tasas de irrigación en exceso. Sin embargo, el factor más desconocido es la cantidad de nitratos y pesticidas

Cuadro 5

CARACTERISTICAS QUIMICAS DE EFLUENTES DE LAVANDERIAS Y TALLERES DE AUTOMOVILES QUE GENERALMENTE SE ENCUENTRAN EN CUALQUIER AREA URBANA (compilado de US-EPA, 1980)

	CONCENTRACIONES ($\mu\text{g/l}$)					
	LAVANDERIAS			TALLERES DE AUTOS		
	max	median	n	max	median	n
Metales						
Arsénico	1,600	11	26	1,560	10	7
Cadmio	520	24	510	26	20	7
Cromo	8,800	131	82	64	30	7
Cobre	11,000	273	89	860	140	7
Cianuro	1,000	34	26	-	-	-
Plomo	22,000	733	84	4,200	510	45
Mercurio	51	1	52	26	4	7
Níquel	2,400	72	61	690	120	7
Selenio	120	1	5	5	5	7
Plata	130	4	20	10	5	7
Cinc	10,000	1,362	108	2,420	590	45
Ftalatos						
Bis(2-etilhexilo)ftalatos	17,500	384	52	1,000	56	4
Di-n-butil ftalatos	820	8	35	15	15	1
Fenoles						
2-4 Diclorofenol	10	nd	5	-	-	-
Pentaclorofenol	9	nd	3	15	14	3
Fenol	10	4	8	-	-	-
Aromáticos						
Benceno	23,400	9	17	-	-	-
Clorobenceno	12	6	2	-	-	-
Diclorobenceno	1,100	4	5	-	-	-
Etilbenceno	17,500	nd	11	-	-	-
Tolueno	50,900	354	36	-	-	-
Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos						
Antraceno	470	4	11	34	34	1
Naftaleno	4,800	8	16	170	170	1
Pireno	1	nd	1	11	11	1
Compuestos Alifáticos Halogenados						
Tetraclorocarbono	1,700	nd	2	-	-	-
Cloroformo	34,600	19	46	83	37	3
Clorometileno	14,700	3	28	640	240	4
1,1,1-Tricloroetano	6,600	435	13	-	-	-
Tricloroetileno	130	nd	15	13	13	1
Tetracloroetileno	93,200	1,669	36	-	-	-

- no analizados
nd no detectados

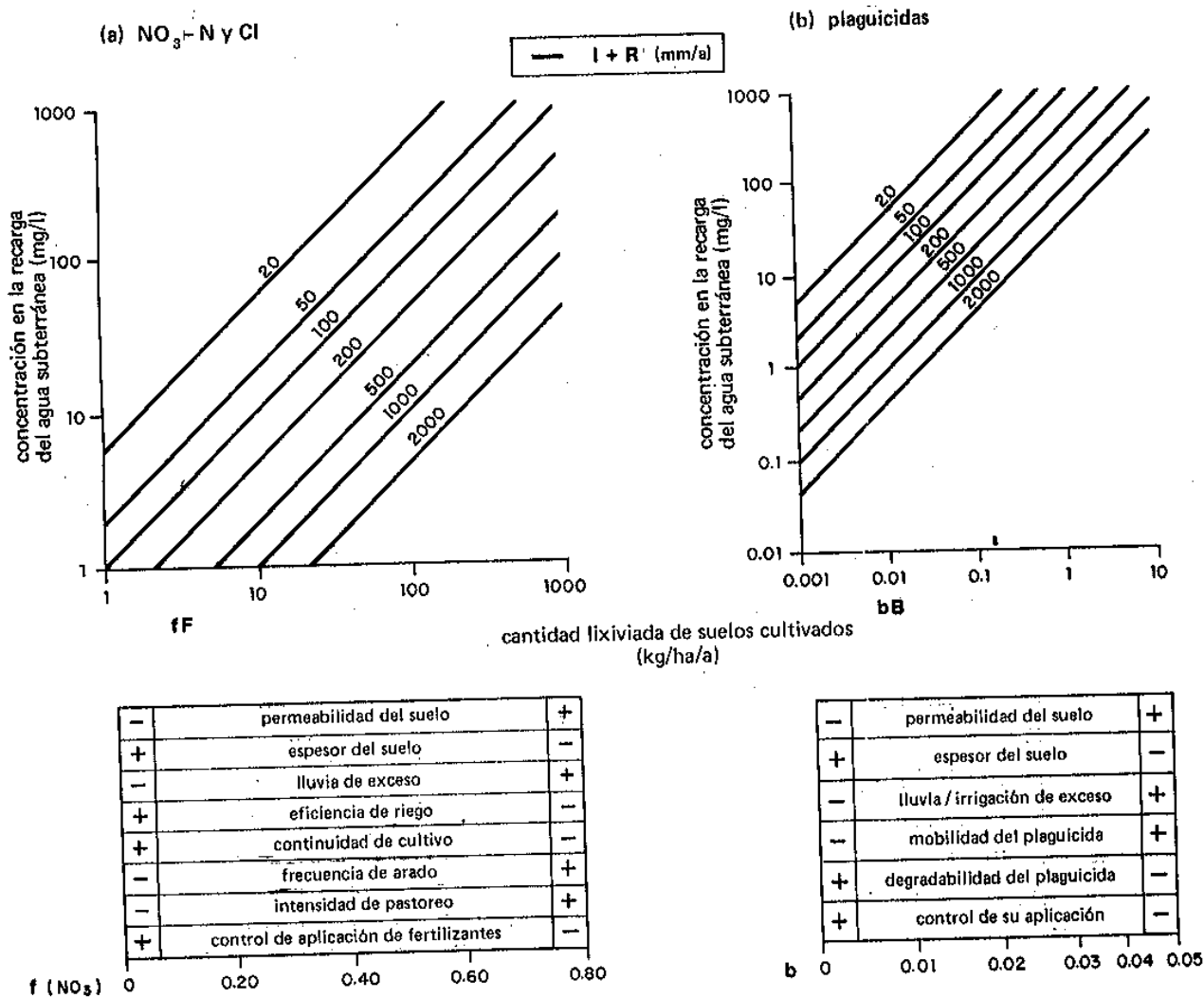


Figura 10

ESTIMACION DE LA CARGA CONTAMINANTE EN LA RECARGA DE AGUAS SUBTERRANEAS BAJO TIERRAS DE CULTIVO

Los principales factores que influyen en el índice de lixiviación de nitratos (f) y de un compuesto pesticida dado (b), también se indican en términos cualitativos. Para cloruros, el valor de f puede ser asumido para que se aproxime a 1.0.

Cuadro 6

RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS PRINCIPALES FERTILIZANTES AGRICOLAS
(compilado de Vrba & Romijn, 1986)

TIPO	ADSORCION EN SUELO	MOVILIDAD EN SUELO		TRANSFORMACION		POSIBLES CONTAMINANTES	
		cation	anion	quím.	bioquím.	cation	anion
DE NITROGENO							
nitrate de calcio	baja, sólo Ca	baja	alta	*		NH ₄	NO ₃ , NO ₂
salitre de amonio	parcial, sólo NH ₄	baja	alta	*		NH ₄	NO ₃ , NO ₂
salitre de sodio	baja, sólo Na,	baja	alta	*		NH ₄	NO ₃ , NO ₂
salitre de potasio	baja, sólo K	baja	alta	*		NH ₄	NO ₃ , NO ₂
salitre de amonio y cal	aumentado NH ₄ y Ca	baja	alta	*		NH ₄	NO ₃ , NO ₂
sulfato de amonio	parcial, sólo NH ₄	baja	media	*		NH ₄	SO ₄
amoníaco líquido	alta NH ₄	baja	alta	*		NH ₄	NO ₃ , NO ₃
agua amoniacal	parcial NH ₄	baja	alta	*	*	NH ₄	NO ₃ , NO ₂
urea	parcial NH ₄	baja	alta	*	*	NH ₄	NO ₃ , NO ₂
cianamida cálcica		baja	alta	*	*	NH ₄	NO ₃ , NO ₂
urea-50/amoníaco-50	parcial NH ₄	baja	alta	*	*	NH ₄	NO ₃ , NO ₂
DE FOSFORO							
superfosfato							HPO ₄
superfosfato gra- nulado	muy alta	extremadamente baja		*			HPO ₄
tri-superfosfato				*			HPO ₄
fosfatos pulverizados				*			HPO ₄
polvo de Thomas				*			HPO ₄
superfosfato simple				*			HPO ₄
+ fosfato crudo				*			HPO ₄
DE POTASIO							
cloruro de potasio	baja, sólo K	baja	alta			K	Cl
cloruro de potasio + sulfato de magnesio	baja, sólo K	baja	alta			K	Cl
kainit	baja, sólo K	baja	alta			K	Cl
sulfato de potasio	baja, sólo K	baja	media			K	Cl
NPK combinado	aumentada	baja	alta	*	*	K	NO ₂ , NO ₃ , PO ₄

lixiviados, que es una función compleja de la interacción entre el régimen climático y de irrigación con el sistema de suelo-cosecha.

- (e) Es conveniente expresar esta lixiviación en términos de proporción de pérdida de peso aplicado; aunque en el caso de los fertilizantes, se debe notar que el nitrato lixiviado se deriva de la acumulación de nitrógeno total en el suelo y solamente una menor parte se deriva directamente del fertilizante aplicado en un año dado. Aún más, en el caso de nutrientes, la lixiviación ocurrirá cuando ningún fertilizante haya sido aplicado y/o el suelo sea barbecho. También puede ser significativa la cantidad de nutrientes lixiviados de la vegetación natural en climas áridos.
- (f) Se pueden obtener estimados muy aproximados y simplificados de la proporción de pérdida de la Figura 10. La concentración C_F (en mg/l) de un contaminante persistente y móvil (como Cl y NO_3) lixiviado de suelos agrícolas se puede expresar por:

$$C_F = \frac{Ff}{100 I}$$

donde I (mm/a) es la infiltración local debido al exceso de precipitación e irrigación y Ff (kg/ha/a) es la tasa de lixiviación del contaminante. Se puede usar un promedio ponderado de C_F donde las diferentes prácticas de cultivo son mixtas especialmente en un área limitada.

- (g) La determinación de Ff causa problemas. En el caso del nitrato se tiene que estimar directamente para una práctica de cultivo dada y para el régimen de suelo-cosecha (Figura 10). Sin embargo, otros factores tales como la sincronización de la aplicaciones del fertilizante y de la irrigación en relación a las necesidades de las plantas pueden reducir la proporción lixiviada. Para el cloruro, la proporción lixiviada (f) puede ser asumida para que se aproxime a 1.0 y F se puede determinar por el contenido de la aplicación total en fertilizante, irrigación y precipitación.
- (h) La producción agrícola que involucra una continua, o ya sea parcial, cubierta del suelo (tales como pastura, foresta y plantaciones de cítricos, azúcar, café, etc.) probablemente ocasionará menos pérdidas que los cultivos discontinuos. Esto es consecuencia de una demanda más continua de nutrientes y menor aeración, con tendencia a impedir la nitrificación. Sin embargo, después de algunos años, se requiere arar la tierra para poder replantar, y en estas ocasiones, pueden ocurrir grandes pérdidas de nitratos.
- (i) Adicionalmente, el pastoreo intensivo de ganado en tierras altamente fertilizadas puede provocar altas tasas de lixiviación de nitratos (en la forma de NH_4 o NO_3), como puede ocurrir

CONFIDENTIAL

también con la aplicación de cantidades excesivas de lodos y excretas de animales, lodos derivados del tratamiento de desagües, vinaza, etc. Ambos efectos, sin embargo, son difíciles de predecir cuantitativamente.

- (j) En la mayoría de los casos, los otros dos principales nutrientes de plantas, fosfato y potasio, no son lixiviados de tierras cultivadas en cantidades significativas, debido a su fuerte retención fisicoquímica en el suelo (Cuadro 6).
- (k) El uso de plaguicidas va en aumento. Mientras que la movilidad relativa y la tasa de degradación en un suelo fértil estándar de muchos de estos pesticidas es publicada (Cuadro 7), la proporción de una aplicación perdida por lixiviación es muy difícil de estimar. Tampoco se dispone de datos correspondientes al comportamiento de estos compuestos a mayor profundidad en el subsuelo, pero es probable que las tasas de degradación se reduzcan ampliamente debido a la gran reducción en las poblaciones bacterianas. Realmente, es aconsejable, en el estado actual de conocimiento, asumir que ninguna biodegradación ocurrirá bajo la base del suelo fértil.
- (l) Se cree que la proporción lixiviada (b) de una aplicación de pesticida (B in kg/ha/a) puede mostrar una variación en el rango 0.5-5.0%, de acuerdo al tipo de compuesto (Cuadro 7), al sistema de suelo-cosecha, al régimen climático y/o de irrigación (Figura 10). En consecuencia, la principal amenaza para la calidad de aguas subterráneas estará asociada con compuestos relativamente móviles, aplicados amplia y regularmente en áreas de afloramiento de acuíferos (Figura 10). Se pueden basar los estimados en una expresión comparable a aquella para nutrientes y sales:

$$C_B = \frac{100,000 Bb}{I}$$

donde C_B es la concentración del pesticida lixiviado en g/l.

- (m) El reuso de aguas residuales para riego en agricultura es una práctica común que va en aumento, especialmente en las regiones más áridas. Si la fuente predominante de irrigación son las aguas residuales, esto resulta en un exceso de nutrientes y sales para los requerimientos de los sembríos. Se puede estimar la concentración resultante de nitrógeno (como NO_3 o NH_4) y cloruro en infiltración (Figura 11). Adicionalmente, existe el riesgo de penetración de patógenos fecales y trazos de compuestos orgánicos bajo ciertas condiciones (Geake et al, 1986).
- (n) Para estudios de amplia escala que cubren grandes áreas de terreno, no será posible considerar la carga contaminante al subsuelo derivado del uso agrícola de los suelos. Se recomienda

RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS PRINCIPALES GRUPOS DE PLAGUICIDAS AGRICOLAS

(compilado de Vrba & Romijn, 1986)

GRUPO QUIMICO	ADSORCION		AFINIDAD CON		SOLUBILIDAD (H ₂ O a 20°-25° C)	PERSISTENCIA EN EL SUELO (mediavida/días)	MOVILIDAD
	MATERIA ORGANICA	ARCILLA	MATERIA ORGANICA	ARCILLA			
I. IONICOS							
Catiónicos	+(d)	+(de)	fuerte	muy fuerte	alta	4000-5000	1
Acídicos	+	-	débil	muy débil	alta a mayor pH	10- 140	5
Básicos	+(cdef)	+(de)	débil	media	alta a bajo pH	25- 400	3
II. NO IONIOS							
Hydrocarburos clorinados	+(bd)	+	muy fuerte	débil	baja	460-1650	1
Organofosfatos	+(bd)	+(c)	muy fuerte	media	moderada	1- 60	1
Anilinas perdurables	+(bd)	+	fuerte	débil	baja	45- 180	1
Feniluros	+(bd)	+(cf)	media	débil	baja a media	120- 400	3
Carbamatos	+(bd)	-(c)	media	débil	moderada	10- 70	3
Amidas	+(bd)	-	débil	muy débil	moderada	30- 70	3
Tiocarbomatos	+(bd)	+	fuerte	media	moderada	30- 220	2
Fenilamidas	+(bd)	-	fuerte	débil	moderada	300- 400	2
Benzonitrilos	+(bd)	+	fuerte	media	moderada	60- 180	2

b afinidad hidrofóbica
 c afinidad hidrógena
 d transferencia de carga
 e intercambio de iones
 f intercambio de ligand

escala de movilidad:

1 = inmóvil
 2 = poco móvil
 3 = móvil
 4 = altamente móvil
 5 = extremadamente móvil

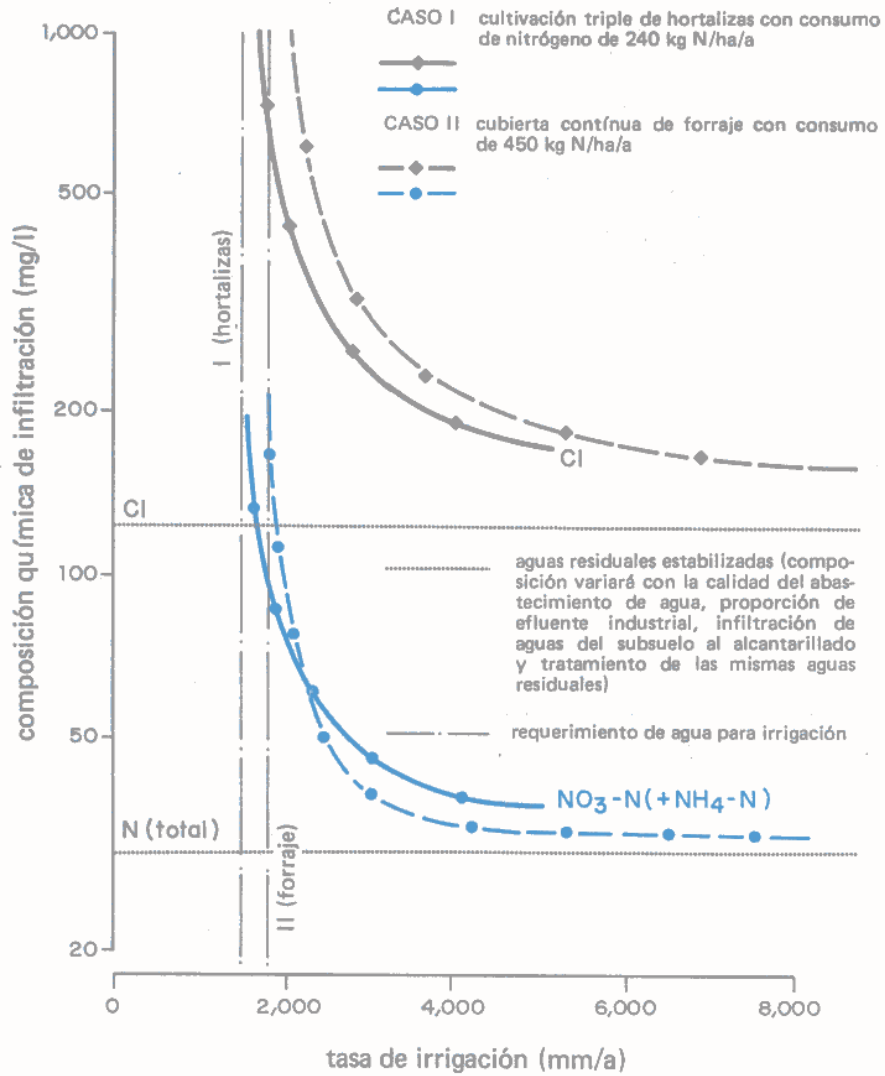


Figura 11

ESTIMACION DE CARGA POTENCIAL DE $\text{NO}_3\text{-N}$ Y Cl EN
LA RECARGA DE AGUA SUBTERRANEA BAJO TIERRAS ARIDAS DE CULTIVO
IRRIGADAS CON AGUAS RESIDUALES
(compilado de Foster, 1985b)

Se asume que el agua residual es la única fuente de irrigación, que las precipitaciones son mínimas, que las cantidades indicadas de N utilizado son las del exceso de N generado por la mineralización en el suelo, y que no hay pérdidas por desnitrificación.

para tales propósitos que se distingan tres niveles de peligro potencial:

- (i) Alto, para las áreas de producción agrícola intensiva y modernizada en suelos bien drenados.
- (ii) Bajo, para cosechas tradicionales o áreas extensas de pastoreo.
- (iii) Moderado, para otros tipos de uso agrícola del suelo.

Para establecer tales categorías será necesario haber hecho una zonificación agroclimática basada en tipos de cosecha, prácticas de irrigación, etc., y una clasificación del suelo a la escala correspondiente.

3.5 Determinación de la Carga Contaminante de las Fuentes Puntuales

3.5.1 Actividad Industrial

- (a) Altas concentraciones de contaminantes y algunas prácticas de disposición hacen que los efluentes y residuos industriales sean de gran importancia en la evaluación de la carga contaminante al subsuelo (Zoetmann et al, 1981; Kimmel, 1984; Cavallar et al, 1985; Guzman-Rios et al, 1986; Lawrence & Foster, 1987). Sin embargo, debido a su extrema diversidad y a los obstáculos comunes para obtener una información precisa sobre los procesos, es difícil generalizar sobre actividades industriales, y prescribir métodos simples y confiables para la caracterización de esta carga.
- (b) Para caracterizar la carga contaminante al subsuelo, se necesita información sobre dos factores: (i) la cantidad del efluente o la parte que llegue al subsuelo y (ii) la calidad de este efluente.
- (c) Generalmente, se estima el volumen del efluente generado por una actividad industrial dada con una adecuada confiabilidad, a partir de la cantidad de agua utilizada, que normalmente se puede obtener por la medición de suministro de agua y/o de la capacidad de rendimiento de pozos de la misma empresa industrial. En la mayoría de las industrias, aparte de las que manufacturan productos líquidos, esto dará un estimado confiable del volumen total del efluente porque el consumo es menor. En el Cuadro 8 se dan ejemplos ilustrativos de la generación de efluentes.
- (d) Sin embargo, es mucho más difícil establecer qué proporción del efluente total infiltrará al subsuelo, ya sea accidental, incidental, o deliberadamente. Si la industria estuviera localizada en un área sin alcantarillado, entonces es probable que toda la disposición del efluente vaya directamente al suelo, a menos que haya una evidencia definitiva de que los efluentes

Cuadro 8

RESUMEN DEL VOLUMEN DE EFLUENTES INDUSTRIALES Y REQUERIMIENTOS PARA SU TRATAMIENTO EN EL GRAN SAO PAULO EN 1977

(datos no publicados de CETESB, Sao Paulo, Brasil)

INDUSTRIA		VOLUMEN DEL EFLUENTE			TRAT. DEL EFLUENTE		
N°	CLASE	N° Estudio	Industrial (m ³ /d)	Sanitario (m ³ /d)	Propn Total a Desagues	N° en Estudio	Prop Necesitando
2	Procesamiento de metales	131	667	55	47%	45	78%
4	Metales no ferrosos						
3	Ingeniería mecánica	87	237	232	25%	44	75%
5	Minerales no metálicos	16	207	114	19%	11	55%
7	Productos plásticos	6	50	73	50%	3	67%
8	Productos de caucho	4	883	380	50%	2	100%
9	Químicos orgánicos	71	1744	57	23%	30	77%
10	Químicos inorgánicos						
11	Farmacéuticos	40	143	28	60%	21	48%
12	Aserraderos	6	38	27	33%	1	100%
13	Pulpa & papel	29	7484	49	17%	19	79%
14	Jabón & detergentes	8	46	28	50%	2	100%
15	Producción de textiles	108	508	40	68%	79	87%
17	Alimentos & bebidas	82	470	38	54%	36	78%
22	Eléctricos & electrónicos	44	121	105	39%	18	83%
0	Miscellaneous	38	55	29	61%	12	75%

* tratamiento (o tratamiento adicional) necesitado en relación con descarga en el alcantarillado u otro cuerpo receptor de agua, no específicamente en las aguas subterráneas.

concentrados están siendo transportados fuera del lugar. Si el área industrial goza de alcantarillado, será necesario solicitar a las autoridades respectivas que establezcan si la descarga por alcantarillado se limita a los efluentes sanitarios o si también incluye efluentes de procesos industriales. Si la zona industrial está localizada a lo largo del río, será probable que las descargas se hagan en las aguas superficiales.

- (e) Esta sección concierne, primeramente, a la disposición del efluente industrial. Sin embargo, muchas industrias utilizan lagunas para el almacenamiento o concentración de líquidos y efluentes, y en algunos casos disponen sus residuos sólidos en el mismo lugar. Las fugas de tanques y tuberías de sustancias tóxicas, como los drenajes de patios industriales contaminados, son también fuentes comunes de contaminación de las aguas subterráneas. Es más conveniente considerar estos aspectos como parte de la actividad industrial pero la determinación del riesgo asociado es compleja y se considera fuera del enfoque de esta metodología ya que requiere de una inspección detallada del lugar sobre las prácticas de manejo y manipuleo de químicos. Sin embargo, los tipos de químicos presentes en una zona industrial dada se puede juzgar por la información presentada.
- (f) Se debe enfatizar que, en el caso de la carga contaminante al subsuelo, no son necesariamente las industrias más grandes y sofisticadas las que presentan la máxima carga contaminante al subsuelo y el más alto riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Esto es porque el manipuleo de químicos y efluentes, y las prácticas de su disposición, se controlan y monitorean cuidadosamente. De igual o mayor preocupación son las pequeñas empresas ya que ellas están ampliamente diseminadas y a menudo usan cantidades considerables de contaminantes tóxicos y sus prácticas de disposición de efluentes están poco controladas. Así como, plantas que tratan sus efluentes, no están exentas de problemas de contaminación del agua subterránea, ya que el almacenamiento de sustancias peligrosas puede generar cargas importantes hacia el subsuelo, en un accidente.
- (g) La estimación de la calidad del efluente, o la parte de los fluidos de procesos o efluentes industriales que probablemente son descargados al subsuelo, presentan considerables problemas por:
 - (i) La gran variedad de actividades industriales.
 - (ii) La considerable variación en el nivel tecnológico de cualquier industria.
 - (iii) La extrema y errática variación temporal en las concentraciones de constituyentes tóxicos en los efluentes industriales.
 - (iv) La amplia variación en el uso y eficiencia de los procesos de tratamiento para efluentes industriales, y la incertidumbre sobre su efectividad en la remoción de contaminantes potenciales de las aguas subterráneas.

- (v) La falta de un control de calidad y de análisis químicos de efluentes, incluyendo concentraciones de metales pesados y compuestos sintéticos orgánicos.
 - (vi) La falta de una adecuada información publicada sobre las características de efluentes para industrias representativas, especialmente aquellas que funcionan en economías en desarrollo.
 - (vii) La amplia variedad de modos de manipuleo y disposición de líquidos y efluentes industriales, incluyendo la frecuente adopción de prácticas clandestinas.
- (h) A pesar de estas limitaciones, se cree que efluentes no tratados pueden caracterizarse en términos no cualitativos con datos publicados (Lund, 1971; Nemerow, 1971) para las principales 22 categorías de industria (Cuadro 9). Se puede ilustrar la frecuencia relativa de tales categorías de industria con datos del estudio de la actividad industrial en el estado de Sao Paulo, Brasil (Cuadro 8).
- (i) Aunque mucho ha sido publicado sobre procesos de tratamiento de efluentes industriales (Lund, 1971; Nemerow, 1971; Eckenfelder, 1976), no es fácil indicar mediante la información existente, a cuánto serán reducidas las concentraciones de contaminantes por una práctica dada de tratamiento (Cuadro 10). Para propósitos actuales es probablemente realista asumir que si se practica un avanzado tratamiento terciario, la concentración de contaminantes potenciales de aguas subterráneas en el efluente final será mínima. Sin embargo, en todos los otros casos, se debe asumir que concentraciones significativas estén presentes.
- (j) Entre los métodos de disposición de efluentes industriales, los pozos de inyección muy profundos son un ejemplo en que la disposición final va deliberadamente al subsuelo. Esta práctica involucra riesgos de contaminación para cualquier acuífero a través del cual están perforados los pozos de inyección. La contaminación puede ocurrir debido a fugas a través de (o detrás de) los revestimientos de los pozos. Sin embargo, la eficacia del diseño y construcción de un pozo profundo de inyección puede establecerse solamente por pruebas especializadas.
- (k) Una clasificación tentativa de actividades industriales en relación con su riesgo relativo para la contaminación de las aguas subterráneas, se puede basar en el tipo de industria y volumen de agua usada (Cuadro 11). Además para esta clasificación, se debe tomar en consideración ocurrencias de casos de contaminación de agua subterránea en la planta y si hay manejo de cantidades apreciables de sustancias peligrosas (hidrocarburos, metales pesados, solventes organo-sintéticos). Para cualquier caso, el índice debe ser ALTO. Las prácticas de manipuleo de químicos en la industria, el tratamiento de efluentes y los manejos de disposición no son considerados, tomando en cuenta su dificultad de establecer por estudios superficiales.

Cuadro 9

RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS QUIMICAS E INDICES PARA TIPOS
COMUNES DE ACTIVIDAD INDUSTRIAL

(compilado de BNA, 1975; DMAE, 1981; Hackman, 1978; Luin & Stackenburg, 1985;
Nemerow, 1963 & 1971; Mazurek, 1979; EPA, 1977 & 1980 y OMS, 1982;
y otros informes menores no publicados)

ACTIVIDAD INDUSTRIAL	Indice de Mazurek	Flujo ¹ (m ³ /T)	Carga de		Contenido de						Indice Cont. Potencial Aguas Subterráneas
			pH	Salinidad	Nutrientes	Materia Orgánica	Hidrocarburos	Patógenos	Metales Pesados	Orgánicos Sintéticos	
1. Hierro & acero	6	30	6	*	*	**	**	*	**	**	2
2. Proces. de metales	8	-	7-10	*	*	*	*	*	***	***	3
3. Ingeniería mecánica	5-8	-	-	*	*	*	***	*	***	**	3
4. Metales no ferrosos	7	-	-	*	*	*	*	*	***	*	2
5. Minerales no metál.	3-4	30	-	***	*	*	*	*	*	*	1
6. Ref. petróleo/gas	7-8	-	-	*	**	***	***	*	*	**	3
7. Productos plásticos	6-8	104	-	***	*	**	**	*	*	***	3
8. Productos de caucho	4-6	1	-	**	*	**	*	*	*	**	2
9. Químicos orgánicos	3-9	92	7	**	*	**	***	**	**	***	3
10. Químicos inorgánic.	6-9	115	-	**	*	*	*	*	***	*	2
11. Farmacéuticos	6-9	4000	-	***	**	***	*	**	*	***	3
12. Carpinterías	2-4	1	-	**	*	**	*	*	*	**	1
13. Pulpa & papel	6	108 ^o	8	*	**	**	*	*	*	**	2
14. Jabón & detergentes	4-6	5	-	**	*	**	**	**	*	*	2
15. Fáb. de textiles	6	400	-	**	**	***	*	*	*	**	2
16. Curtiembres	3-8	37	-	***	**	**	*	*	**	***	3
17. Alimentos/bebidas	2-4	-	-	**	***	***	*	***	*	*	1
18. Plaguicidas	5-9	30	-	**	*	*	*	*	*	***	3
19. Fertilizantes	7-8	6	-	***	***	*	**	*	*	**	2
20. Azúcar & alcohol	2-4	62	-	***	***	***	**	*	*	*	2
21. Termoeléctricas	-	-	-	*	*	*	***	*	***	**	2
22. Eléctricos & electrónicos	5-8	-	-	*	*	*	***	*	**	***	3

¹ valor máximo del promedio
datos no disponibles

* baja probabilidad de concentraciones elevadas
** moderada en líquidos de proceso y/o efluente final
*** alta

Cuadro 10

RESUMEN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES Y SU
CAPACIDAD PARA REDUCIR GRUPOS ESPECIFICOS DE CONTAMINANTES
(compilado de Lund, 1971)

PROCESO DE TRATAMIENTO	Clasificación	Estatus de Desarrollo (b)	Capacidad de Eliminar										
			Fosfatos	Nitrógeno	Metales Pesados	Cromo	Cianuros	Materia Orgánica	Aceites	Fenoles	Plaguicidas	Orgánicos Sintéticos	
Oxidación o reducción química	3°	E				X	X				X		X
Sedimentación	1°	C								X			
Clarificación	1°(a)	C	X		X	X			X	X			
Flotación	1°	C								X			
Filtración	2°-3°	C			X								
Intercambio de iones	3°	E	X	X	X	X					X		?
En lagunas	2°	C	X	X					X	X	X		
Rotura de emulsión	1,2,3°	E								X			?
Adsorción	3°	E							X		X	X	X
Biológica	2°-3°	C	X	X					X		X		?
Incineración directa	2°-3°	E						X	X	X	X		X
Drenaje de sedimentos	2°	E			X				X	X	X		X
Desalinización	3°	D	X	X									

X atenuación efectiva de contaminantes del grupo correspondiente
(a) si la clarificación química es 3°
(b) D = en desarrollo; E = establecido; C = uso común

Cuadro 11

CATEGORIAS DE PELIGRO POTENCIAL PARA EL AGUA SUBTERRANEA
DEBIDO A ACTIVIDADES INDUSTRIALES

Las clases 1, 2 y 3 se refieren al índice de peligro potencial para las aguas subterráneas (ver Cuadro 9).

USO DEL AGUA (m ³ /d)	INDICE DE PELIGRO POTENCIAL PARA LAS AGUAS SUBTERRANEAS		
	1	2	3
100	bajo	moderado	alto
100 - 1000	bajo	moderado	alto
1000	moderado	alto	alto

- (1) Sin embargo, se debe re-enfatizar que la determinación de la carga contaminante al subsuelo procedente de las actividades industriales, en el estado actual de conocimiento, es la más incompleta e insatisfactoria de todos los aspectos de esta guía.

3.5.2 Lagunas de Efluentes

- (a) Está muy difundido el uso de lagunas para el almacenamiento, manipuleo, evaporación, sedimentación y oxidación de efluentes, derivados de sistemas de alcantarillado municipal o de actividades industriales, agroindustriales o mineras. Es mejor considerar lagunas pequeñas o estanques que se forman dentro de locales industriales y que están íntimamente ligados a los procesos industriales como parte del último y no por separado.
- (b) La gran mayoría de lagunas tienen una base de materiales naturales, impermeabilizados a cierto grado como resultado de la compactación del suelo y de la sedimentación. No obstante, tales condiciones normalmente permiten infiltración equivalente a 10-20 mm/d y por lo que las lagunas son una causa frecuente de contaminación de aguas subterráneas (Miller & Scaif, 1974).
- (c) Ningún material de costo razonable, disponible en la actualidad, permanece impermeable por largos períodos, especialmente si las lagunas contienen químicos corrosivos o son limpiadas intermitentemente. Así, se debe esperar alguna fuga en lagunas revestidas, aunque a tasas más bajas que aquellas arriba indicadas.
- (d) La mayoría de las lagunas son poco profundas pero pueden ocupar áreas extensas. Su período de retención de líquidos varía ampliamente en el rango de 1-100 días, dependiendo de su función.

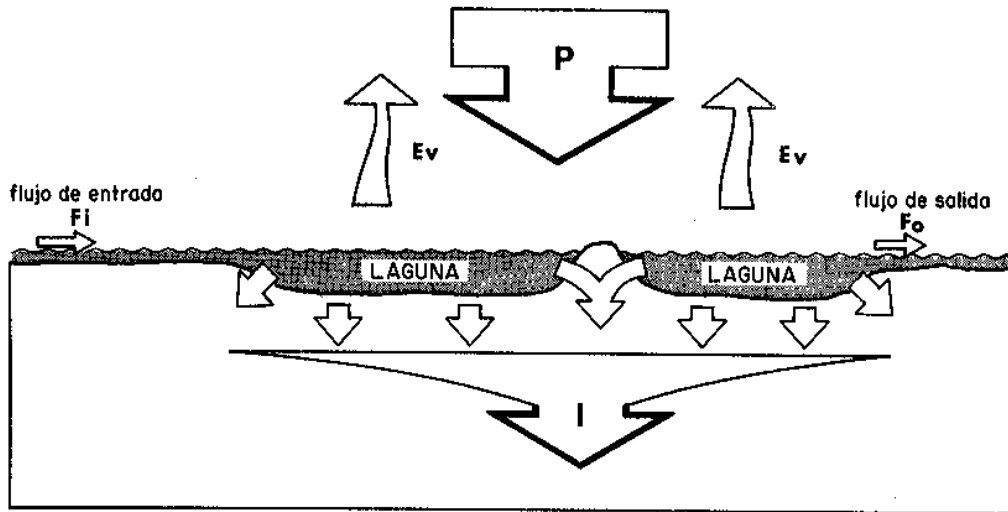


Figura 12

ESQUEMA DEL BALANCE HIDRAULICO DE UNA LAGUNA DE EFLUENTES

Aún si las lagunas tuvieran una base impermeable, la filtración podría ser considerable, especialmente bajo las bermas.

- (e) Para caracterizar la carga contaminante al subsuelo generada por la presencia de tales lagunas, es necesario considerar dos factores semi-independientes:
 - (i) La cantidad del líquido descargado en la laguna.
 - (ii) Su calidad y cualquier cambio en la concentración de contaminantes que puede ocurrir durante la infiltración.
- (f) La estimación de la infiltración de una laguna (o su carga hidráulica asociada) puede hacerse considerando el balance hidráulico del sistema (Figura 12) en la que la infiltración (I) se expresa por:

$$I = F_i + P - E_v - F_o$$

donde F_i y F_o son las entradas y salidas del efluente a la laguna, P la precipitación y E_v la evaporación libre, todos en unidades compatibles (mm/d o mm/a).

- (g) En un sistema operacional, se encontrará a menudo dificultad para obtener las cifras relevantes. Un método más preciso es el de tomar medidas directas de los niveles de la laguna, durante períodos cuando las entradas son insignificantes y la evaporación mínima (normalmente durante la noche). Sin embargo, esto sólo se podrá realizar cuando sea posible un acceso y control del lugar.
- (h) La caracterización de la calidad de los líquidos infiltrantes de una laguna no es tarea fácil. En el caso de empresas industriales, agroindustriales o mineras, sería razonable asumir que los líquidos contienen muchos de los contaminantes normalmente asociados con la correspondiente actividad.
- (i) En el caso de efluentes industriales, éstos son resumidos en la sección respectiva de este informe. Sin embargo, probablemente exista una fuerte retención de muchos contaminantes por los sedimentos de la laguna, especialmente patógenos y metales pesados, aunque estos últimos pueden ser móviles bajo algunas condiciones hidroquímicas.
- (j) Las lagunas de estabilización de aguas residuales municipales normalmente contienen grandes cantidades de materia orgánica natural, grandes poblaciones de patógenos y altas concentraciones de nutrientes. Normalmente también incluirán efluentes de industrias de pequeña escala (tales como talleres de automóviles, lavanderías, tintorerías, procesadoras fotográficas, etc.), los que contribuirán algunos compuestos orgánicos sintéticos, como solventes y desinfectantes.
- (k) Si las aguas residuales municipales incluyen efluentes de extensas áreas industriales, se pueden prever concentraciones mucho mayores de sustancias tóxicas y/o de elevada salinidad. Algunos de estos compuestos que probablemente estén presentes, también pueden ser identificados desde la sección de actividades industriales de este informe.
- (l) En términos cualitativos, sería posible evaluar el nivel de tratamiento en lagunas de aguas residuales municipales (Yanez, 1982) y, de esta manera, la calidad resultante de la carga contaminante al subsuelo (Kehew et al, 1984; Geake et al, 1988). En el Cuadro 12 se indica el comportamiento de los principales grupos de contaminantes. Se ha verificado la capacidad para la remoción de metales pesados bajo condiciones anaeróbicas (Hussainy, 1978) (Cuadro 13).
- (m) También en el caso de lagunas será difícil determinar la carga contaminante al subsuelo sin investigación y monitoreo en campo. Se presenta una clasificación de peligro potencial (Cuadro 14), basada en los factores más fácilmente determinados. El grado en que este peligro se concretice en la práctica, dependerá de los detalles operacionales y de construcción de la laguna involucrada.

Cuadro 12

COMPARACION ENTRE LA CALIDAD DEL EFLUENTE Y LA INFILTRACION AL AGUA SUBTERRANEA EN UNA INSTALACION PARA REUSO DE AGUAS RESIDUALES EN LIMA, PERU (compilado de Geake et al, 1986)

Determinante	Desagüe Crudo	Agua en Zona No Saturada bajo Laguna (prof 10 m)+	Efluente Lagunas Secundarias	Agua en Zona No Saturada bajo Tierra Cultivada (prof 10 m)+	Agua en Zona No Saturada bajo Arboles (prof 10 m)+
EC (µS/cm)	1080	991	1050	1245	1343
Cl	115	182	116	168	194
N Total	46	10*	31	21*	29*
NH ₄ -N	29	8	20	1	1
NO ₃ -N	1	2	1	20	28
SO ₄	240	29	231	196	269
Ca	302	45	318	121	138
Mg	80	17	69	26	51
Na	64	90	61	85	93
K	15	20	15	14	13
P (total)	4.4	nd	3.3	nd	nd
P (soluble)	3.1	bd1	1.4	0.9	0.24
TOC	170°	6	110	6	10
Detergente ABS	1.6	2.0	1.7	0.3	0.7
=====					
Coliformes fecales	10 ⁷⁻⁸	20	10 ⁵⁻⁶	10 ²	50
Estreptococos fecal	10 ⁶⁻⁷	10	10 ⁴⁻⁵	10 ²	50
Salmonella	10 ³⁻⁴	bd1	10 ⁰⁻¹	bd1	bd1
Rotavirus humano	10 ³⁻⁵	bd1	10 ²⁻⁵	10 ⁴	bd1

concentraciones promedio de todos los análisis disponibles
análisis químicos expresados en mg/l excepto EC

concentraciones microbiológicas expresadas como MPN/100 ml o su equivalente
para evitar los efectos de concentración por evaporación

- + se asume como total de NH₄-N y NO₃-N
- * bajo límite de detección
- ° datos inciertos
- nd no determinado

Cuadro 13

REMOCION DE METALES PESADOS DE EFLUENTES MUNICIPALES DURANTE SU
TRATAMIENTO EN LAGUNAS DE ESTABILIZACION
(compilado de Hussainy, 1978)

METAL	PUNTO DE MUESTREO	Rango	Porcentaje de Remoción
Cobre	Influyente	0.23 -0.47	
	Laguna anaeróbica	0.06 -0.19	75-78
	Laguna facultativa	0.03 -0.06	89
	Efluente final	0.01 -0.04	95-97
Cadmio	Influyente	0.003-0.018	
	Laguna anaeróbica	0.001-0.006	70
	Laguna Facultativa	0.001-0.006	70
	Efluente final	0.001-0.006	70
Cinc	Influyente	0.54 -2.27	
	Laguna anaeróbica	0.13 -0.29	81-83
	Laguna facultativa	0.04 -0.23	92-93
	Efluente final	0.01 -0.08	96-97
Níquel	Influyente	0.10 -0.28	
	Laguna anaeróbica	0.03 -0.22	41-47
	Laguna facultativa	0.02 -0.11	59-70
	Efluente final	0.03 -0.08	65
Plomo	Influyente	0.04 -1.74	
	Laguna anaeróbica	0.02 -0.17	86-90
	Laguna facultativa	0.02 -0.19	91-95
	Efluente final	0.01 -0.07	95
Cromo	Influyente	0.15 -1.00	
	Laguna anaeróbica	0.06 -0.33	47
	Laguna facultativa	0.06 -0.18	71-74
	Efluente final	0.03 -0.07	86-87
Hierro	Influyente	1.50 -8.48	
	Laguna anaeróbica	0.42 -1.31	82-85
	Laguna facultativa	0.23 -0.54	90-92
	Efluente final	0.33 -2.00	64-87

Cuadro 14

CATEGORIZACION DE PELIGRO POTENCIAL PARA AGUAS SUBTERRANEAS
PROCEDENTES DE LAGUNAS DE EFLUENTES

ORIGEN DEL EFLUENTE	AREA DE LAGUNAS (ha)		
	1	1 - 5	> 5
MUNICIPAL - sólo residencial - residencial e industrial	bajo bajo	bajo moderado	moderado alto
MINERA - metalífera - no metalífera	moderado bajo	moderado moderado	alto moderado
INDUSTRIAL Índice de peligro potencial para las aguas subterráneas (ver Cuadro 9)			
- 1. (incl agroindustria)	bajo	moderado	moderado
- 2.	moderado	moderado	alto
- 3.	alto	alto	alto

(e) Existe una clasificación de tres clases para residuos sólidos industriales (CETESB, 1985).

3.5.3 Disposición de Residuos Sólidos

- (a) Un residuo sólido puede ser definido como cualquier sustancia desechable que no tiene suficiente consistencia para fluir por sí mismo, no siendo útil en su forma original o para el proceso en que fue generado.
- (b) Una estimación global de la tasa anual de generación de desechos en la Región de América Latina y el Caribe en 1984, dio como resultado las siguientes cantidades para los sectores respectivos: agrícola, 214 MT/a; minera, 188 MT/a; municipal, 50 MT/a e industrial, 32 MT/a.
- (c) La disposición de residuos sólidos es una fuente importante de carga contaminante al subsuelo (Miller & Scalf, 1974; Cherry, 1983). Se debe considerar lo siguiente:
 - (i) Cantidad de lixiviado : que será una función del contenido de humedad del residuo y su modo de disposición en el ambiente.
 - (ii) Composición del lixiviado : que será relacionado al origen del residuo involucrado.

(d) Los principales factores responsables para la generación del lixiviado se detallan en el Cuadro 15A. Este cuadro da también una clasificación simple de residuos por origen e indica la presencia potencial de contaminantes con base en cinco parámetros.

(e) Existe una clasificación de tres clases para residuos sólidos industriales (CETESB, 1985):

(i) Clase I: Peligrosos, desechos (o mezcla de desechos) que son inflamables, corrosivos, reactivos, tóxicos o patógenos y que presentan riesgos para la salud pública cuando son manipulados y dispuestos inadecuadamente.

(ii) Clase II: Residuos reactivos que no pertenecen ni a la Clase I ni a la Clase III.

(iii) Clase III: Inertes, sólidos o de baja solubilidad, que generan un lixiviado dentro de las concentraciones permisibles para el agua potable.

(f) La mayor dificultad en la determinación de la carga contaminante generada por una disposición inadecuada de residuos sólidos, es la falta de información confiable sobre la composición de los residuos. Aún en muchos casos, el origen del residuo se desconoce. Este problema es más agudo en lugares donde una disposición clandestina de residuos ha sido o está siendo practicada. Un mayor problema adicional es que en algunos sitios aprobados para la disposición de desechos, las recomendaciones para una disposición sanitaria pueden no haber sido, o no han sido implementadas.

(g) El volumen probable de lixiviado (L) (Figura 13) puede ser estimado en base a la percolación del agua a través del suelo que puede ser expresado por:

$$I = P + R + ES_1 - ES_0 - Ev_v - \Delta S$$

donde I = infiltración (mm/a), P = precipitación (mm/a), R = irrigación (mm/a), ES_1 , ES_0 = escorrentía de agua superficial (i=entrada, o=salida), Ev_v = evapotranspiración real, ΔS = el cambio en la humedad del suelo que puede ser generalmente tomada como igual a cero en balances de períodos largos.

(h) El volumen de lixiviado (L) (Figura 13) será una función de la infiltración (I), el contenido y la retención de humedad del residuo y (ΔB):

$$L = I \pm \Delta B$$

(i) Las dificultades en el estimado del volumen de lixiviado (L) se pueden reducir por varias simplificaciones. Se puede asumir que la humedad del drenaje en residuos municipales es del 40%-50% de su peso. En climas áridos los residuos municipales pueden ser la

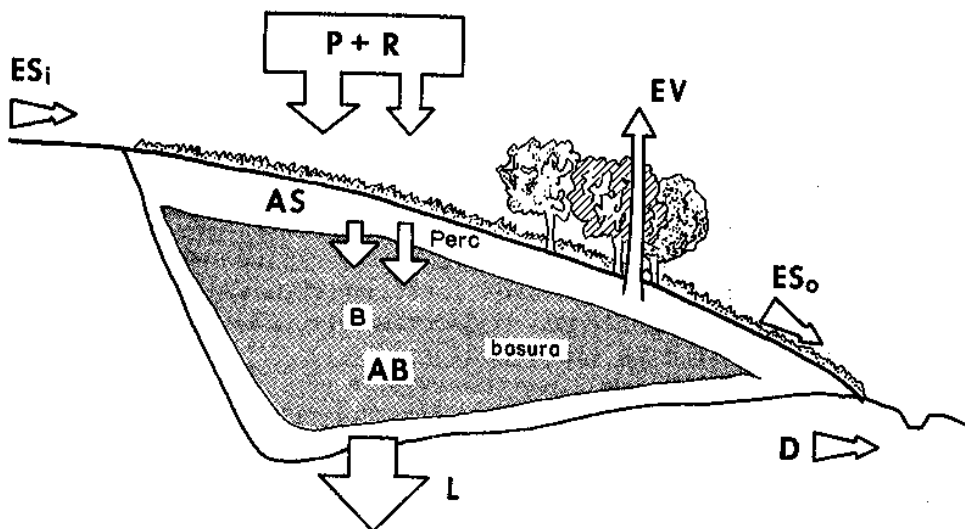


Figura 13

ESQUEMA DEL BALANCE HIDRAULICO DE UN RELLENO SANITARIO

En la práctica se pueden ignorar o simplificar numerosos parámetros para alcanzar una estimación aproximada del volumen de lixiviado (L).

única, pero aún significativa, fuente de lixiviado. Además, en lugares sin una cobertura efectiva del suelo, puede asumirse (CETESB, 1985) que el 25%-50% de P se infiltrará y será lixiviado.

- (j) La composición del lixiviado dependerá del tipo de material del residuo, o en la asociación de materiales residuales en casos donde ocurran reacciones químicas dentro del mismo. Si el origen del material del residuo es conocido, es posible hacer un estimado aproximado de la composición del lixiviado. La mayoría de los residuos municipales contiene solamente pequeñas cantidades de materiales peligrosos y el Cuadro 16 muestra composiciones típicas de lixiviado basadas en datos para ciudades norteamericanas.

Cuadro 15

PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN (A) LA CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO Y
(B) LA CATEGORIA DE PELIGRO POTENCIAL PARA AGUAS SUBTERRANEAS EN LUGARES
DE DISPOSICION DE RESIDUOS SOLIDOS AL SUELO

A. CARGA SUBTERRANEA CONTAMINANTE

DESCRIPCION DEL LUGAR	VOLUMEN REL. DE LIXIVIADO				
	1	2	3	4	5
extensión				***	
antigüedad				*	
cantidad de desecho				**	
contenido de humedad del desecho				*	
precipitación, irrigación y evaporación				***	
topografía, escorrentía superficial				**	
métodos operacionales (compactación, cubierta, etc.)				**	
características de construcción (impermeabilización de la base y/o superficie)				***	
TIPO DE RESIDUO	1	2	3	4	5
Origen	metales pesados	compuestos orgánicos sintéticos	nutrientes	sales	patógenos fecales
Industrial					
Clase I (peligrosos)	***	***		***	***
Clase II (no inertes)	*	*	**	***	**
Clase III (inertes)					
Municipal	*	*	**	***	***
Desconocido	? ***	? ***	? ***	? ***	? ***

B. CATEGORIA DE PELIGRO POTENCIAL

	LLUVIA ANUAL (mm/a)		
	< 200	200-1000	> 1000
MUNICIPAL			
sólo residencial	bajo	bajo	moderado
incl hospitales	bajo	moderado	alto
incl industria	bajo	moderado	alto
INDUSTRIAL			
(índice potencial de contaminación de aguas subterráneas/ Cuadro 9)			
1. incl agroindustria	bajo	bajo	moderado
2.	bajo	moderado	alto
3.	moderado	moderado	alto
desconocido	bajo	alto	alto

- (k) Los residuos sólidos de origen industrial son los que contienen la proporción más alta de constituyentes tóxicos. El Cuadro 9 muestra los químicos peligrosos probablemente derivados de los principales grupos industriales. Sin embargo, la amplia variación en los procesos de producción industrial complica y reduce la confianza en cualquier estimación.
- (l) Se considera esencial una investigación detallada y un monitoreo a largo plazo para establecer el riesgo de contaminación del agua subterránea en lugares donde se ha practicado o se pueda practicar la disposición de residuos muy peligrosos y especialmente, residuos radioactivos.
- (m) Muchos lixiviados presentarán muy bajo pH y Eh como resultado de altas cargas ácidas y orgánicas. Esto aumentará grandemente la movilidad de metales pesados y reducirá la probabilidad de biodegradación de compuestos orgánicos sintéticos. Si el lugar de la disposición de residuos está sobre rocas calcáreas, la lixiviación acídica será neutralizada y la movilidad de estos compuestos será reducida.
- (n) Si los lugares de disposición de residuos están adecuadamente localizados, construidos y manejados (e.g. usando diseños estándares de relleno sanitario con una base impermeable y cubierta del residuo, junto con drenaje de agua superficial) y de monitoreo de aguas subterráneas, éstos generan una pequeña carga al subsuelo, poco voluminosa y poco peligrosa.
- (o) Sin embargo, la disposición de residuos en botaderos de basura o en rellenos sin control en áreas excavadas, a menudo causarán una carga contaminante al subsuelo con alto riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, especialmente en lugares donde la napa freática está en contacto directo con el residuo.

Cuadro 16

RANGO DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LIXIVIADOS EN VARIOS LUGARES
DE DISPOSICION DE DESECHOS MUNICIPALES
(compilado de Cartwright, 1984 and Steiner et al, 1971;
los rangos A,B,C,D se refieren a varios lugares
de Estados Unidos señalados por diferentes autores)

CONSTITUYENTE	COMPOSICION LIXIVIADO (mg/l)				
	rango A	rango B	rango C	rango D reciente antiguo	
Cloruro	34-2,800	100-2,400	600-800	742	197
Hierro	0-5-5,500	200-1,700	210-325	500	2
Manganeso	0-1,400	--	75-125	49	--
Cinc	0-1,000	1-135	10-30	45	< 1
Magnesio	17-15,600	--	160-250	277	81
Calcio	5-4,080	--	900-1,700	2,136	254
Potasio	3-3,770	--	295-310	--	--
Sodio	0-7,700	100-3,800	450-500	--	--
Fosfato	0-154	5-130	--	7	5
Cobre	0-9.9	--	0.5	0.5	0.1
Plomo	0-5.0	--	1.6	--	--
Cadmio	--	--	0.4	--	--
Sulfato	1-1,826	25-500	400-650	--	--
N Total	0-1,416	20-500	--	989	8
Conductividad (µS)	--	--	6,000-9,000	9,200	1,400
TDS	0-42,276	--	10,000-14,000	12,620	1,144
TSS	6-2,685	--	100-700	327	266
pH	0.7-8.5	4.0-8.5	5.2-6.4	5.2	7.3
Alk (CaCO ₃)	0-20,850	--	800-4,000	--	--
Dureza Total	0-22,800	200-5,250	3,500-5,000	--	--
BOD ₅	9-54,610	--	7,500-10,000	14,950	--
COD	0-89,520	100-51,000	16,000-22,000	22,650	81

(p) Es difícil establecer los detalles de construcción en muchos lugares de disposición de residuos sólidos, especialmente la efectividad de base impermeabilizada y la eficiencia de colección de lixiviados por una inspección superficial. En este caso, también se puede introducir un indicador de peligro potencial para aguas subterráneas (Cuadro 15B), donde tales factores no son considerados.

3.5.4 Aguas Superficiales Contaminadas

(a) Los cursos de agua superficial, como ríos, arroyos, quebradas y canales, se usan frecuentemente para la disposición final de aguas residuales y desechos sólidos de diverso origen. En muchos casos, ellos reciben altas cargas de efluentes no tratados que exceden la

capacidad de purificación natural por muchos kilómetros aguas abajo. Tales cursos de agua superficial se convierten en fuentes de contaminación de aguas subterráneas bajo ciertas condiciones hidrogeológicas.

- (b) Es posible estimar, en términos generales, la capacidad natural purificadora de los cursos de agua superficial en que los siguientes mecanismos están activos: sorción, sedimentación, volatilización, biodegradación, bioconcentración, hidrólisis. Una indicación empírica aproximada de la distancia del flujo necesario para reducir las concentraciones contaminantes al nivel del 5%, se muestra en la Figura 14.
 - (c) En muchos países las aguas superficiales son clasificadas para determinar la calidad de acuerdo a sus niveles de DBO y SS bajo condiciones de flujo mínimo (períodos de estiaje). Sin embargo, se debería tomar nota de que estos indicadores no son necesariamente muy significativos. Mejor indicación del riesgo potencial para evaluar las aguas subterráneas está dado por la presencia de sustancias tóxicas específicas y los niveles de salinidad y coliformes fecales y estreptococo.
 - (d) Es posible clasificar los cursos de agua superficiales en términos de su relación con las aguas subterráneas (Figura 15):
 - (i) Efluentes o cursos de agua, que reciben descarga de las aguas subterráneas.
 - (ii) Influentes o cursos de agua que pierden, cuyos niveles de agua son más altos que los niveles del agua subterránea y que tienen el potencial para recargar acuíferos.
- Esta relación puede variar naturalmente como resultado de los cambios estacionales del río o del bombeo de las aguas subterráneas (Figura 15).
- (e) Para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por cursos de agua superficiales, es necesario estimar la cantidad y calidad del agua infiltrada por los lechos de los ríos a las aguas subterráneas.
 - (f) La cantidad será controlada por la permeabilidad del lecho del río o de arroyo involucrado y por los niveles relativos del agua en los cursos de agua superficiales y en el acuífero.
 - (g) La calidad del agua infiltrante será una función de (i) la calidad del agua superficial y (ii) los procesos de atenuación y eliminación que pudieran ocurrir durante la infiltración del lecho del río. Esta última puede ser muy significativa, conduciendo a reducciones importantes en la mayoría de los tipos de contaminantes que no sean de los más móviles y persistentes.

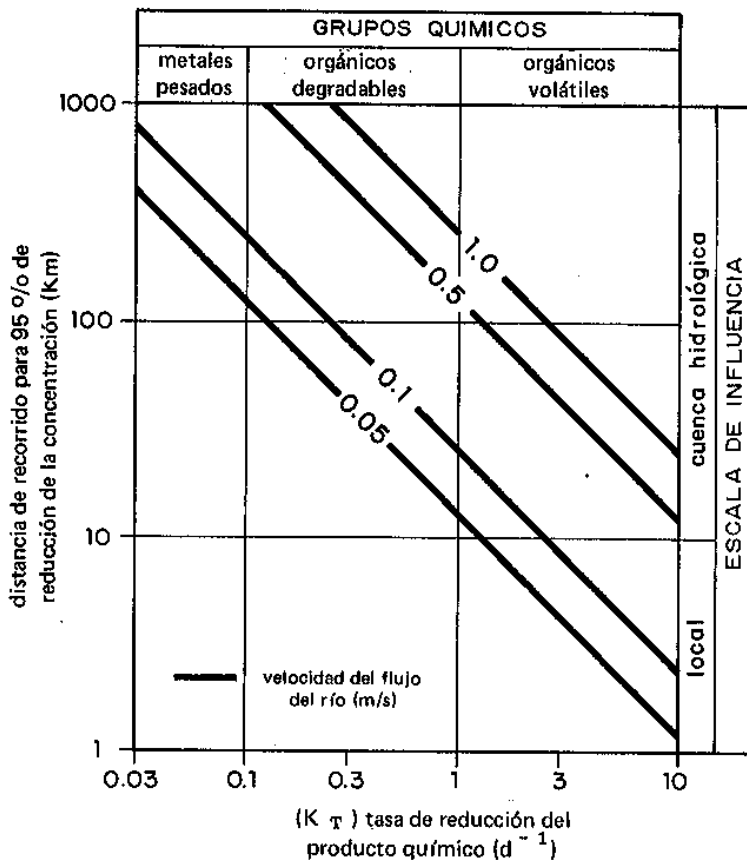


Figura 14

TASAS DE ELIMINACION DE LOS PRINCIPALES GRUPOS QUIMICOS DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUPERFICIALES (modificado de Thomann et al, 1987)

De esta figura, se puede evaluar la probabilidad de que un contaminante dado persista a concentraciones significativas aguas abajo de una conocida descarga.

- (h) A nivel de reconocimiento, es difícil establecer tales datos con seguridad, y cualquier curso de agua muy contaminado en condiciones de bajo flujo debe ser considerado como un peligro potencial alto de contaminación de las aguas subterráneas.

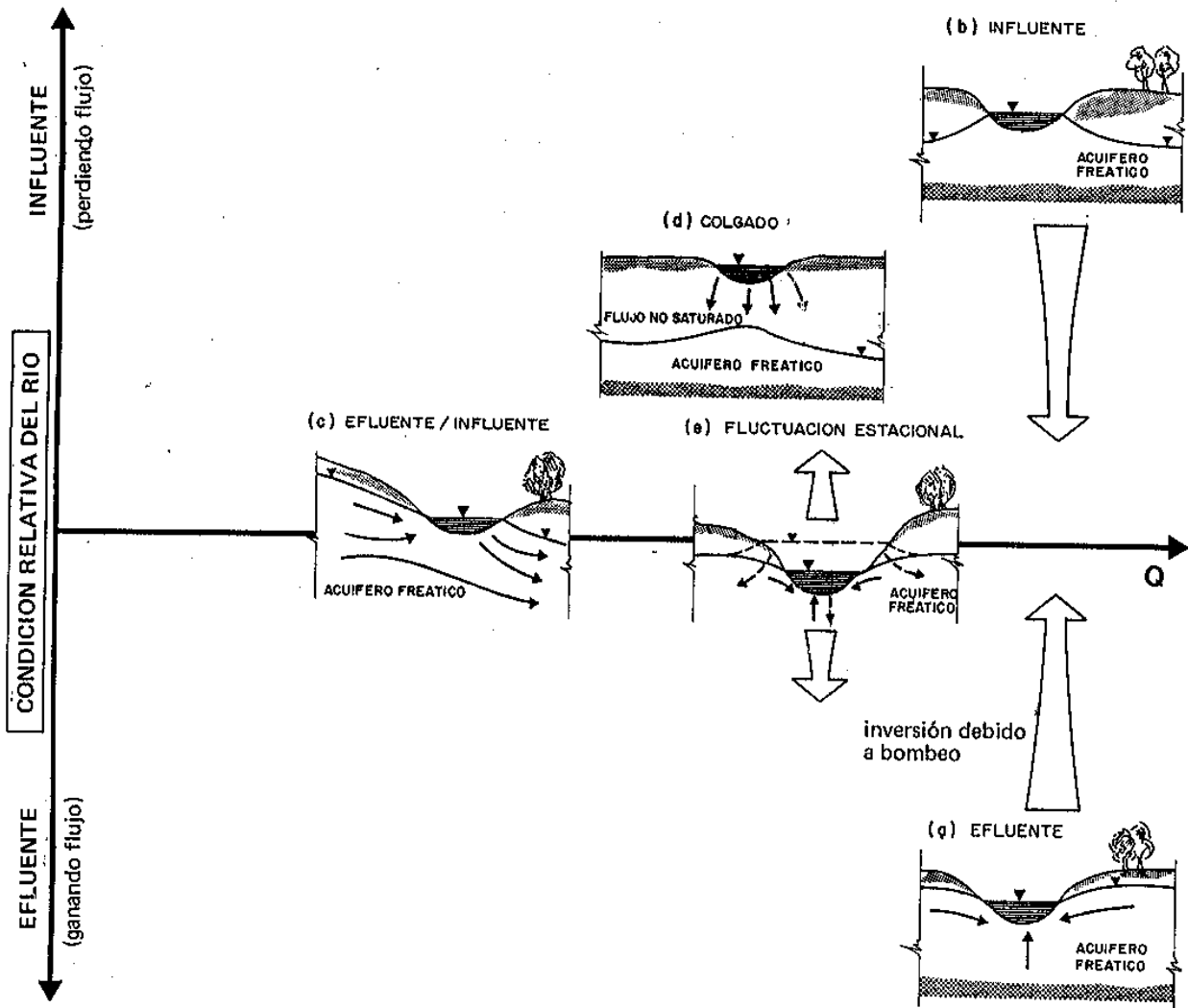


Figura 15

CLASIFICACION DE AGUAS SUPERFICIALES CON BASE EN SU RELACION
CON LOS ACUIFEROS

Todos los cursos de agua superficial contaminados que no demuestran una clara condición efluente, pueden contaminar las aguas subterráneas, y aún una condición efluente puede ser revertida por bombeo de pozos cercanos al río.

4. CARACTERIZACION DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO

4.1 Concepto de la Vulnerabilidad

4.1.1 El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, 1987).

4.1.2 La vulnerabilidad del acuífero es primera y lógicamente una función de:

- (a) La inaccesibilidad de la zona saturada, en un sentido hidráulico, a la penetración de contaminantes.
- (b) La capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero como resultado de su retención física y reacción química con contaminantes.

4.1.3 Estos dos componentes de la vulnerabilidad del acuífero interactúan con los siguientes componentes correspondientes de la carga contaminante al subsuelo:

- (a) El modo de disposición del contaminante en el subsuelo, y en particular, la magnitud de cualquier carga hidráulica asociada.
- (b) La clase de contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

Esta interacción determinará el tiempo de residencia en la zona no saturada y la demora de la llegada del contaminante al acuífero, y además, el grado de su atenuación, retención o eliminación antes de llegar al acuífero.

4.1.4 Científicamente, es más coherente evaluar la vulnerabilidad a cada contaminante o cada clase de contaminante (nutrientes, patógenos, microorgánicos, metales pesados, etc.) individualmente; o cada grupo de actividades contaminantes (saneamiento in-situ, cultivos agrícolas, disposición de efluentes industriales, etc.) separadamente (e.g. Sellar & Canter, 1980; le Grand, 1983; Carter et al, 1987).

4.1.5 La mejor manera de presentar la vulnerabilidad de acuíferos es en forma de mapas. Por lo tanto, un seguimiento del anterior a su lógica conclusión, generaría una serie de mapas de vulnerabilidad específica que podrían ser compilados en un atlas de vulnerabilidad de acuíferos.

4.2 Limitaciones Prácticas

4.2.1 Sin embargo, todavía no existe información suficiente y/o datos adecuados para alcanzar este ideal. En consecuencia, sistemas más generalizados y menos refinados de mapeo de la vulnerabilidad de acuíferos han sido desarrollados progresivamente (Albinet & Margat, 1970; Haertle, 1983; Aller et al, 1985).

- 4.2.2 Tales mapas deben ser siempre interpretados, sin embargo, con mucha precaución. Científicamente el concepto de una "VULNERABILIDAD GENERAL A UN CONTAMINANTE UNIVERSAL EN UN ESCENARIO TIPICO DE CONTAMINACION", no tiene validez (Andersen, 1987).
- 4.2.3 Por ejemplo, a la larga todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes no degradables generados por una actividad contaminante ampliamente distribuida. En este caso, aún la capacidad de dilución del acuífero puede no ser efectiva para mitigar la contaminación.
- 4.2.4 Adicionalmente, aquellos acuíferos que serían considerados como de menor vulnerabilidad a la contaminación, en términos generales, tienden a ser los más difíciles de rehabilitar una vez contaminados. En este sentido, al menos, ellos podrían ser considerados como de alta vulnerabilidad a la contaminación.

4.3 Esquema de Clasificación

- 4.3.1 Los componentes de la vulnerabilidad del acuífero arriba definidos desafortunadamente no son directamente mensurables, sino determinados por varias combinaciones de otros factores (Cuadro 17).
- 4.3.2 Los datos relacionados con muchos de estos factores generalmente no están disponibles ni se estiman fácilmente. La reducción y simplificación de la lista de parámetros a ser estimados es, por consiguiente, inevitable si se debe desarrollar un esquema práctico de la evaluación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.
- 4.3.3 Si la selección de parámetros se basa en aquellos datos probablemente disponibles o fácilmente recolectados, entonces la lista se reduce radicalmente (Figura 16) a:
 - (a) La profundidad de la napa freática o techo del acuífero confinado.
 - (b) El tipo de ocurrencia del agua subterránea.
 - (c) Las características, en términos de litología y grado de consolidación, de los estratos encima de la zona saturada.

Sin embargo, una consideración adicional revela que estos parámetros contienen, aunque solamente en un sentido cualitativo, la mayoría de aquellos en la lista original (Cuadro 17). En algunos casos sería suficiente mapear estos parámetros directamente y utilizar el mapa para interpretar la vulnerabilidad relativa.

- 4.3.4 Una alternativa es la metodología empírica propuesta para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero (Foster, 1987) que involucraría la indexación de estos parámetros en tres fases discretas (Figura 16). La primera es la identificación del tipo de ocurrencia de aguas subterráneas dentro de un rango para este parámetro de 0-1.

Cuadro 17

PRINCIPALES FACTORES QUE CONTROLAN LA VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO A LA CONTAMINACION

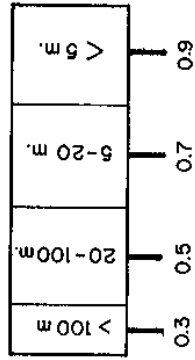
COMPONENTE DE VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO A CONTAMINACION (Figura 3)	DATOS HIDROGEOLOGICOS	
	IDEALMENTE REQUERIDOS	NORMALMENTE DISPONIBLES
INACCESIBILIDAD HIDRAULICA	<ul style="list-style-type: none"> - grado de confinamiento del acuífero - profundidad de la napa freática o del acuífero - contenido de humedad de la zona no saturada - conductividad vertical hidráulica de la acuíperm* o acuitard 	<ul style="list-style-type: none"> - tipo de contaminante - profundidad al agua subterránea
CAPACIDAD DE ATENUACION	<ul style="list-style-type: none"> - distribución del tamaño del grano y fisura de la acuíperm* o acuitard - mineralogía de la acuíperm* o matriz del acuitard 	<ul style="list-style-type: none"> - grado de consolidación/fisuración de la acuíperm* o acuitard - característica litológica de la acuíperm* o acuitard

* el término acuíperm es usado aquí para estratos no saturados encima del nivel freático que permiten un libre movimiento vertical de infiltración

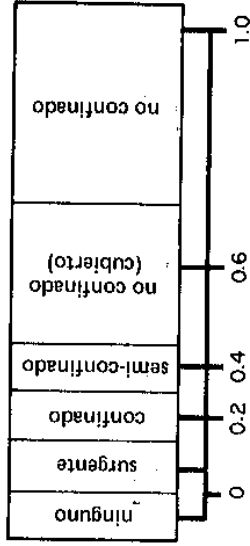
- 4.3.5 La caracterización de los estratos encima de la zona saturada del acuífero se puede hacer en términos de (a) el grado de consolidación y, de esta forma, la presencia o ausencia de permeabilidad por fisuración y (b) el carácter litológico, e, indirectamente de esta forma, la porosidad relativa, permeabilidad y contenido de humedad o retención específica de la zona no saturada. Esto conducirá a un segundo punto en una escala 0.4-1.0, reteniendo un sufijo calificativo en el caso de tipos litológicos presentando fisuras y/o baja capacidad de atenuación, porque estas características pueden interactuar con elementos correspondientes de la carga contaminante al subsuelo.
- 4.3.6 El paso final es la determinación de la profundidad de la napa freática en el caso de acuíferos no confinados, o la profundidad del techo de acuíferos confinados, origina un tercer punto en la escala 0.4-1.0.
- 4.3.7 Mientras que se ha dado énfasis a que éstas son características intrínsecas de un acuífero en un lugar dado, independiente de la actividad humana, se debería reconocer que, la sobre-explotación deliberada o accidental variará la profundidad de la napa freática y, aún en algunos casos, el grado de confinamiento del acuífero. Sin embargo, dado el esquema de indexación propuesto, tales efectos serán escasamente significativos.

(a) DISTANCIA AL AGUA

PROFUNDIDAD DE LA NAPA FREÁTICA (acuífero no confinado) O TECHO DEL ACUÍFERO (confinado)



(b) OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRANEA



(c) SUBSTRATO LITOLÓGICO

CARACTER DEL ACUÍFERO O ACUITARD

- (i) GRADO DE CONSOLIDACION
- (ii) CARACTER LITOLÓGICO
- F grado de fisuración
- A capacidad relativa de atenuación (contenido de arcilla)

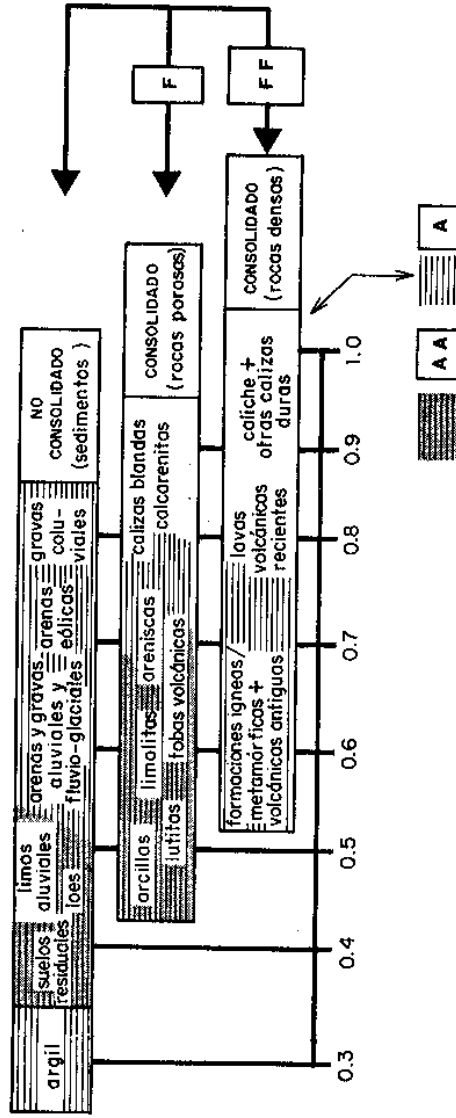


Figura 16

CARACTERIZACION DE LOS COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO

Para cada componente, se indica un índice comparativo de peligrosidad creciente.

- 4.3.8 En la mayoría de los casos, los informes hidrogeológicos estarán disponibles conteniendo datos adecuados para permitir una evaluación del procedimiento propuesto, aunque esta información debería estar generalmente reforzada por un estudio directo de mapas geológicos y registros de perforación de pozos de agua.
- 4.3.9 Una subdivisión descriptiva de depósitos geológicos incluyendo el tamaño de grano y las características minerales, podría haberse usado con el propósito de clasificar el carácter litológico de los estratos.
- 4.3.10 Sin embargo, ya que una clasificación genética refleja mejor tales factores como la estratificación y la estructura geológica que son importantes en el contexto de vulnerabilidad a la contaminación, es preferible utilizar un sistema híbrido de clasificación que es más compatible como el que se usa para mapeo geológico.
- 4.3.11 Casi todos los sedimentos de la clasificación (Figura 16) son depósitos geológicos transportados. Sin embargo, otros dos tipos de depósitos son retenidos tomando en cuenta su amplia distribución: la suelos profundos residuales, tales como la arcilla roja del cinturón tropical y los caliches del desierto.
- 4.3.12 Una de las dificultades más frecuentes que se presentarán en la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero y en la aplicación práctica de la metodología propuesta, es la presencia de capas estratificadas de propiedades hidráulicas muy diferentes. Esta estratificación es una característica fundamental de muchas formaciones geológicas, sedimentarias y volcánicas. Tales formaciones incluyen casi todos los principales y muchos de los menores acuíferos. Pueden presentarse problemas cuando la formación de capas ocurre sobre la napa freática, dando origen a acuíferos colgados o acuíferos cubiertos no confinados, y bajo la napa freática, causando el semiconfinamiento de acuíferos a profundidad.
- 4.3.13 Para los propósitos de esta evaluación, se recomienda que:
- (a) La litología predominante de los estratos encima del acuífero de la zona saturada, sea usada.
 - (b) Si existiera duda alguna acerca de la continuidad y propiedades de la presumible capa confinante, las condiciones de las aguas subterráneas sean consideradas como no confinadas.
 - (c) El acuífero menos profundo sea usado para la evaluación del riesgo de contaminación, excepto en el caso de existencia de pequeños acuíferos colgados.

4.4 Índice de Vulnerabilidad

- 4.4.1 Se ha dado gran énfasis a que hacer un intento para definir una vulnerabilidad general a un contaminante universal en un típico escenario de contaminación nos podría llevar a conclusiones erróneas.

- 4.4.2 En realidad, la interacción entre los componentes de la vulnerabilidad a la contaminación y los de la carga contaminante al subsuelo es muy compleja. Esta interacción determina el riesgo de qué contaminantes alcanzan al acuífero y está representada con la máxima precisión posible en la Figura 17.
- 4.4.3 En efecto, ciertos tipos de carga, como aquellos que contienen contaminantes altamente móviles y persistentes o aquellos dispuestos bajo la napa freática, ocasionan un alto riesgo de contaminación del acuífero irrespectivo de su vulnerabilidad.
- 4.4.4 En todas las otras circunstancias, la interacción entre los componentes de la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero, determinarán el riesgo de contaminación (Figura 17).
- 4.4.5 Por esto, se considera que un sistema generalizado de clasificación de acuíferos y un solo índice de vulnerabilidad, puede ser de uso práctico para la determinación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas a un nivel de reconocimiento. Se puede mantener su validez técnica si se aclara que este no pretende ser para contaminantes móviles persistentes que no experimentan una retención o transformación durante su transporte al subsuelo.
- 4.4.6 En la Figura 18 se ilustra el esquema más lógico de combinación de parámetros relevantes (DIOS). El índice de vulnerabilidad del acuífero es el producto de los componentes indicados y se recomienda mantener los sufijos mencionados. También se considera imperativo que en la elaboración de los mapas del índice de vulnerabilidad, se incluyan los datos básicos hidrogeológicos utilizados.
- 4.4.7 Un problema adicional se crea cuando se intenta hacer la caracterización de vulnerabilidad en área de acuífero fracturado. Su gran heterogeneidad dificulta el establecimiento de mapas de profundidad del agua, sobretodo cuando no se dispone de buenas informaciones y en densidad apropiadas.

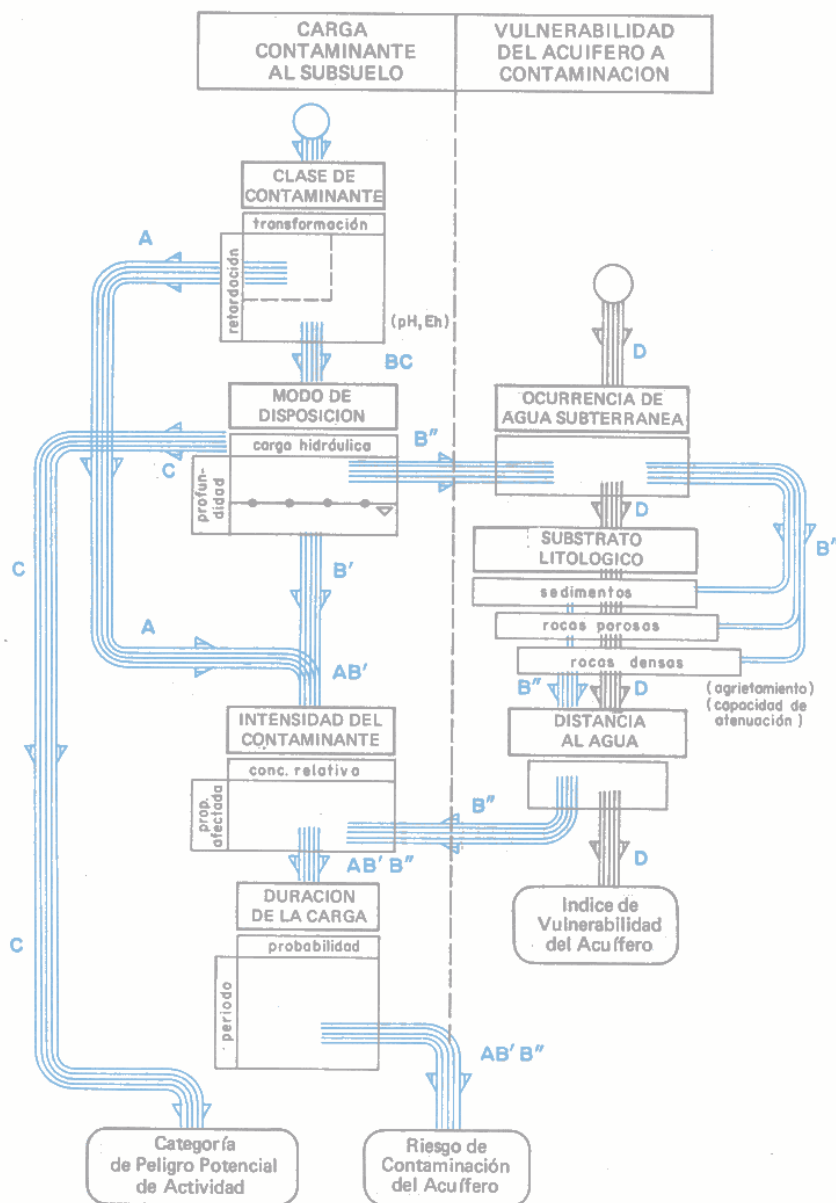


Figura 17

ESQUEMA TEORICO DE INTERACCION ENTRE LOS COMPONENTES DE LA CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO Y VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO PARA DETERMINAR EL RIESGO DE CONTAMINACION

La representación total de cada componente ha sido dada en las Figuras 7 y 16, respectivamente. La ruta A es para contaminantes móviles persistentes y las rutas B-B'/B'' para otras clases de contaminantes. La derivación del índice de vulnerabilidad del acuífero (D) y el peligro potencial de la carga contaminante (C) también están indicados.

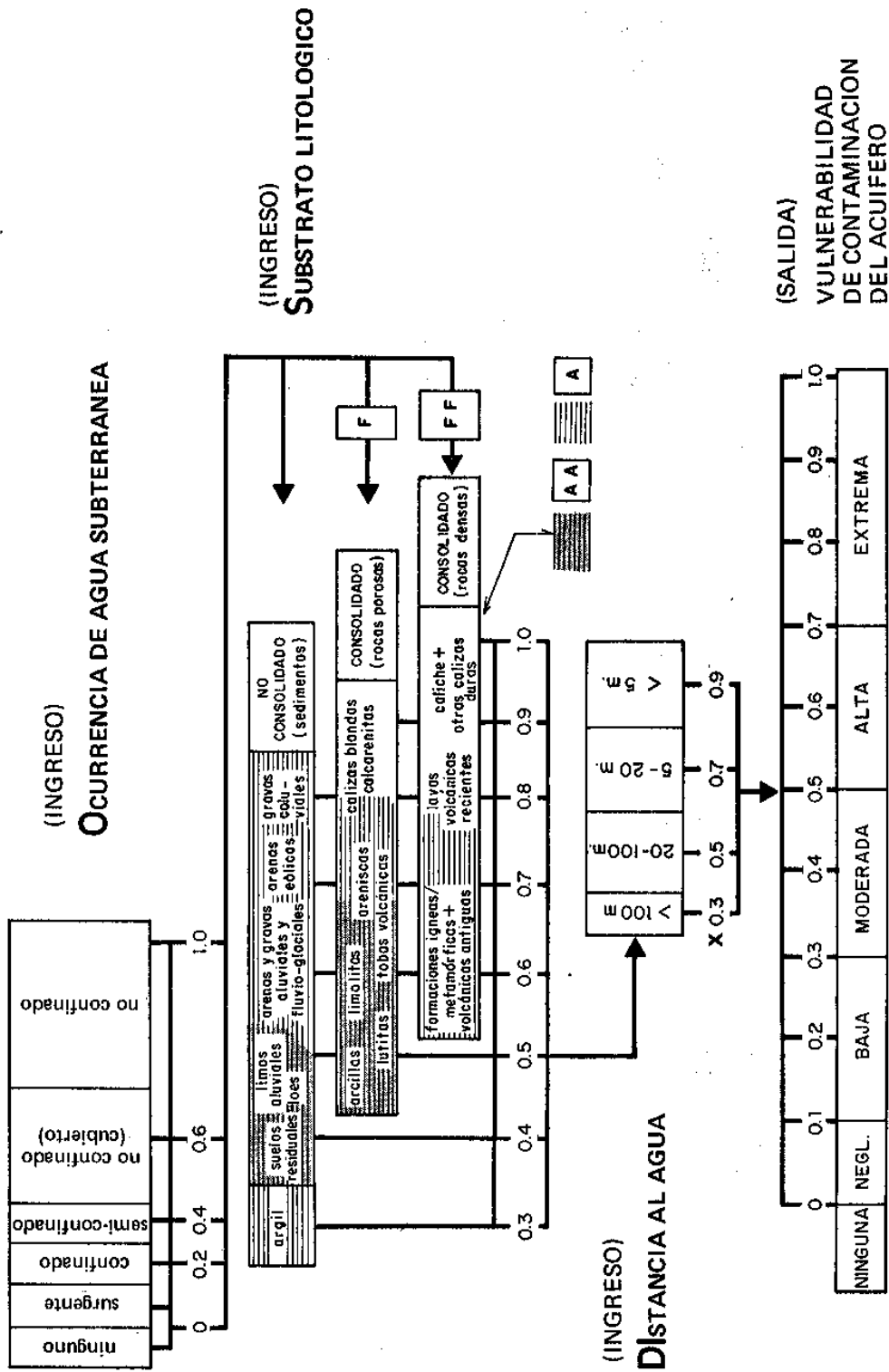


Figura 18
SISTEMA DIOS PARA LA EVALUACION DEL INDICE DE VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO
(compilado de Foster, 1987)

Adicionalmente al índice total, los sufijos son retenidos para todas las formaciones fisuradas y las que contienen gran cantidad de arcilla.

5. IMPLEMENTACION DE PROYECTOS DE RECONOCIMIENTO

5.1 Procedimientos Cartográficos

- 5.1.1 Los parámetros hidrogeológicos (Figura 16) y las obras hidráulicas (por lo general sacados directamente del mapa hidrogeológico) deberían conservarse en el mapa de vulnerabilidad (Figura 19A), para uso en posteriores investigaciones más detalladas del riesgo de contaminación de aguas subterráneas en áreas seleccionadas.
- 5.1.2 Si se opta por el uso del índice de vulnerabilidad se recomienda también mapearlo a la escala seleccionada de trabajo. Los mapas deberán ser sombreados en tonos de rojo, indicando la vulnerabilidad creciente con una mayor intensidad de color (Figura 19A).
- 5.1.3 En el caso de la carga contaminante al subsuelo de las fuentes puntuales de contaminación, se debería producir un inventario y localizarlos en un mapa de la misma escala como aquel usado para representar la vulnerabilidad del acuífero.
- 5.1.4 Para fuentes de contaminación multipuntual dispersa, generalmente será más práctico delinear la extensión de las actividades relacionadas en el mapa de carga contaminante, con sombreado para representar la intensidad relativa con respecto a los principales contaminantes persistentes y registrar los datos que servirán de consulta en el inventario tabulado. Adjunto a este inventario se puede hacer uso de otra base cartográfica, en mayor escala (1:50,000, p. ej.) para una mejor ubicación de las fuentes potencialmente contaminantes.
- 5.1.4.1 Se puede hacer uso de imágenes de satélite para un mapeo actualizado del uso agrícola del suelo. Pero, en países en desarrollo, un problema adicional son los cambios frecuentes de cultura por cuestiones económicas.
- 5.1.5 En la mayoría de los casos, se usará la categorización del peligro potencial para los diversos componentes de la carga contaminante al subsuelo, utilizando datos resumidos en el Cuadro 18, al menos para estudios preliminares y de amplia escala (Cuadro 4A, 3.4.2n, Cuadro 11, Cuadro 14, Cuadro 15B, 3.5.4h). La categoría de peligro potencial puede entonces ser sobrepuesta en los mapas de vulnerabilidad del acuífero (Figura 19B).
- 5.1.6 Los índices bajo, moderado y alto de la categoría de peligro potencial son relativos y existen para priorizar las actividades para un programa de mayor detalle, incluyendo monitoreo e investigaciones de campo. Los límites de clasificación aquí presentados son indicativos y es importante que ellos se adapten a las realidades del proyecto, entre tanto se debe tener en cuenta que estos índices puedan distinguir en el universo de actividades aquéllas que son relativamente más riesgosas de generar una carga contaminante que otras.

Cuadro 18

REQUERIMIENTOS DE DATOS PARA EVALUAR LAS ACTIVIDADES CONTAMINANTES EN TERMINOS DE RANGO DEL PELIGRO POTENCIAL Y DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO

(el primero será clasificado como bajo, moderado o alto de acuerdo al criterio de la columna de mano izquierda, pero la información adicional de la columna de mano derecha se requiere para estimar el segundo)

INFORMACION MINIMA PARA CALCULAR INDICE DEL PELIGRO POTENCIAL	INFORMACION ADICIONAL PARA ESTIMAR CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO
(1) FUENTES DIFUSAS	
AREAS URBANO-RESIDENCIALES (3.4.1) <ul style="list-style-type: none">. densidad de población. cubierto de alcantarillado	<ul style="list-style-type: none">. infiltración de precipitación. uso de agua per cápita. operación de unidades sanitarias*. inspección del almacenaje de hidrocarburos y químicos. industria de pequeña escala
CULTIVO AGRICOLA (3.4.2) <ul style="list-style-type: none">. tipo de suelo y cultura. tipo de sistema de cultivo y riego	<ul style="list-style-type: none">. exceso de precipitación + irrigación. continuidad del cultivo. uso y control de fertilizantes y pesticidas. eficacia de la irrigación*. frecuencia de arado*. intensidad de pasteo*
(2) FUENTES PUNTALES:	
ACTIVIDAD INDUSTRIAL (3.5.1) <ul style="list-style-type: none">. ubicación. tipo de industria. uso del agua	<ul style="list-style-type: none">. almacenamiento químico: tipo, disposición y cantidad. lagunas de efluentes*. tratamiento de efluente (incl. materias primas)*. método de disposición de efluentes. método de disposición de residuos
LAGUNAS DE EFLUENTES (3.5.2) <ul style="list-style-type: none">. ubicación y extensión. origen del efluente	<ul style="list-style-type: none">. detalles de construcción. régimen de operación
DISPOSICION DE RESIDUOS SOLIDOS (3.5.3) <ul style="list-style-type: none">. ubicación. origen del residuo. precipitación e irrigación artificial	<ul style="list-style-type: none">. detalles de construcción. métodos operacionales
ARROYO SUPERFICIAL CONTAMINADO (3.5.4) <ul style="list-style-type: none">. localización. clasificación de calidad	<ul style="list-style-type: none">. condiciones hidrogeológicas. tasa de infiltración por el cauce. origen de efluentes

* donde es aplicable

Cuadro 19.

INFORMACION HIDRICA		LEYENDA	
(A)	CONDICIONES HIDROGEOLOGICAS	(símbolo)	(color)
	límite entre acuíferos		negro
	falla geológica (inferida)		
	profundidad al agua subterránea (m)		morado
	acuífero no confinado		
	acuífero confinado		
	límite del área de surgente		azul
	de acuífero confinado		
	divisorio del agua subterránea		azul
	río		
(referirse al mapa hidrogeológico para detalles adicionales como régimen hidrogeológico, propiedades de acuíferos, química natural del agua subterránea, etc.)			
(B)	TRABAJOS HIDRAULICOS		
	lugar del embalse		negro
	pozo excavado		
	pozo tubular		
	pozo de bombeo		
	pozo surgente		
(también indica el código de a) número del pozo, b) el principal acuífero explotado por cada pozo y c) nivel freático)			
(C)	VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO A LA CONTAMINACION (para el acuífero más somero)		
	no significativa		ninguno
	bajo		rojo aumentando en intensidad
	medio		
	alto		
	extremadamente alto		
características de la capa acuíperm o acuílard:			
- grado de fisuración	mayor	FF	
	menor	F	
	ninguno	.	
- contenido de arcilla y materia orgánica	alto	AA	
	moderado	A	negro
	bajo	.	
- contenido de minerales carbonatados	predominante	C	
	alguno	C	
	ninguno	.	

ACTIVIDAD GENERADORA DE CONTAMINACION	SECCION DEL INFORME	REPRESENTACION CARTOGRAFICA DEL INDICE DE PELIGRO POTENCIAL		
		bajo	moderado	alto
(color - negro)				
(D) FUENTES DIFUSAS:				
área urbano-residencial	3.4.1			
cultivo agrícola	3.4.2			
(E) FUENTES PUNTUALES:				
actividad industrial	3.5.1			
laguna de efluentes	3.5.2			
disposición de residuos sólidos	3.5.3			
curso superficial del agua contaminada	3.5.4			

Figura 19

LEYENDA PARA MAPAS DE VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO
Y CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO

(Se asume que el mapa topográfico a una escala apropiada estará coloreado en tono gris para ser usado como base para el mapeo de la vulnerabilidad del acuífero, con un transparencia sobrepuesta para los detalles de carga contaminante al subsuelo.)

5.2 Evaluación Final del Riesgo

- 5.2.1 La existencia de una categoría de peligro potencial alto o moderado en áreas con vulnerabilidad del acuífero media, alta o extrema sirve para dar una indicación preliminar del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.
- 5.2.2 El riesgo de contaminación del acuífero debería ser evaluado actividad por actividad, contaminante por contaminante, separando aquellos contaminantes que son altamente móviles y persistentes y/o que están dispuestos debajo de la napa freática, de los otros.
- 5.2.3 Es muy importante que este procedimiento sea considerado sólo como el primer paso en la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Ellas pueden y deberían ser usadas para asignar prioridades en programas de seguimiento con investigación y monitoreo de campo apropiado para las condiciones hidrogeológicas y la naturaleza de la carga contaminante al subsuelo.

5.3 Implicaciones para el Abastecimiento de Agua Subterránea

- 5.3.1 El hecho que los pozos existentes y manantiales captados se contaminen como resultado de la contaminación del acuífero, dependerá de:
 - (a) La intensidad de la contaminación que penetra al acuífero, especialmente su extensión espacial.
 - (b) La persistencia y movilidad del contaminante.
 - (c) Ciertas propiedades del acuífero que controlan el transporte lateral del contaminante.
 - (d) El régimen de flujo natural o inducido del agua subterránea en el acuífero.
- 5.3.2 La predicción precisa de la evolución de un episodio de contaminación de un acuífero, en términos de cambio en las concentraciones de contaminantes gradiente hidráulica abajo, sigue siendo un gran reto. Se necesitan programas muy costosos de investigación para determinar la distribución espacial de los parámetros requeridos para simular el sistema por un modelo digital de computación. Además, aún existen problemas sobre el uso de tales modelos debido al efecto de la heterogeneidad sobre el coeficiente de dispersión hidrodinámica.
- 5.3.3 Utilizando casos históricos documentados, se pueden hacer algunos estimados muy aproximados de la distancia lateral máxima de propagación de un contaminante bajo gradiente hidráulica antes que su concentración se reduzca bajo el nivel de detección.
- 5.3.4 Se considera que las características litológicas del acuífero brindan la mejor indicación de su probable posición (Figura 20). Puede existir dificultad si es que no se conoce la dirección de la gradiente hidráulica. Además, normalmente se encontrará una considerable dispersión

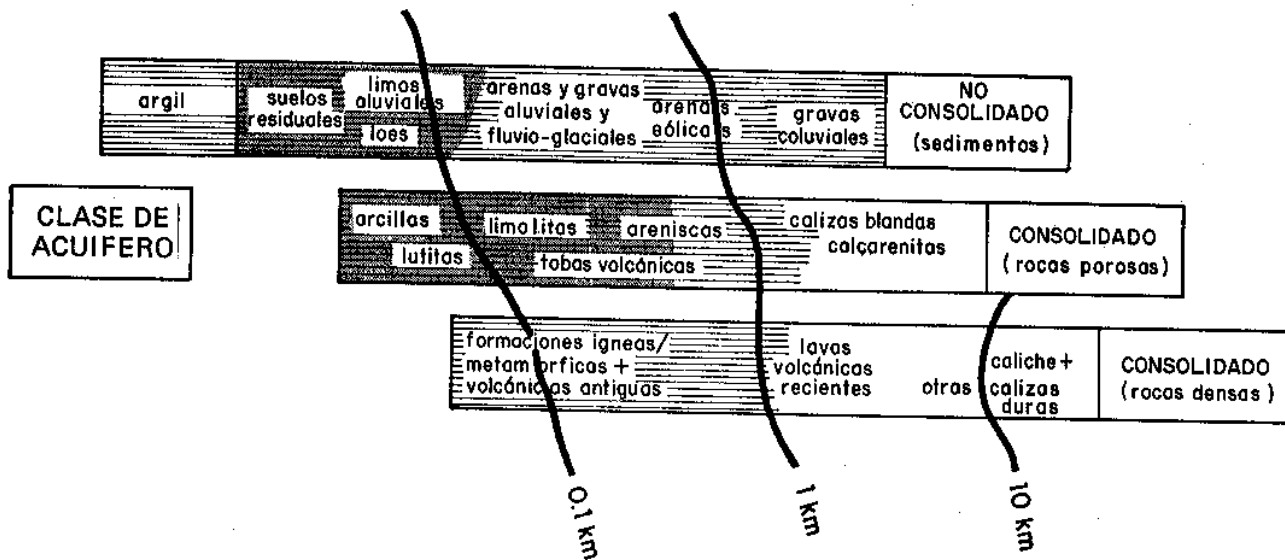


Figura 20

CLASIFICACION DE LOS ACUIFEROS EN TERMINOS A SU RELATIVO POTENCIAL DE DILUCION Y RETARDO DE CONTAMINANTES

La evidencia empírica sugiere que es improbable que los contaminantes sean detectados en concentraciones significativas a mayores distancias laterales que las indicadas desde su punto de penetración al acuífero.

espacial o angular, especialmente si la gradiente hidráulica es plana. Sin embargo, se considera que los estimados serán de ayuda en muchas circunstancias.

5.3.5 Sin embargo, habrá algunas excepciones, como por ejemplo:

- (a) Si la concentración del contaminante que llega al acuífero es muy alta o si su concentración máxima recomendada para agua potable es muy baja.
- (b) Si el comportamiento del contaminante está afectado por densidad o inmiscibilidad.
- (c) Si los pozos en producción tienen rejillas colocadas a profundidad que causen también un flujo vertical significativo de agua subterránea.

5.3.6 En el caso de extensas fuentes dispersas de contaminación, la situación es diferente, especialmente en donde los contaminantes son relativamente móviles y persistentes, ya que ellos, tarde o temprano, afectarán todas las fuentes de abastecimiento de agua subterránea en el área bajo consideración.

5.3.7 Si el estudio sugiere un riesgo significativo de contaminación, es esencial implementar un programa apropiado de monitoreo para determinar el estado actual de la calidad de aguas subterráneas y predecir sus tendencias futuras, y no confiar en estimados empíricos de transporte lateral del contaminante dados en esta misma sección del informe.

5.4 Estrategias de Protección

5.4.1 Los mapas de vulnerabilidad constituyen una base técnica de planeamiento para acciones de control y protección de los acuíferos, en la medida que permiten la identificación y representación cartográfica de áreas potencialmente críticas.

5.4.2 Los programas de prevención y control de la contaminación de acuíferos utilizan dos estrategias distintas, la primera, (aparentemente más sencilla) consiste en poner niveles de restricciones alrededor de los pozos o baterías de pozos. Este enfoque, no obstante de la conveniencia administrativa y simplicidad legislativa, presenta las siguientes limitaciones.

- a) El número creciente de pozos en una misma área torna no viable el establecimiento de zonas de protección fijas.
- b) La deficiencia de datos y las incertidumbres técnicas dificultan el cálculo de las dimensiones requeridas por los perímetros de protección, exigiendo un trabajo detallado, (caso por caso), normalmente muy demorado.
- c) El enfoque del perímetro de protección está centrado en la zona saturada cuando, en la práctica, es la zona no saturada a la que se ofrece la barrera más eficaz contra la contaminación.

5.4.3 Frente a este problema, es necesario buscar una vía complementaria, más amplia y universalmente aplicable para la protección del recurso hídrico subterráneo. El mapeo de la vulnerabilidad del acuífero ofrece esta posibilidad. Se puede tratar de promover el control de las actividades agrícolas, industriales y urbanas frente a la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. Sin embargo, no se puede pretender lograr una protección tan completa a esta base por consideraciones del alto costo socioeconómico.

5.4.4 La posición más realista en la conservación de la calidad de las aguas subterráneas tal vez sea buscar la combinación de ambas estrategias, por medio de las siguientes directrices:

- a) Ejercer la protección general del acuífero, sobre todo en las áreas de recarga, con medidas de control de las actividades que puedan afectarlo sería y permanentemente.
- b) Establecer perímetros de protección especial en torno de baterías de pozos del suministro público.

6. BIBLIOGRAFIA

- ALBINET, M. & MARGAT, J. 1970. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull BRGM 2me Series 3(4):13-22.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHER, J.H. & PETTY, R.J. 1985. DRASTIC; a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US EPA Report 600/2-85/018.
- ANDERSEN, L.J. 1987. Applicability of vulnerability maps. Proc Intl Conf "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants" (Noordwijk, The Netherlands). April 1987.
- BNA. 1975. Water pollution control. US Bureau of National Affairs Policy & Practice Series. Washington, D.C.
- BOUWER, H. 1987. Effect of irrigated agriculture on groundwater. Jour Irrigan & Drain Eng 113:4-15.
- CARTER, A.D.; PALMER, R.C. & MONKHOUSE, R.A. 1987. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice particularly in respect of nitrate. Proc Intl Conf "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutant" (Noordwijk, The Netherlands/April 1987).
- CARTWRIGHT, K. 1984. Shallow land burial of municipal wastes. NRC Studies in Geophysics "Groundwater Contamination". 4:67-77.
- CAVALLARO, A.; CORRADI, G.; FELICE, G. de & GRASSI, P. 1985. Underground water pollution in Milan and province by industrial chlorinated organic compounds. Proc WRC-WHO Conf "Effects of Land Use on Fresh Waters" (Stirling-GB/June 1985), 4:1-16.
- CETESB. 1985. Residuos solidos industriais. Companhia de Tecnologia de Saneamiento Ambiental. Sao Paulo, Brasil.
- COVELLO, V.T.; MUMPOWER, J.L.; STALLEN, P.J.M. & UPPULURI, V.R.R. (eds.). 1985. Environmental impact assessment: technology assessment and risk analysis. NATO ASI Series G4: 1068 pp.
- CHERRY, J.A. (ed.). 1983. Migration of contaminants in groundwater at a land fill: a case study. J Hydrol 63:1-197.
- DMAE. 1981. Equivalentes populacionais de residuos liquidos industriais da regio metropolitana de Porto Alegre. Brasil - Departamento Municipal de Agua e Esgotos. Informe 27:34 pp
- ECKENFELDER, W.W. 1976. Industrial waste pollution control. McGraw-Hill, New York, USA.
- EPA. 1977. Procedures manual for groundwater monitoring of solid waste disposal facilities. Environmental Protection Agency Report EPA-530-SW-61:269 pp.

- EPA. 1980. Treatability manual (2) industrial description. Environmental Protection Agency Report EPA-600-8-80-042B.
- FOSTER, S.S.D. 1985a. Groundwater pollution protection in developing countries. IAH Intl Contr Hydrogeology 6:167-200.
- FOSTER, S.S.D. 1985b. Potable groundwater supplies and low cost sanitary engineering-how compatible? UN Nat Res Forum 9:125-132.
- FOSTER, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc Intl Conf "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants" (Noordwijk, The Netherlands/April 1987)
- FOSTER, S.S.D., BRIDGE, L.R.; GEAKE, A.K.; LAWRENCE, A.R. & PARKER, J.M. 1986. The groundwater nitrate problem. BGS Hydrogeology Res Rep 86/2: 95 pp.
- FOSTER, S.S.D. & FOSTER, V. 1987. The economic dimension of aquifer protection or putting a price on groundwater pollution. Proc UN Int Symp "Groundwater Economics" (Barcelona, Spain/October 1987).
- FOSTER, S.S.D., VENTURA, M. & HIRATA, R. 1987. Groundwater pollution: an executive overview of the Latin America-Caribbean situation in relation to potable water-supply. CEPIS Technical Report: 38 pp.
- FRANKENBERGER, W.T. 1984. Fate of wastewater constituents in soil and groundwater. in "Irrigation with reclaimed municipal wastewater: a conducting manual." Water Resources Control Board 14:1-25.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood, USA: 604 pp.
- GEAKE, A.K.; FOSTER, S.S.D.; NAKAMATSU, N.; VALENZUELA, C.F. & VALVERDE, M.L. 1986. Groundwater recharge and pollution mechanisms in urban aquifers of arid regions. BGS Hydrogeology Res Rep 86/11: 52 pp.
- GOWLER, A. 1983. Underground purification capacity. IAHS Publ 142(2):1063-1072.
- GUZMAN RIOS, S., GARCIA, R. & AVITES, A. 1986. Reconnaissance of volatile on synthetic organic chemicals in public water-supply wells throught Puerto Rico (November 1984 - May 1985). USGS-WRD Open-File Data Report 86-93.
- HACKMAN, E.E. 1978. Toxic organic chemicals: destruction and waste treatment. Pollution Technology Review, 40:317 pp.
- HAERTLE, A. 1983. Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. IAHS Publ 142(2):1073-1085.
- HAIMES, Y.Y. 1984. Risk assessment for the prevention of groundwater contamination. NRC Studies in Geophysics - Groundwater Contamination 14:166-179.

- HEATH, R.C. 1982. Basic groundwater hydrogeology. U.S. Geology Survey. Water Supply Paper 2220. Washington, D.C., 84 p.
- HUSSAINY, S.U. 1978. Ecological studies of lagoons at Werribe; removal of biochemical oxygen demand, nitrogen and heavy metals. IAWPR Intl Conf "Development in Land Methods of Wastewater Treatment and Utilization". Melbourne-Australia, June 1978. 23:1-21.
- IDELOVITCH, E. & MICHAEL, M. 1984. Soil-aquifer treatment - a new approach to an old method of wastewater reuse. Jour Water Poll Control Fed 56:936-943.
- JACKSON, R.E. (ed.). 1980. Aquifer contamination and protection. UNESCO Studies and Reports in Hydrology 30: 442 pp.
- KEHEW, A.E., SCHWINDT, F.J. & BROWN, D.J. 1984. Hydrogeochemical interaction between a municipal waste stabilisation lagoon and a shallow aquifer. Ground Water 2:746-754.
- KIMMEL, G.E. 1984. Nonpoint contamination of groundwater on Long Island, New York. NRC Studies in Geophysics - Groundwater Contamination 9:120-126.
- LAWRENCE, A.R. & FOSTER, S.S.D. 1987. The pollution threat from agricultural pesticides and industrial solvents. BGS Hydrogeology Research Report 87/2: 30 pp.
- LE GRAND, H.E. 1983. A standardized system for evaluating waste disposal sites. NWA (Worthington/Ohio, USA.): 49 pp.
- LEWIS, W.J.; FOSTER, S.S.D. & DRASAR, B.S. 1982. The risk of groundwater pollution by on-site sanitation in developing countries. WHO-IRCWD Report 01-82: 79 pp.
- LUIN, A.B. van & STARKENBURG, W. van. 1985. Hazardous substances in wastewater. Water Sci & Tech, 17:843-853.
- LUND, H.F. 1971. Industrial pollution control handbook. McGraw-Hill, New York, USA.
- MATTHESS, A.; PEKDEGER, A. & SCHROTER, J. 1985. Behaviour of contaminants in groundwater. IAH Intl Contr to Hydrogeology 6:1-86.
- MAZUREK, J. 1979. Summary of the modified Legrand method. NCGWR Report, Norman, Oklahoma, USA.
- MILLER, D.W. & SCALF, M.R. 1974. New priorities for groundwater quality protection. Groundwater, 12:335-347.
- NEMEROW, N.L. 1963. Theories and practices of industrial waste treatment. Addison-Wesley, Reading (USA), 1963: 557 pp.
- NEMEROW, N.L. 1971. Liquid waste of industry: theories, practices and treatment. Addison-Wesley, Reading (USA), 1971: 518-574.

- PACHECO, A. 1986. Os cemitérios como risco potencial para as águas de abastecimiento. Revista SPAM 17:25-31.
- SCHWARTZ, F.W. 1977. Applications of probabilistic-deterministic modeling to problems of mass transfer in groundwater systems. Proc Ing Symp "Theoretical and Applied Hydrology" (Fort Collins, USA, July 1977); 281-296.
- SELLER, L.E. y CANTER, L.W. 1980. Summary of selected groundwater quality impact assessment methods. NCGWR Report 80-3 (Norman, Oklahoma/USA); 142 pp.
- THOMMAN, R.V., LOBOS, J.E., SALAS, H.J. & DOS SANTOS, J.L. 1987. Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales. (3) Evaluación preliminar del problema. CEPIS Technical Report.
- THOMPSON, J.A.M. & FOSTER, S.S.D. 1986. Effects of urbanisation on groundwater in limestone islands: an analysis of the Bermuda case. J Inst Water Engrs Sci 40:527-540.
- VRBA, J. & ROMIJN, E. (ed.). 1986. Impact of agricultural activities on groundwater. IAH International Contribution to Hydrogeology 5: 332 pp.
- WALKER, W.G., BOUMA, J.; KEENEY, D.R. & OLCOTT, P.G. 1973. Nitrogen transformations during subsurface disposal of septic tank effluent in land; groundwater quality. J Environ Quality 2:521-525.
- WHO. 1982. Rapid assessment of sources of air, water, and land pollution. World Health Organization Offset Publication 62: 113 pp.
- WILSON, J.T. & MCNABB, J.F. 1983. Biological transformation of organic pollutants in groundwater. Trans Am Geophys Union 64:505-523.
- YANEZ, F. 1982. Manual de métodos experimentales para la "Evaluación de lagunas de estabilización". OPS-CEPIS Technical Series 24: 181 pp.
- ZOETMAN, B.C.; GREEF, E. de & BRINKMANN, F.J.J. 1981. Persistency of organic contaminants in groundwater: lessons from soil pollution incidents in The Netherlands. Studies Environ Sci 17:465-478.

APENDICE 1

HOJAS DE INVENTARIO PARA EL RECONOCIMIENTO DE CARGA CONTAMINANTE
AL SUBSUELO

ejemplo usado por el Instituto Geológico (IG) - Companhia de
Tecnología de Saneamento Ambiental (CETESB) - Departamento de
Aguas e Energia Elétrica (DAEE) para reconocimiento regional
en partes del Estado de Sao Paulo, Brasil que pueden ser
adaptadas para otras áreas

AREAS URBANO-RESIDENCIALES

Apéndice 1 (1)

1. DATOS GENERALES
nombre de urbanización:
autoridad/compañía sanitaria:
autoridad/compañía de limpieza:

2. DATOS CLIMATICOS
• precipitación anual promedio (mm/a):
• temperatura anual promedio (°C):
• estación húmeda:

3. ABASTECIMIENTO DE AGUA					
Demografía			Uso del Agua		
pobl. año	área		pobl. fuente	total prodn.	
nombre urb.	(km2)		servida	(m3/a)	
(a)					
(b)					

4. DISPOSICION DE AGUAS RESIDUALES					
General				Alcantarillado	
nombre urb.	área (km2)	sistema	prop. cubierta	tratamiento de desagües	disposición final
(a)					
(b)					

5. RESIDUOS SOLIDOS						
Sistema de Colección			Cantidad	Procesamiento		Disposición Final
coleccion centralizada (si) (no)	o pobl. servida (no)	cantidad generada (T/a)	monto colectado (T/a)	tipo (T/a)	cantidad local (si) (no)	apropiado (si) (no)
(a)						
(b)						

6. OTRAS ACTIVIDADES			
Estaciones de Servicio de Vehículos:			
tipo de combustible	cantidad almacenada	número de tanques	año de instalación
(a)			
(b)			
Industrias de Servicio:			
tipo	ubicación	uso del agua (m3/a)	
(a)			
(b)			

CULTIVO AGRICOLA

Apéndice 1 (2)

1. DATOS GENERALES
localización:
precipitación anual promedio (mm/a):
temperatura anual promedio (°C):
estación húmeda

2. REGIMEN DE CULTIVO									
Cosecha		Irrigación			Fertilizantes			Pesticidas	
tipo	área	sistema	aplic. período	tipo	cantidad	n° de	nombre	cantidad	n° de
(ha)	(ha)	(mm/d)	(d/a)		aplicada	aplic. comercial	comercial	aplicada	aplic.
					(kg/ha/a)			(kg/ha/a)	
(a)									
(b)									
(c)									

(incluye forestación natural y bosque cultivado)

3. GANADERIA				
Tipo	N° de Animales	Sistema Posterior	Area de Pasteo (ha)	Disposición de Residuos
(a)				
(b)				

ACTIVIDAD INDUSTRIAL

1. DATOS GENERALES	
nombre oficial:	ubicación:
nombre comercial:	área del lugar ocupado:
dirección:	fecha de inicio de la producción:
actividad principal:	continuidad de la producción:
	número actual de empleados:

2. MATERIALES CRUDOS		
Descripción	Sistema de Almacenaje	Consumo Anual
(a)		
(b)		
.		
(n) combustibles:		
(m) solventes:		

3. PRODUCTOS FINALES		
Descripción	Sistema de Almacenamiento	Producción Anual
(a)		
(b)		

4. ABASTECIMIENTO DE AGUA	
Fuente de Abastecimiento	Volumen (m3/d)
(a)	
(b)	

(se hace distinción entre fuentes de abastecimientos públicos y privados como ríos, lagos, pozos y manantiales)

5. UTILIZACION DEL AGUA		
Propósito	Volumen Principal (m3/d)	Recirculación (%)
sanitario:		
lavado:		
refrigeración:		
caldera:		
proceso:		

6. EFLUENTES LIQUIDOS			
Tipo	Flujo Principal (m3/d)	Tratamiento (si hay)	Descarga Final
(a)			
(b)			
.			
(n) desagüe sanitario			

7. RESIDUOS SOLIDOS			
Tipo	Volumen (T/a)	Tratamiento (si hay)	Disposición Final
(a)			
(b)			

LAGUNAS EFLUENTES

Apéndice 1 (4)

1. DATOS GENERALES
tipo y nombre:
localización:
fecha inicio de operación:
fecha finalización de operación (si es aplicable):

2. DETALLES DE CONSTRUCCION
área total ocupada (ha):
profundidad promedio (m):
número de lagunas:
tipo de lagunas:
profundidad mínima al nivel freático (m) (estación húmeda):
método de impermeabilización (si hay):

(incluya bosquejo si es posible)

3. BALANCE DEL AGUA
entrada promedio (m ³ /d):
descarga promedio (m ³ /d):
precipitación (período correspondiente) (m ³ /d):
evaporación (período correspondiente) (m ³ /d):
tiempo de retención (d):
infiltración (medida directa controlando entrada y descarga (mm/hr):
uso de efluente:

4. CALIDAD DEL EFLUENTE		
Origen del Efluente	Volumen (m ³ /d)	%
(a)		
(b)		
TOTAL		

DISPOSICION DE RESIDUOS SOLIDOS

Apéndice 1 (5)

1. DATOS GENERALES
nombre de relleno sanitario o botadero:
ubicación:
estatus operacional:

2. DETALLES DE CONSTRUCCION
área actual (ha):
área máxima proyectada (ha):
profundidad del nivel freático/altura promedio (m):
profundidad mínima (m)(estación húmeda):
impermeabilización basal:
- tipo:
- espesor (m):
impermeabilización superficial:
- tipo:
- espesor (m):
condición final de superficie del relleno:
sistema de colección del lixiviado:
total de residuos dispuestos (T):
cantidad de residuos proyectados (T):
disposición actual diaria de residuos (T):
monitoreo de calidad de aguas subterráneas:
- no. de perforaciones:
- frecuencia del análisis:
- determinantes analizados:

(incluya bosquejo si es posible)

3. BALANCE DE AGUA
precipitación anual promedio (mm/a):
tasa de irrigación de relleno (mm/a) (si hay):
temperatura anual promedio (°C):
drenaje superficial de aguas:
tipo de suelo en área de relleno:
tipo de vegetación en áreas de relleno:
inclinación de tierra (%):

4. ORIGEN DE PERDIDAS	
Conocidos:	Proporción (%)
- industrial clase I: *	
- industrial clase II:	
- industrial clase III:	
- doméstico:	
- hospitalario:	
- agroindustrial:	
- minero:	
Desconocidas:	

(* detalles específicos)