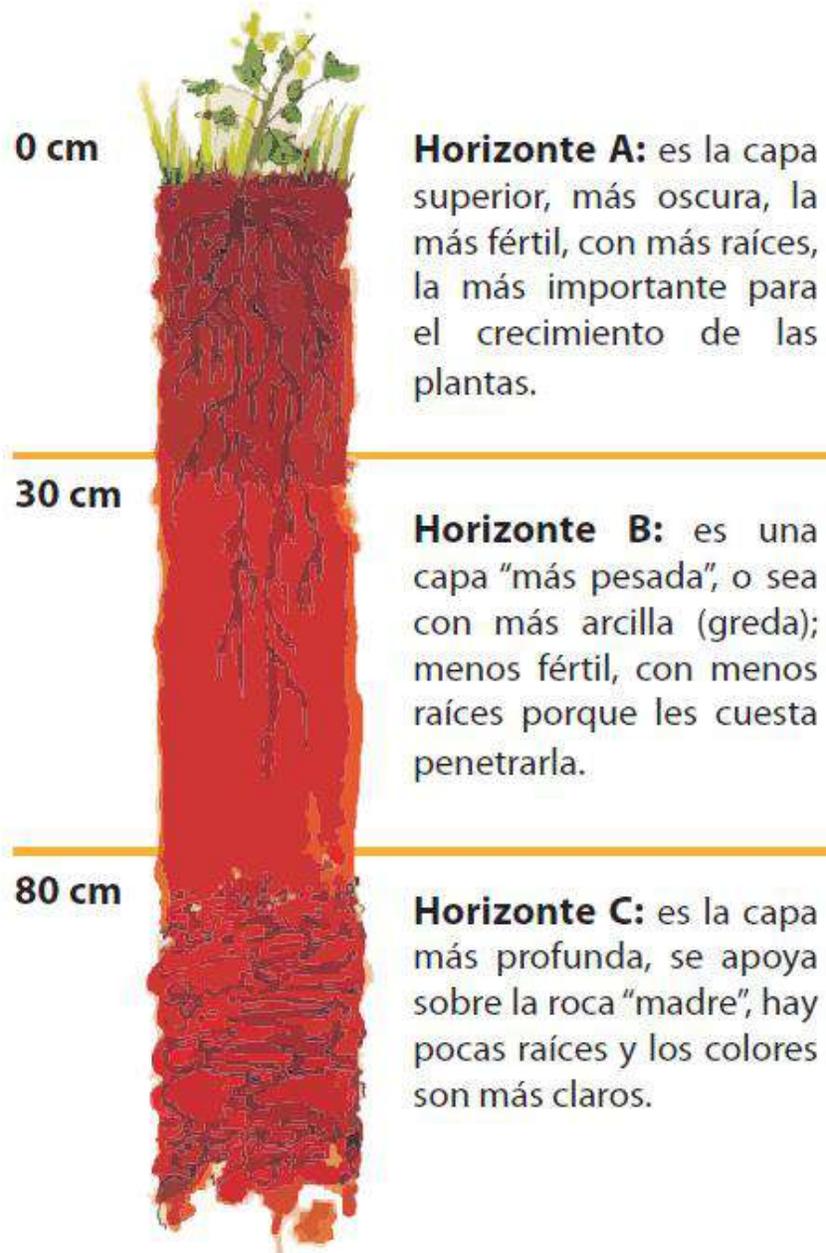


INGENIERÍA AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS

Suelo: parte superior de la tierra donde crecen las plantas, extrayendo agua, nutrientes y aire. Se observan diferentes estratos u “horizontes”



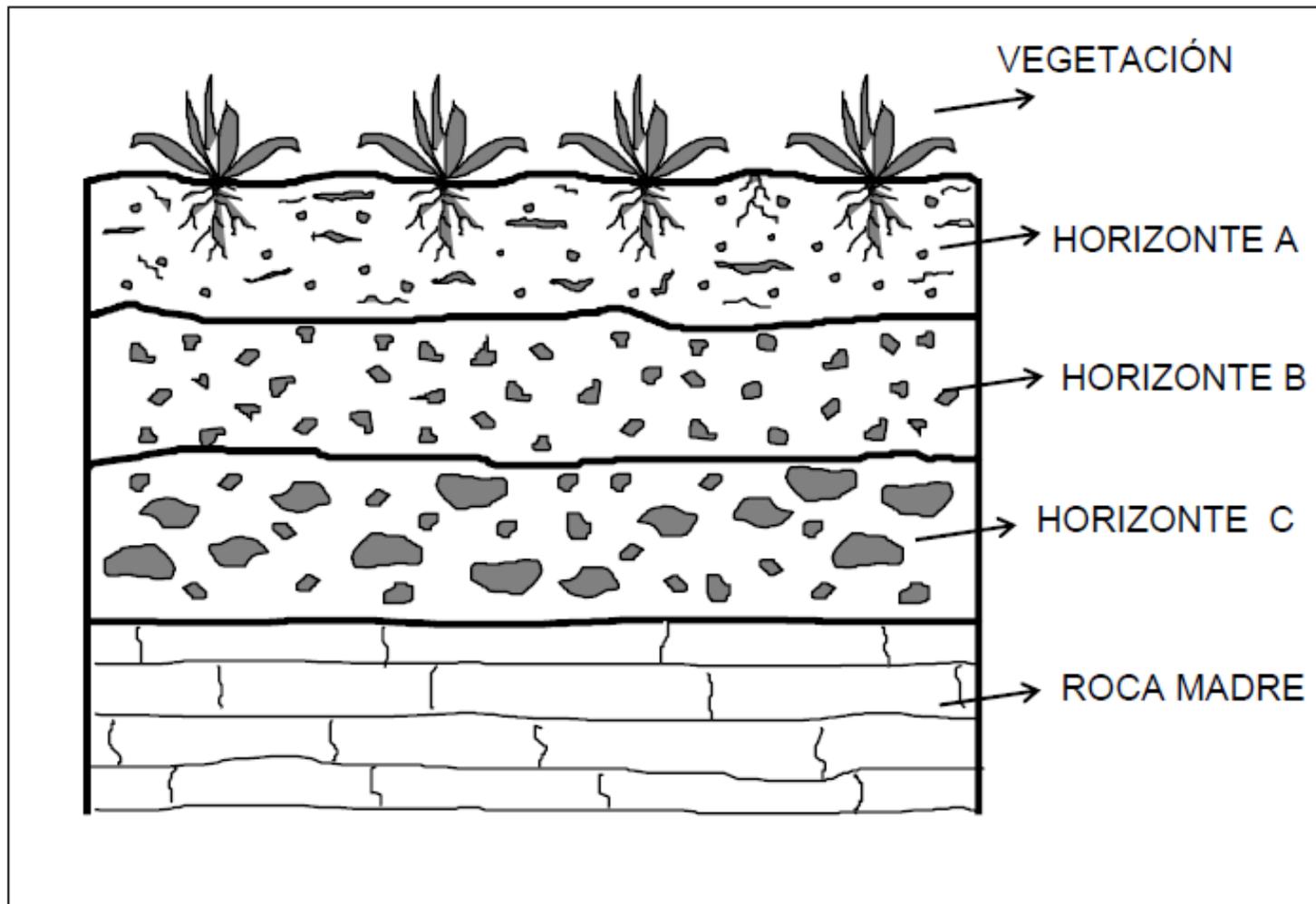


FIGURA 3.12: PERFIL ESQUEMÁTICO DE UN SUELO

SÓLIDOS = Material Mineral +
Materia Orgánica (humus)



AGUA (con nutrientes)

POROS CON AI

PARTE SÓLIDA, compuesta por granos de arena, de limo y de arcilla, por lo general agrupados en pequeños terrones de distintos tamaños. También hay materia orgánica (humus, que se forma con restos de plantas y animales muertos); es muy importante porque brinda nutrientes y hace al suelo "esponjoso". Le da el color oscuro al suelo.

POROS GRANDES Y CHICOS, entre y dentro de los terrones. Los más grandes llenos de aire, necesario para que respiren las raíces y pequeños animales. Por ellos también circula agua. Los más pequeños son los que almacenan el agua.

Composición del suelo:





Arcilla



<0.002 mm



Limo



0.002 - 0.05 mm



Arena



0.05 - 2.0 mm

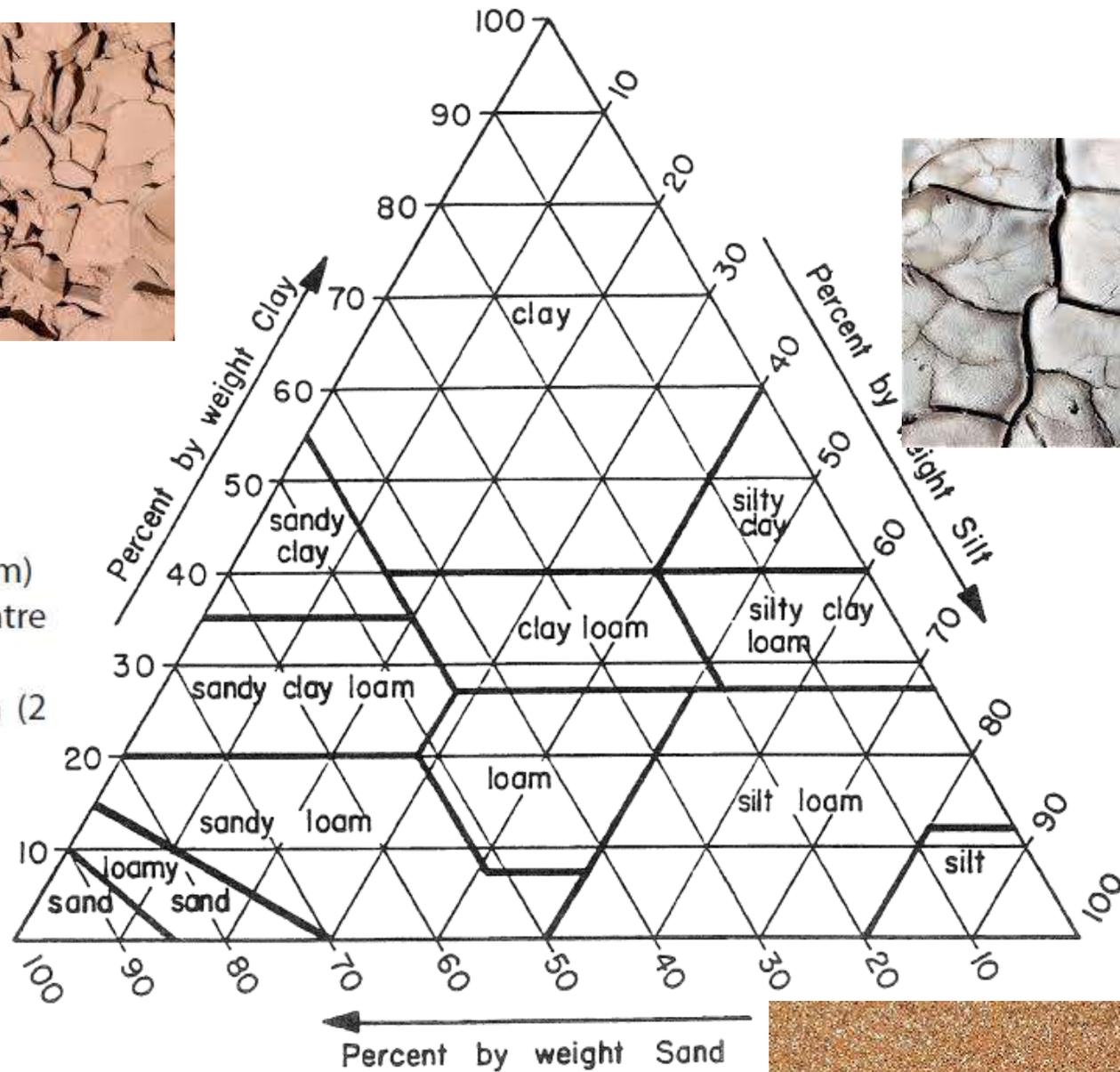


FIGURE 8.2 Soil classification system. (From Hillel, D. (1980) *Fundamentals of Soil Science*, McGraw-Hill Press, New York. With permission.)

Arena: las más grandes (entre 0,05 y 2 mm)
 Limo: tamaño entre arena y arcilla (entre 0,05 y 0,002 mm)
 Arcilla: partículas menores a 0.002 mm (2 micras)

Suelos

- Erosión
- Contaminación directa a través de contacto o ingesta
- Por tratarse de un material poroso permite el flujo de agua y gases

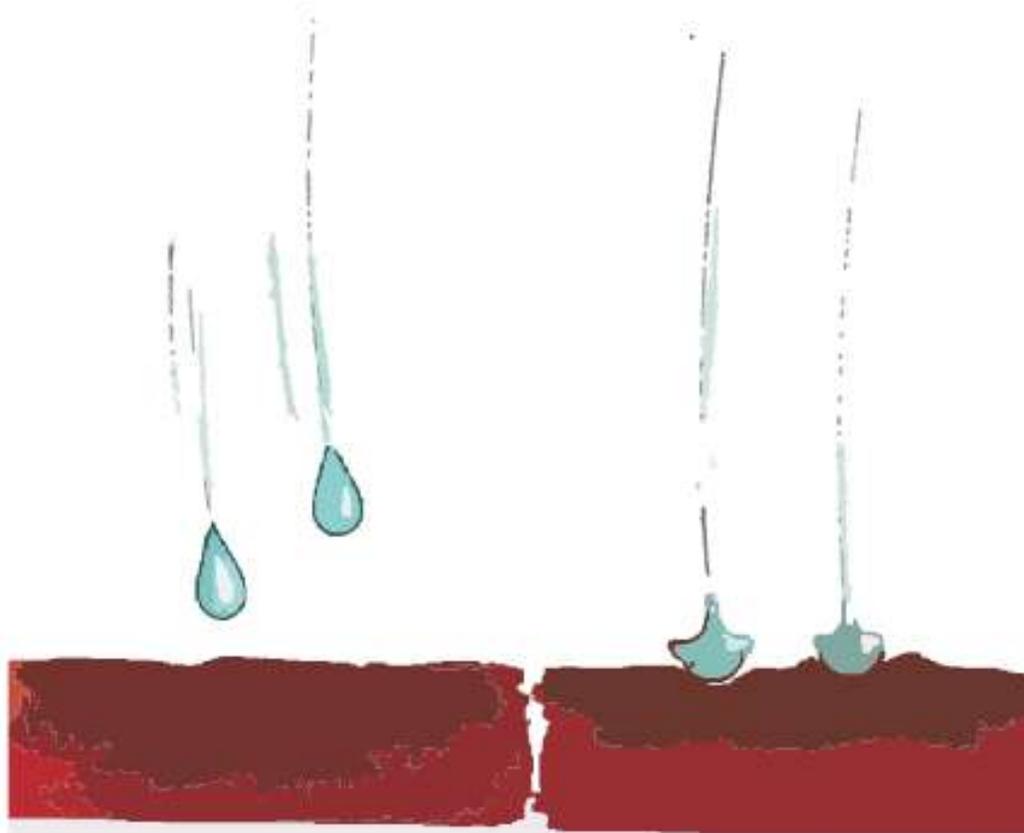
Erosión de suelos

La erosión es un proceso natural donde la acción del viento, el agua y otros agentes meteóricos, tiende a modificar el relieve estructural y, finalmente, a destruirlo. El agente principal de erosión es el agua corriente, debido a su alta capacidad como solvente, como medio para transporte de material de energía.

Los factores que condicionan la erosión son:

- El clima, ya que determina las cantidades de agua que circulan por el suelo, así como los regímenes de viento.
- Las condiciones estructurales de un terreno, que fijan las pendientes e influyen sobre la dirección de escurrimiento del agua.
- La naturaleza de las rocas sobre las que ejerce la acción, el agua y el aire.

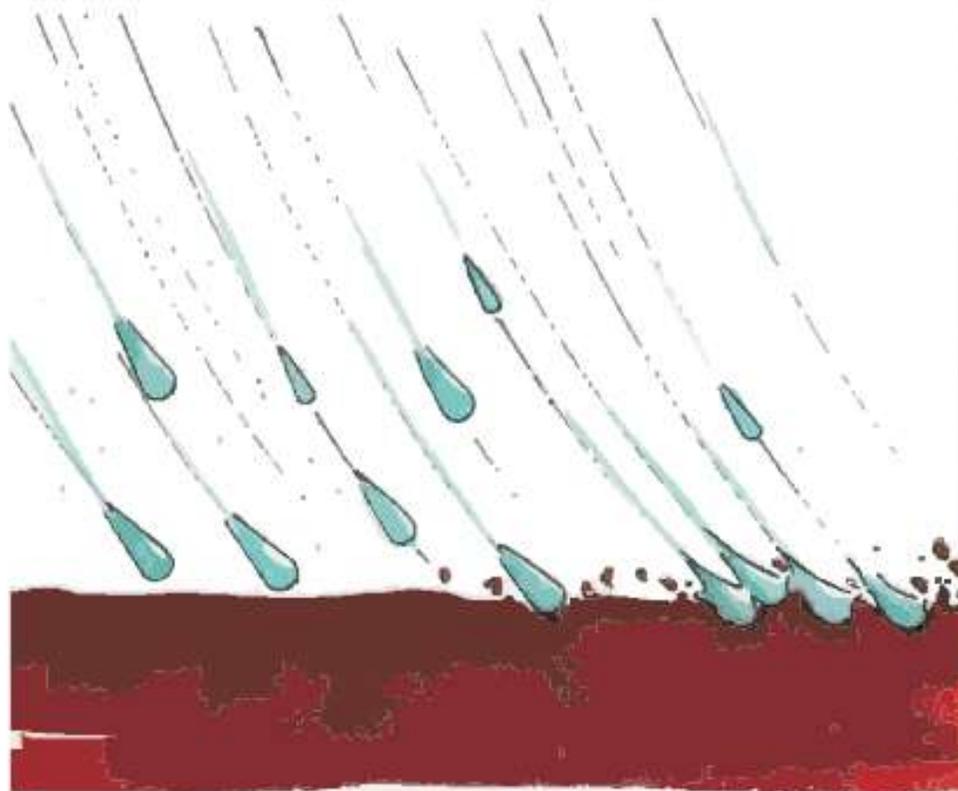




Las gotas de lluvia caen sobre el suelo a gran velocidad y con mucha fuerza.

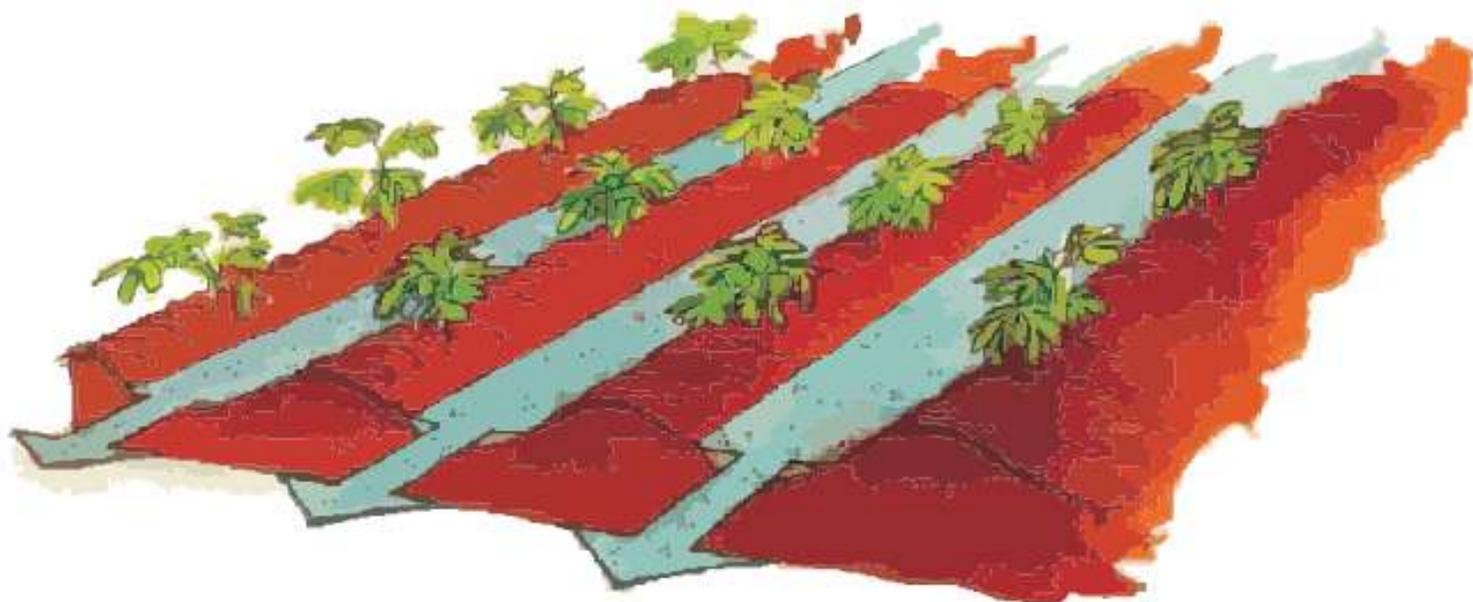
Cuándo chocan contra el suelo descubierto, producen un fuerte impacto.



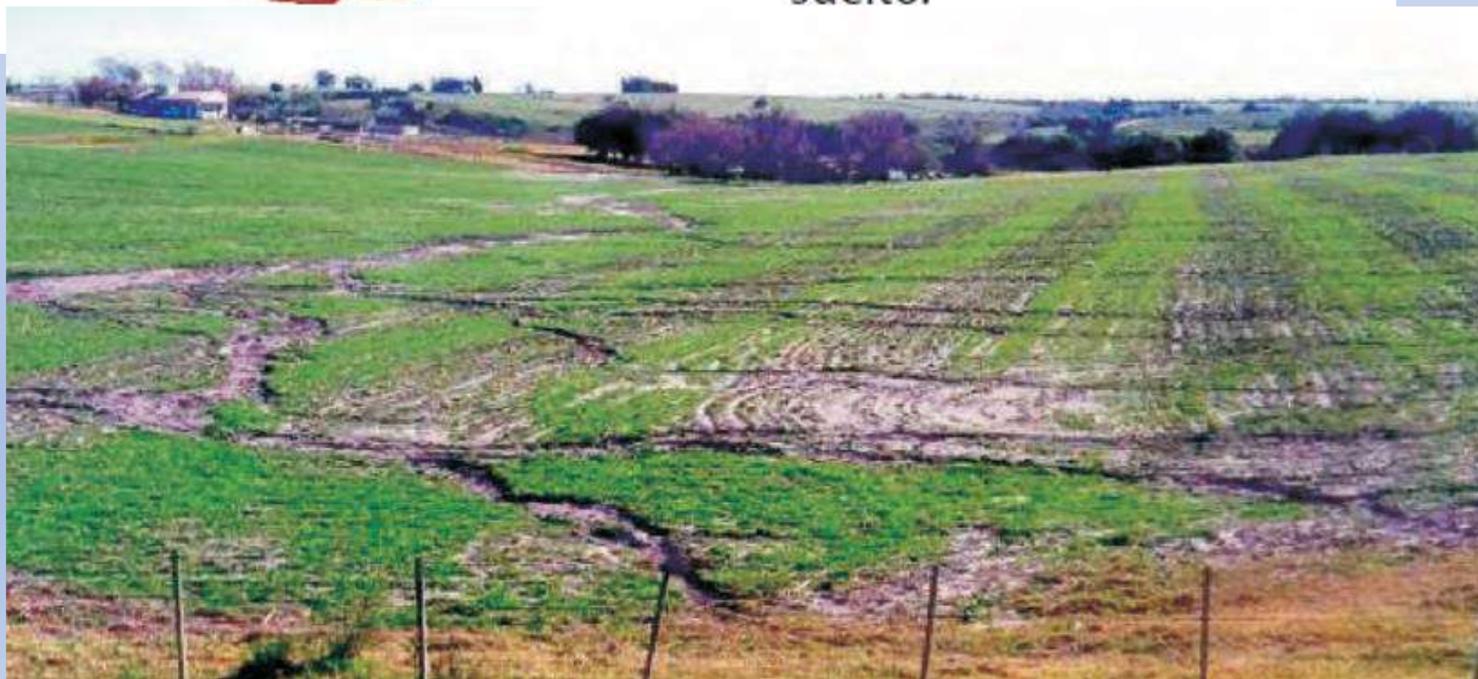


Con el choque se deshacen los terrones y se desprenden partículas de suelo, que son levantadas por las gotas y quedan sueltas.





Cuando llueve más de lo que el suelo puede absorber, el agua comienza a escurrir por la superficie, a mayor velocidad cuanto mayor y más larga es la pendiente (la caída del terreno) llevándose el suelo que había quedado suelto.



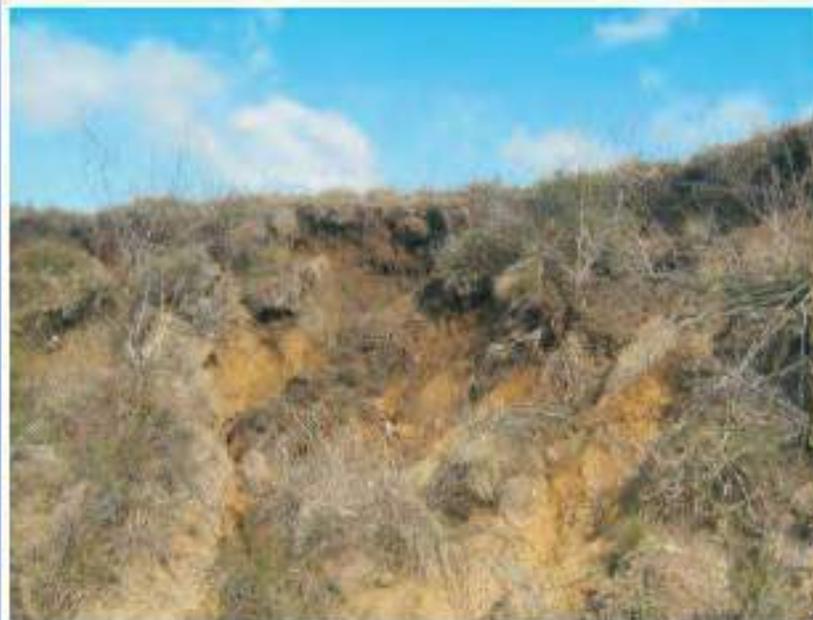
Erosión laminar



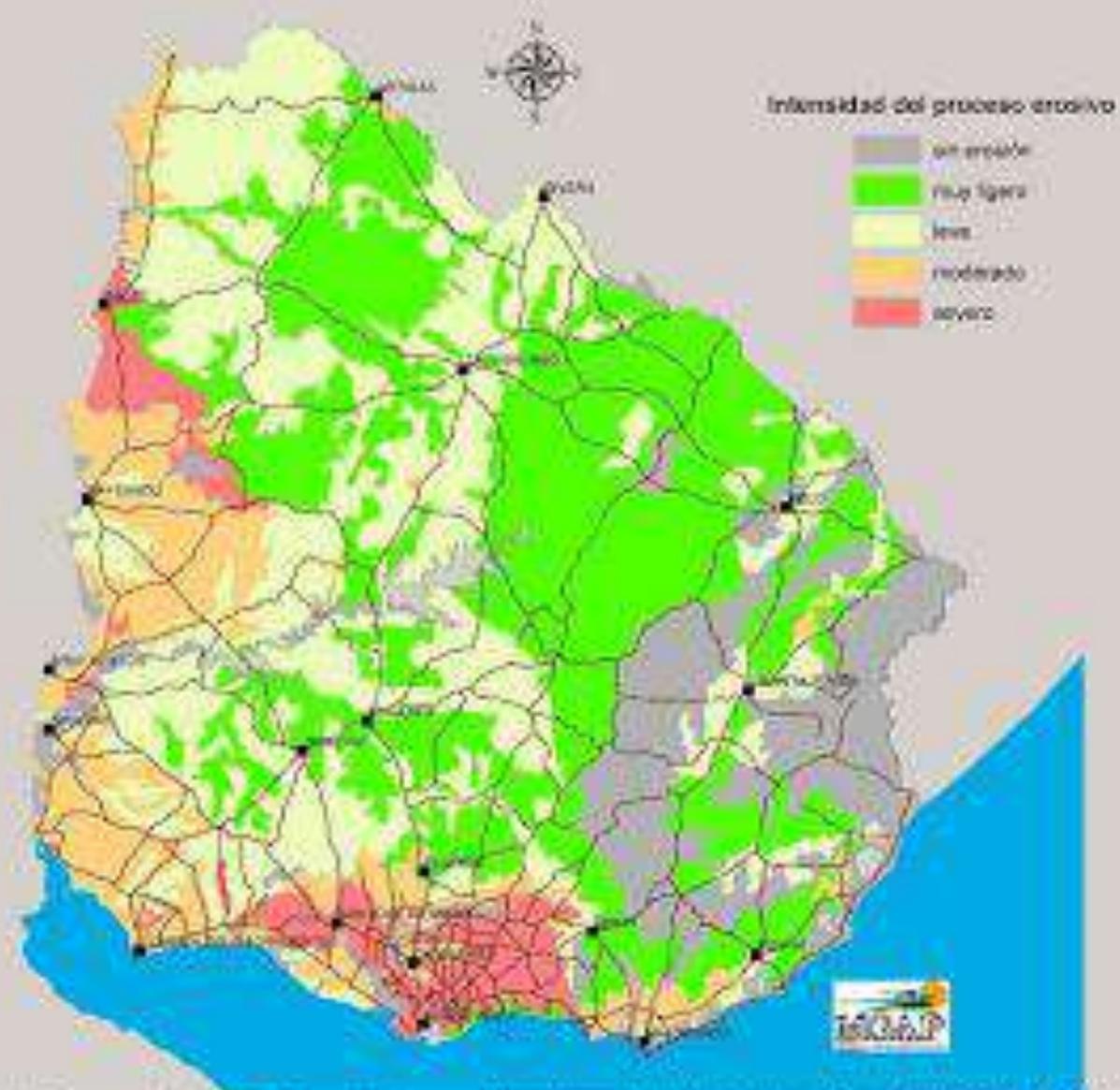
Erosión en surcos

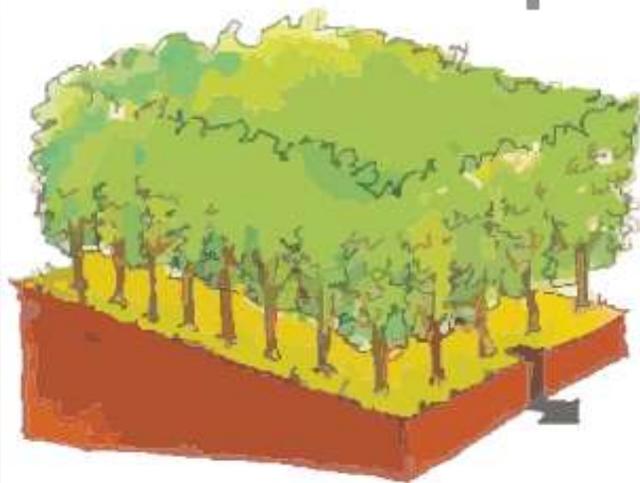


Erosión en cárcavas

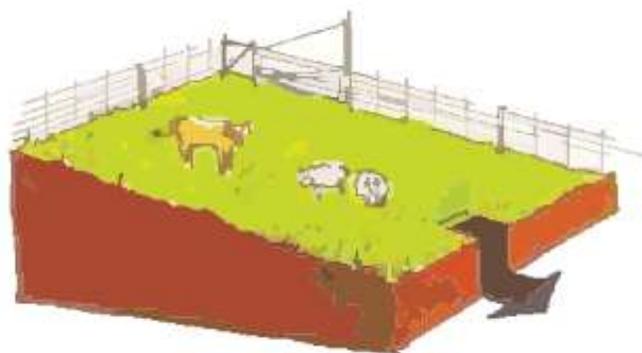


INTERPRETACIÓN DE LA CARTA DE EROSIÓN ANTRÓPICA

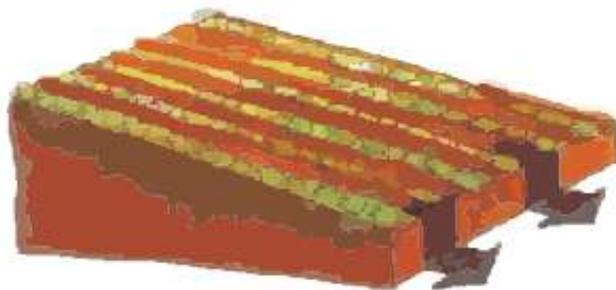




MONTE O BOSQUE
Pérdidas de suelo: 70 Kg/há por año



PASTURA
Pérdidas de suelo: 700 kg/há por año



MAL USO DEL SUELO:
CULTIVO CONTINUO
EN LÍNEA A FAVOR DE LA PENDIENTE
Pérdidas de suelo: 20 - 40.000 Kg/
há/año (20 - 40 ton/há/año)

ACCIONES PARA PREVENIR LA EROSIÓN:

- Rotación de cultivos y usos
- Fertilización
- Laboreo adecuado (herramientas adecuadas, humedad adecuada, evitar dejar surcos, no quemar cobertura, respetar desagües naturales, etc.)
- Siembra directa
- Fajas empastadas
- Terrazas

Contaminación



Niños 

Concentración de plomo en sangre ($\mu\text{g Pb/dL}$)

 Adultos



Plombemia y manifestaciones clínicas. (Tomado de Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Case Studies in Environmental Medicine: Lead Toxicity. US Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2006).

Tabla 1: Valores de Referencia para suelos de uso residencial

	Plomo (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cadmio (mg/Kg)
Niveles guía de <i>Canadian Councils of Ministers of the Environment</i> (CCME), Canadá. (1999)	140	64	10
Niveles guía de <i>Environmental Protection Agency</i> (EPA), Estados Unidos de América (2001).	400	230	70

Tabla 2: Valores de Referencia para suelos de uso industrial

	Plomo (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)
Niveles guía de <i>Canadian Councils of Ministers of the Environment</i> (CCME), Canadá. (1999)	600	87	22
Niveles guía de <i>Environmental Protection Agency</i> (EPA), Estados Unidos de América. (2001)	1200	510	900



Figura 1: Muestreo superficial



Figura 2: Herramientas del muestreo



Figura 3: Muestreo subsuperficial



Figura 4: Muestreador Estándar



Figura 5: Muestreo en profundidad con pala americana



Figura 6: Retroexcavadora



Figura 7: Perforadora rotatoria

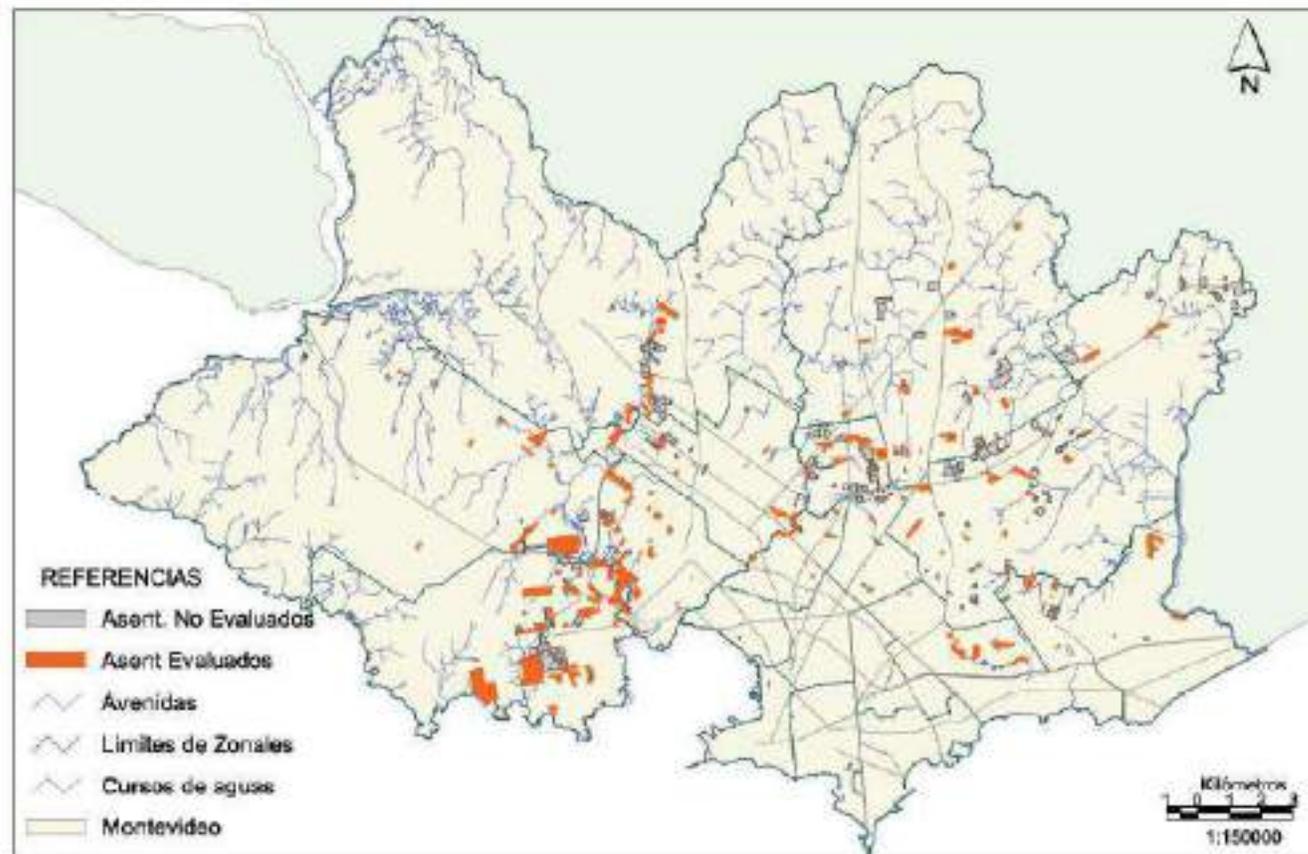
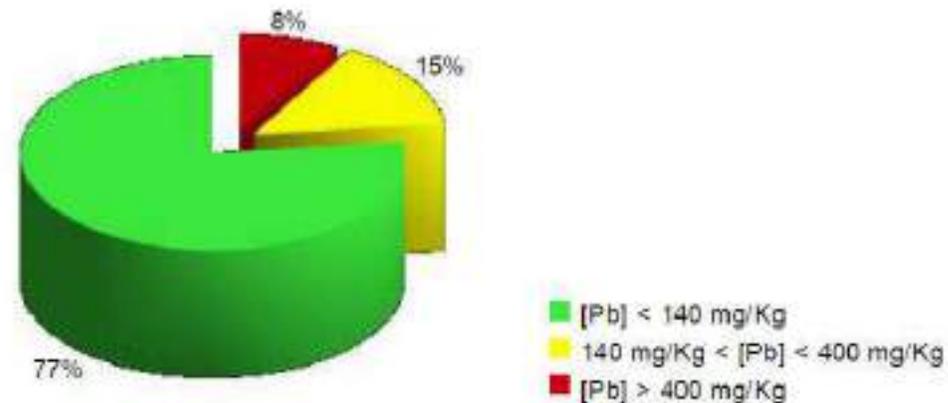


Fig. 11: mapa de Montevideo con la ubicación de los asentamientos evaluados en el periodo 2001-2011

Concentraciones de Plomo en Suelos en Asentamientos (2001_2011)



Concentraciones de Cromo en Suelos en Asentamientos (2001_2011)

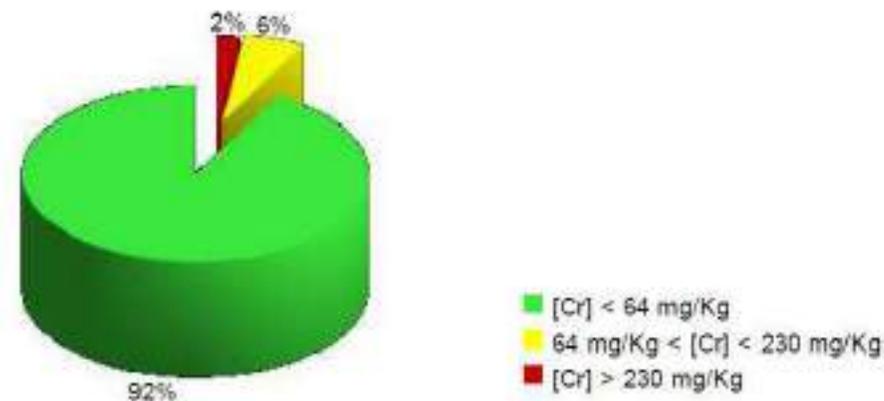
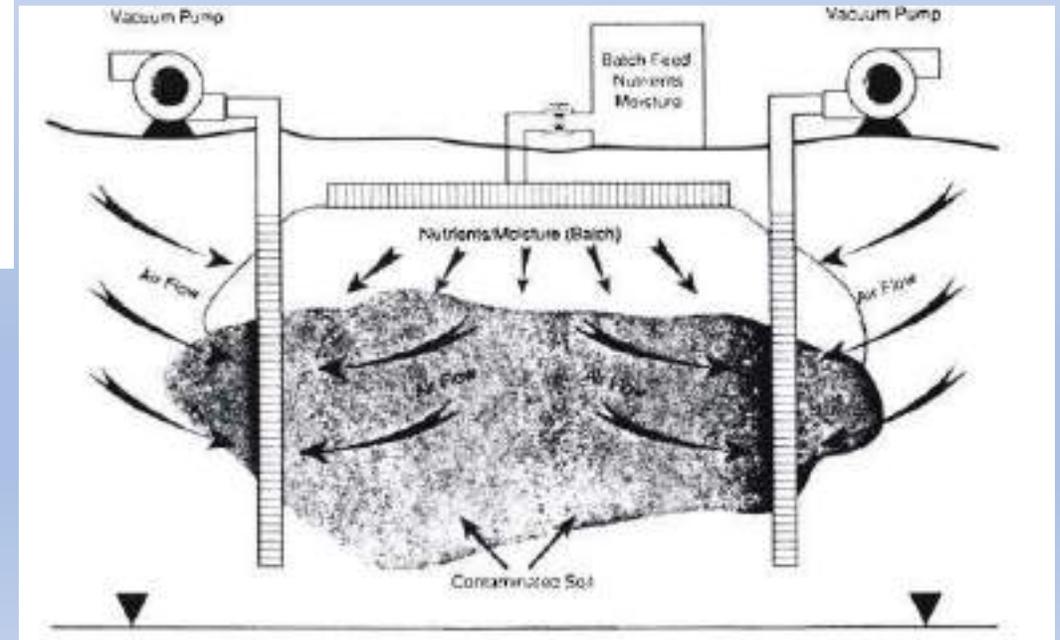
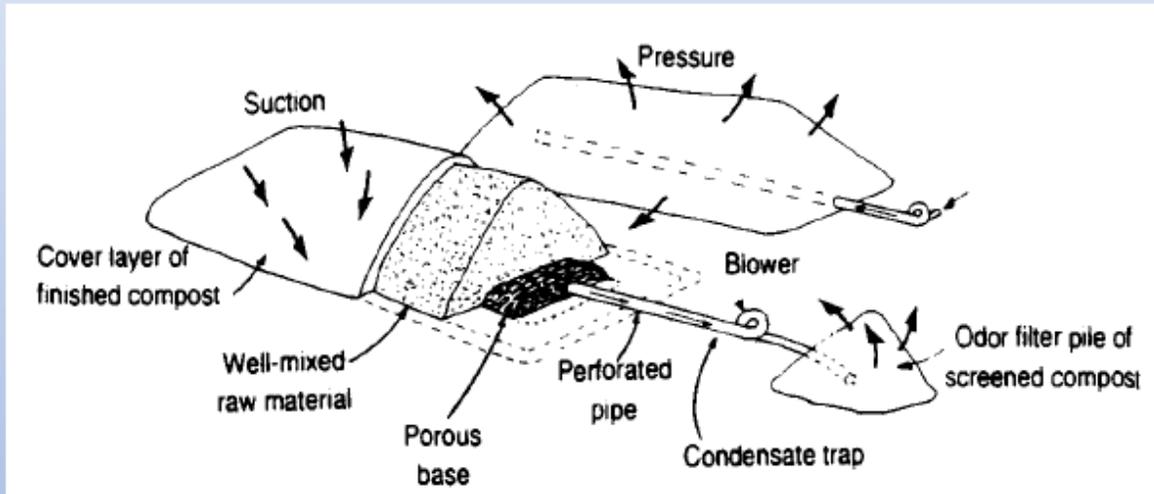
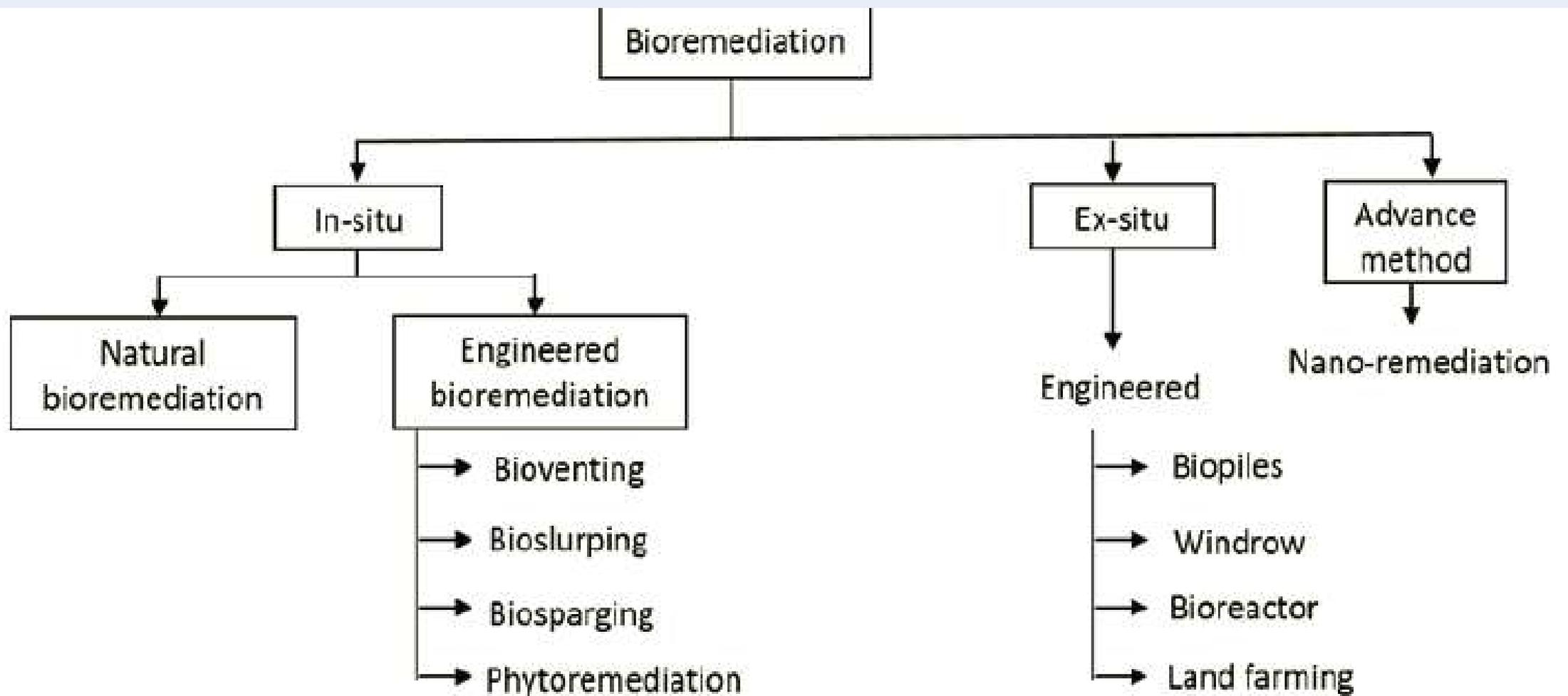




Fig. 26-27: Aplicación de fosfato-apatita a sitio contaminado (R. Rincón), a través de 5 aplicaciones sucesivas de 7 toneladas de producto en un área de aproximadamente 5.000 m². Fuente: Laboratorio de Calidad Ambiental (Intendencia Municipal de Montevideo), año 2004.

Biorremediación: proceso para remover contaminantes de un suelo (o agua): tratamiento en reactores, tratamiento *in situ*, landfarming, compostaje





Agua en suelos

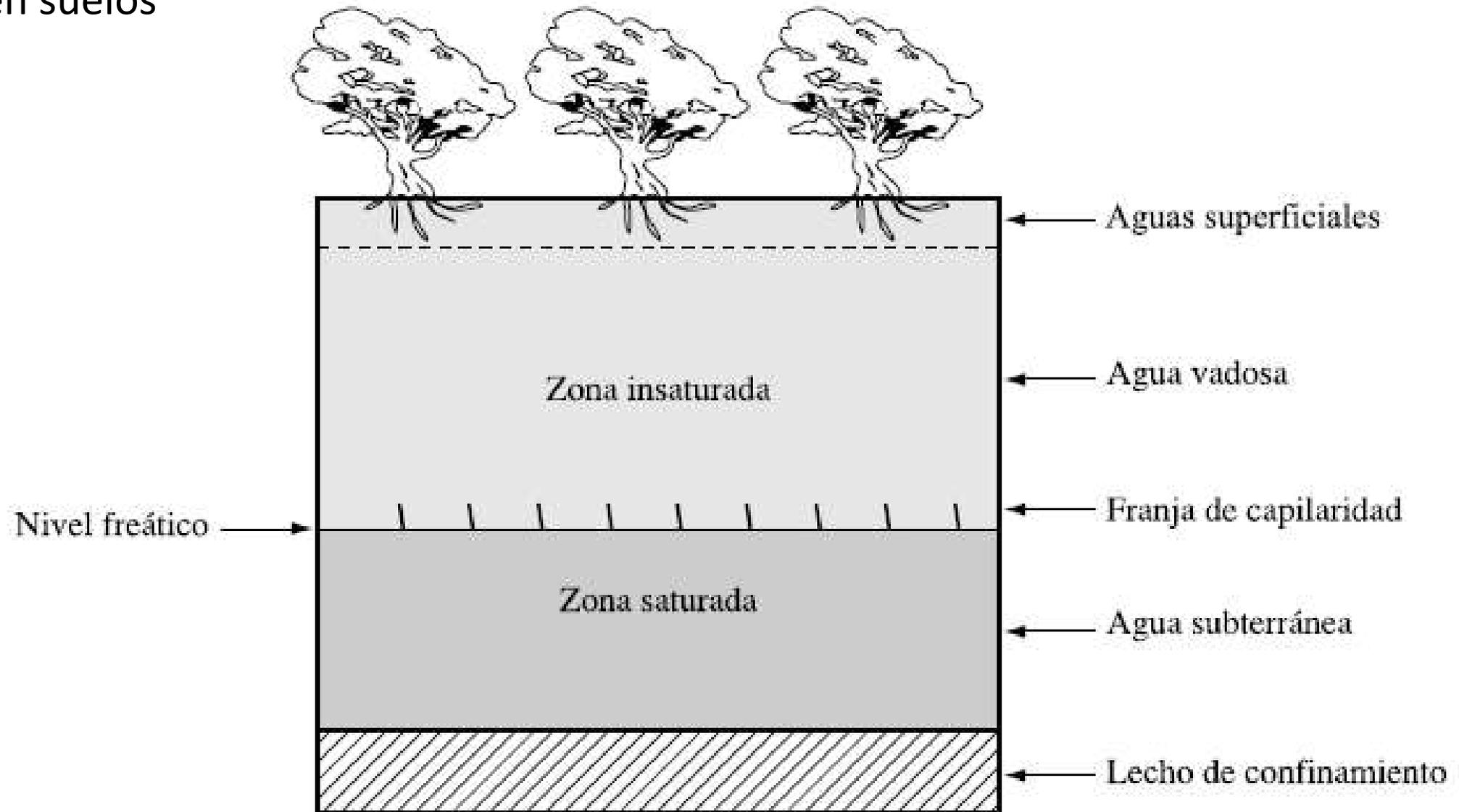


FIGURA 5.26. Clasificación de zonas subsuperficiales.

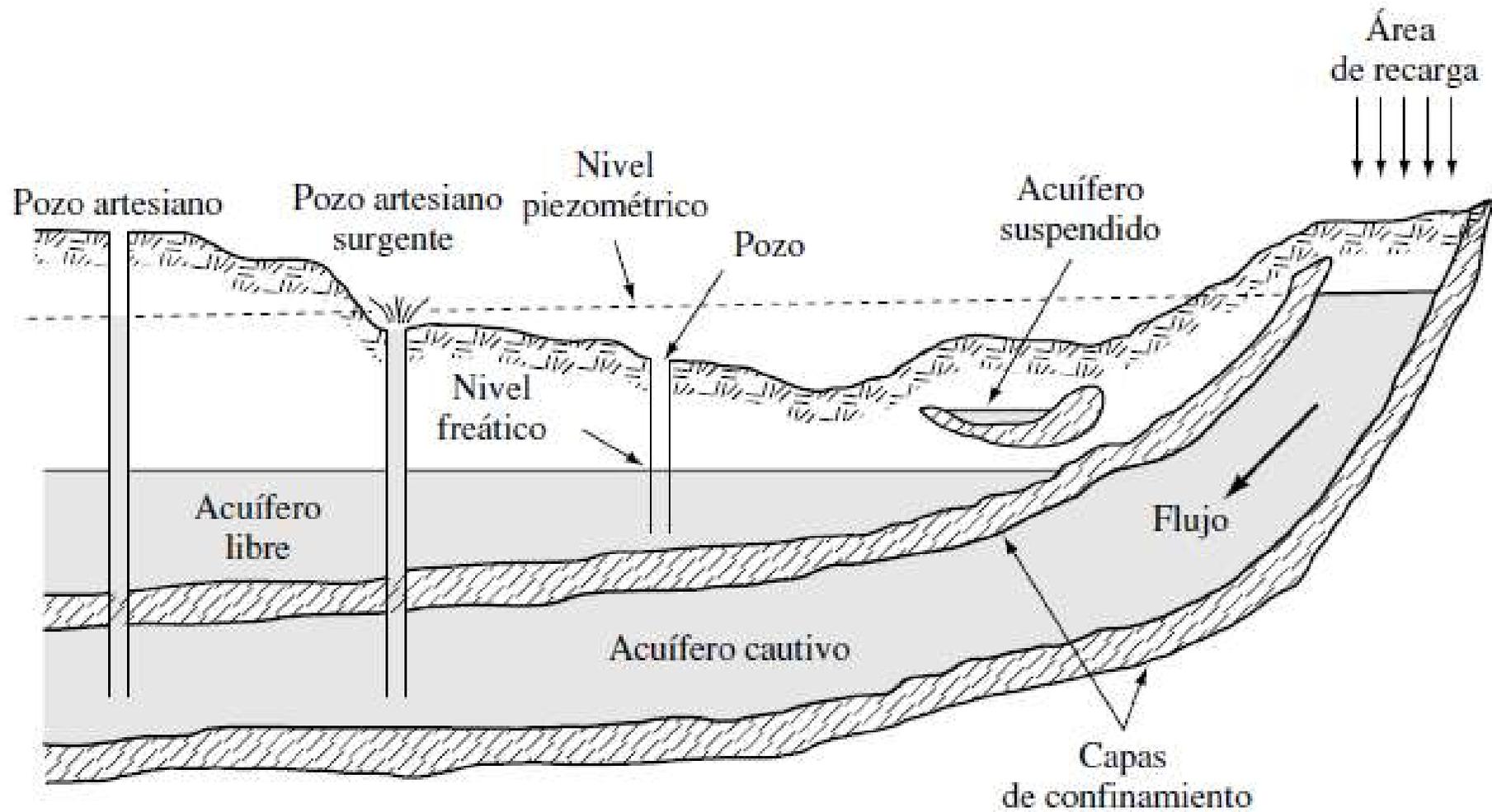


FIGURA 5.27. Acuíferos libres y cautivos (o confinados), un acuífero suspendido, un pozo y un pozo artesiano.

Acuíferos libres: consiste en una zona permeable saturada de agua, basada sobre un estrato impermeable. Sobre dicha zona existe una zona permeable no saturada de agua, donde los poros y grietas contienen agua y aire. El agua en la superficie del acuífero está a presión atmosférica.

Acuíferos confinados: la roca permeable saturada de agua queda confinada entre dos capas impermeables, de modo que la presión del agua en la superficie del acuífero es mayor que la atmosférica.

El contenido de agua que puede almacenarse en un acuífero depende de la porosidad:

$$\text{Porosidad } (\eta) = \frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen total}}$$

Pero la cantidad de agua que puede efectivamente extraerse depende del rendimiento específico o porosidad efectiva

TABLA 5.11. Valores representativos de porosidad y rendimiento específico

Material	Porosidad (%)	Rendimiento específico (%)
Arcilla	45	3
Arena	34	25
Grava	25	22
Gravilla y arena	20	16
Arenisca	15	8
Caliza, pizarra	5	2
Cuarcita, granito	1	0,5

Fuente: Linsley *et al.*, 1992.

Para un acuífero de arena que presenta las características dadas en la Tabla 5.11, ¿qué volumen de agua habría almacenada en una columna saturada de sección igual a 1 m^2 y una profundidad de 2 m ? ¿Cuánta agua podría ser extraída de este volumen?

$$\begin{aligned} \text{Volumen de agua} &= \text{Porosidad} \times \text{Volumen de material} = \\ &= 0,34 \times 2 \text{ m}^3 = 0,68 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} &= \text{Rendimiento específico} \times \text{Volumen de material} = \\ &= 0,25 \times 2 \text{ m}^3 = 0,5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

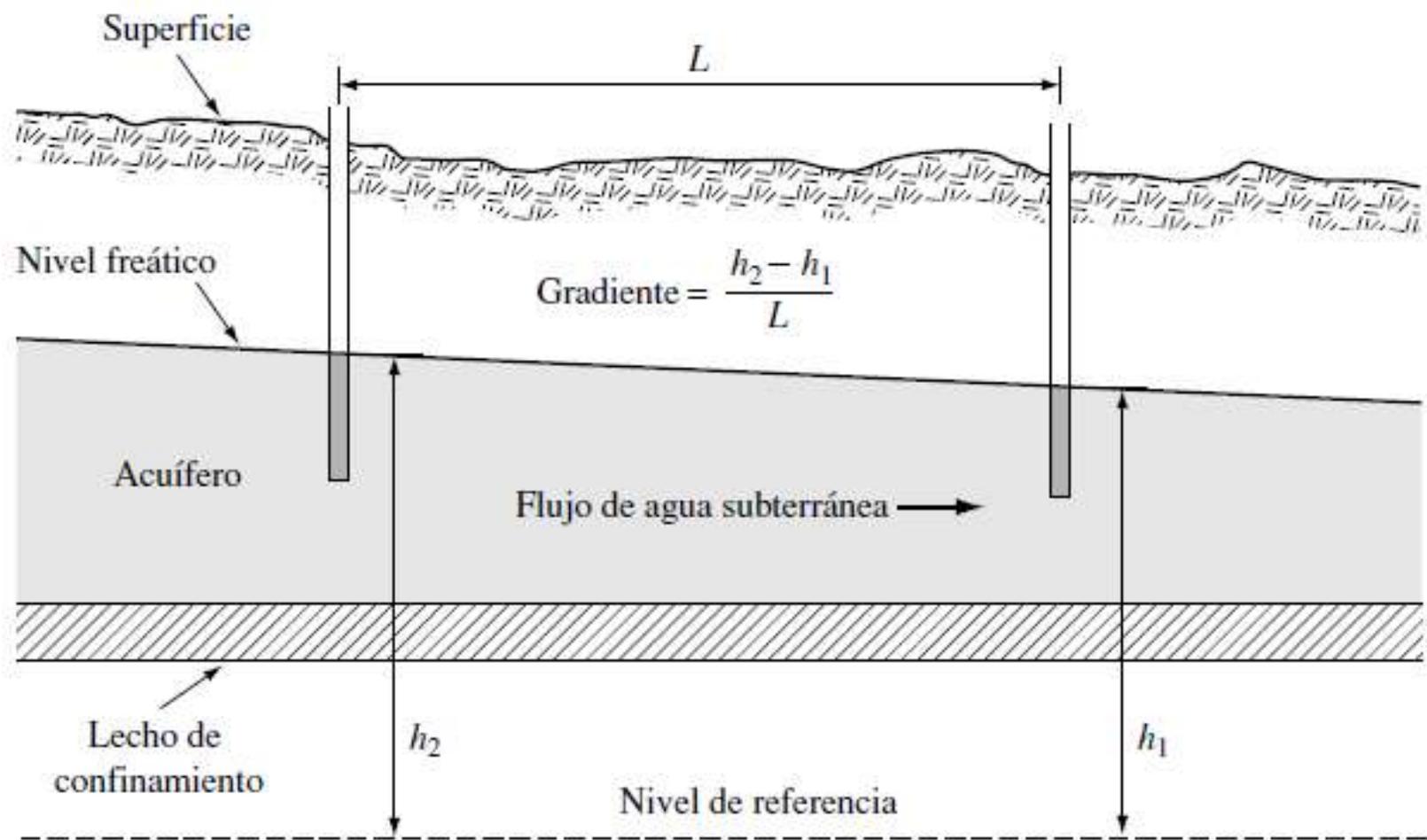


FIGURA 5.28. Nivel hidrostático y gradiente en un acuífero libre. El flujo de agua subterránea va de izquierda a derecha en el plano de la página, y el gradiente es $\Delta h/L$.

El transporte de contaminantes en las aguas subterráneas depende de las condiciones de flujo del sistema. El flujo volumétrico de agua subterránea, F , a través de un área transversal A , se puede modelar de acuerdo a la ley de Darcy:

$$F = K A \frac{dh}{dx}$$

donde K es la conductividad hidráulica (o coeficiente de conductividad) y dh/dx es el gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica puede variar en varios órdenes de magnitud para diferentes tipos de materiales; algunos valores ilustrativos de K se presentan a continuación:

MATERIAL	K (m/día)
Arcilla	0,0004
Arena	40
Pedregoso	4.000
Caliza densa	0,04
Granito, cuarzo	0,0004

La velocidad a la cual se transporta un contaminante disuelto en un acuífero, v , se puede estimar en base a la relación de Darcy, tomando en consideración la porosidad del medio (Φ , fracción de volumen de poros respecto del volumen total):

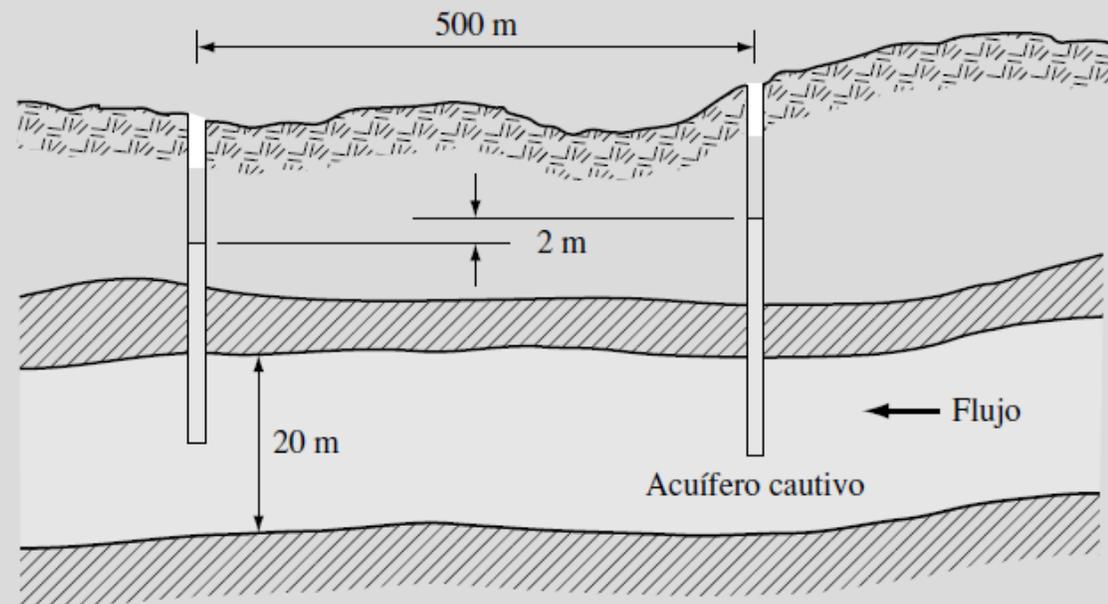
$$v = \frac{F}{A \Phi}$$

Tabla 4.3. Valores típicos de la conductividad hidráulica (Coduto, 1999).

Tipo de suelo	Conductividad hidráulica cm/s
Grava limpia	1 a 100
Arena y grava mezclada	10^{-2} a 10
Arena gruesa limpia	10^{-2} a 1
Arena fina	10^{-2} a 10^{-1}
Arena limosa	10^{-3} a 10^{-2}
Arena arcillosa	10^{-4} a 10^{-2}
Limo	10^{-8} a 10^{-2}
Arcilla	10^{-10} a 10^{-6}

EJEMPLO 5.12. Flujo en un acuífero

Un acuífero cautivo de 20 m de espesor tiene dos pozos de observación espaciados 500 m en la dirección del flujo. La diferencia del nivel del agua en los pozos es de 2 m (diferencia de nivel piezométrico). La conductividad hidráulica es de 50 m/día. Estimar la velocidad del agua por metro de distancia perpendicular al flujo (caudal).

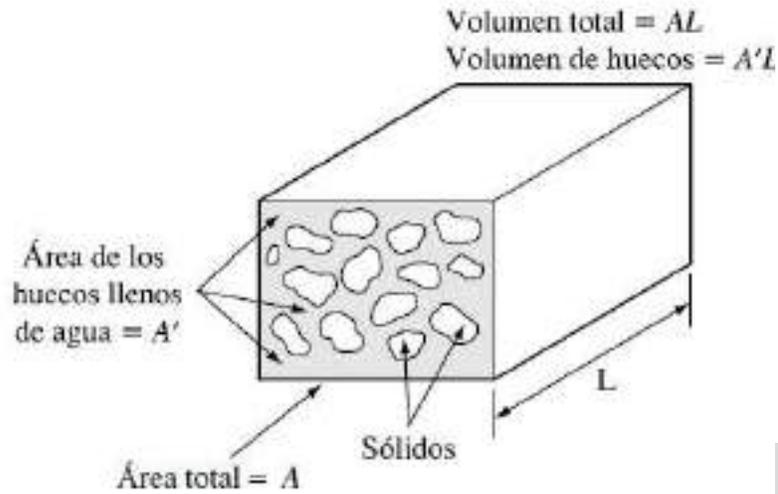


$$\frac{dh}{dL} = \frac{2 \text{ m}}{500 \text{ m}} = 0,004$$

$$Q = KA \left(\frac{dh}{dL} \right) = 50 \text{ m/día} \times 1 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 0,004 =$$

$$= 4 \text{ m}^3/\text{día por metro de ancho}$$

$$v' = \frac{\text{Velocidad de Darcy}}{\text{Porosidad}} = \frac{v}{\eta}$$



Supongamos que el acuífero del Ejemplo 5.12 ha sido contaminado por un gradiente arriba de los dos pozos. Consideremos el pozo gradiente arriba como un pozo *de observación* cuyo propósito es facilitar la detección temprana de la pluma que se aproxima para ayudar a proteger al segundo pozo de agua potable. ¿Cuánto tiempo después de que el primer pozo se contamine es esperable que el agua del segundo lo haga también? Asumamos las siguientes tres afirmaciones (que podrán ser después cambiadas):

1. Ignoremos la dispersión o difusión de la pluma.
2. Asumamos que la pluma se mueve a la misma velocidad que el agua.
3. Ignoremos el efecto «arrastre» del pozo de agua potable.

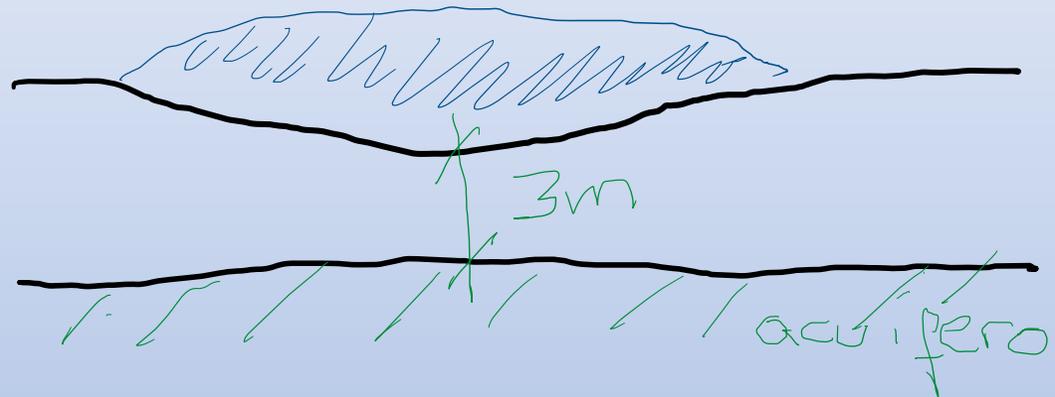
El acuífero tiene una porosidad del 35%.

$$\text{Velocidad de Darcy } v = K \frac{dh}{dL} = 50 \text{ m/día} \times 0,004 = 0,20 \text{ m/día}$$

$$v' = \frac{0,20 \text{ m/día}}{0,35} = 0,57 \text{ m/día}$$

$$t = \frac{500 \text{ m}}{0,57 \text{ m/d}} = 877 \text{ días} = 2,4 \text{ años}$$

Un sitio de disposición final de residuos se encuentra ubicado sobre una capa arcillosa de 3 m de espesor, debajo de la cual hay un acuífero. Se ha determinado que la conductividad de esa arcilla es de 1×10^{-7} cm/s. Calcular cuánto tiempo demora el lixiviado en contaminar el acuífero.



Sin embargo, hay una zona más arenosa donde la conductividad es 1×10^{-4} cm/s

TABLA 5.13. Los 25 contaminantes más frecuentemente detectados en el agua subterránea de lugares con residuos peligrosos

Lugar	Compuesto	Origen
1	Tricloroetileno	Limpiadores en seco, desengrasantes de metales
2	Plomo	Gasolina (hasta 1975), minería, materiales de construcción (tuberías), industria
3	Tetracloroetileno	Limpiadores en seco, desengrasantes de metales
4	Benceno	Gasolina, industria
5	Tolueno	Gasolina, industria
6	Cromo	Cromado de metales
7	Cloruro de metileno	Desengrasantes, disolventes, quitapinturas.
8	Zinc	Industria, minería
9	1,1,1 Tricloroetano	Limpiadores de plásticos y metales
10	Arsénico	Minería, industria
11	Cloroformo	Disolventes
12	1,1 Dicloroetano	Desengrasantes, disolventes
13	1,2 Dicloroetano, <i>trans</i>	Transformación de producto de 1,1,1 tricloroetano
14	Cadmio	Minería, cromado
15	Manganeso	Industria, minería, en la naturaleza como óxido
16	Cobre	Industria, minería
17	1,1 Dicloroetano	Industria
18	Cloruro de vinilo	Industria discográfica
19	Bario	Industria, producción de energía
20	1,2 Dicloroetano	Desengrasantes de metales, quitapinturas
21	Etilbenceno	Fabricación de estireno y asfalto, gasolina
22	Níquel	Industria, minería
23	Di(2-etilhexi)ftalato	Disolventes, gasolina
24	Xilenos	Disolventes, gasolina
25	Fenol	Tratamiento de la madera, medicamentos

Fuente: National Research Council, 1994.

Líquidos de fase no acuosa, ligeros (LNAPL) y densos (DNAPL)

TABLA 5.14. Ejemplos de líquidos de fase no acuosa		
Contaminante	Peso específico	Solubilidad en agua (mg/L)
DNAPL		
Tetracloruro de carbono	1,58	$7,57 \times 10^{-2}$
Tricloroetileno	1,47	$1,10 \times 10^{-3}$
Tetracloroetileno	1,63	$1,50 \times 10^{-2}$
Fenol	1,24	$9,3 \times 10^{-4}$
LNAPL		
Benceno	0,873	$1,75 \times 10^{-3}$
Tolueno	0,862	$5,35 \times 10^{-2}$
<i>p</i> -xileno	0,861	$1,98 \times 10^{-2}$

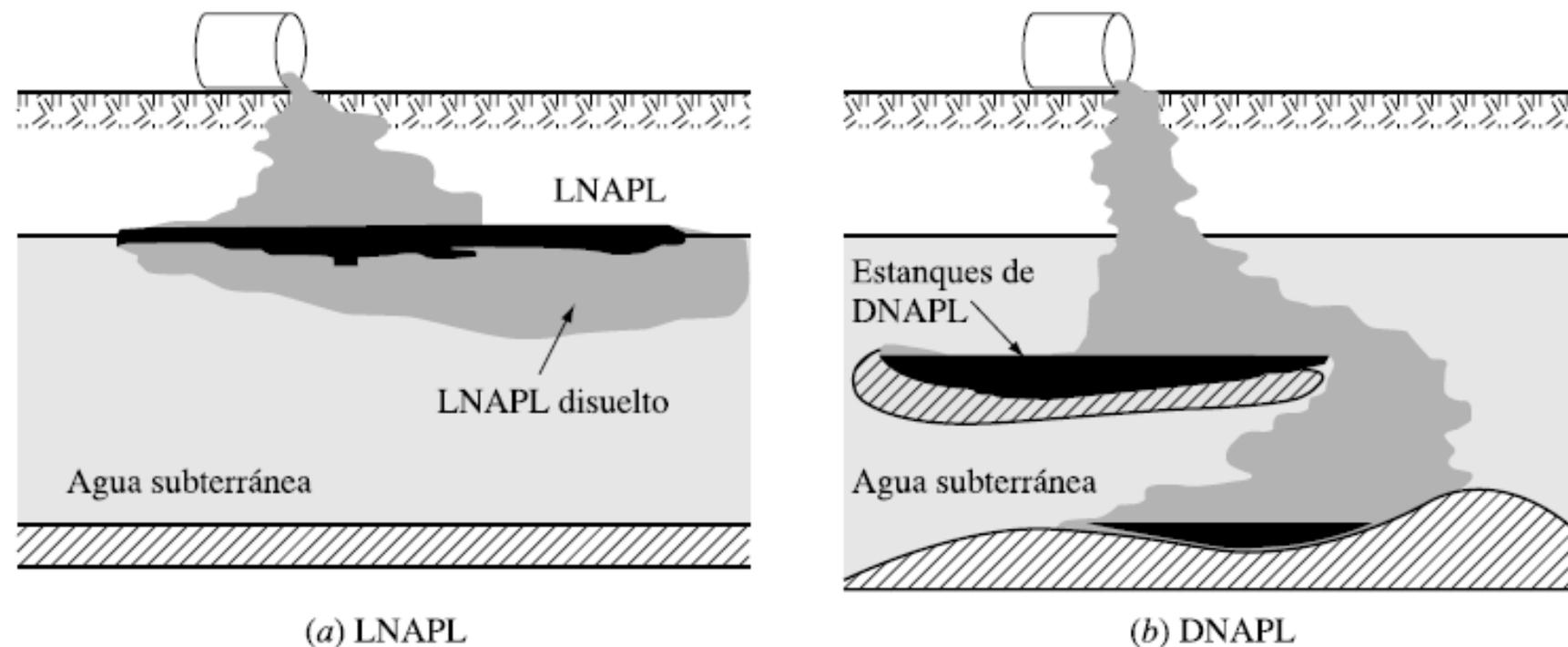


FIGURA 5.51. Los líquidos de fase no acuosa no se disuelven bien en el agua subterránea: (a) los LNAPL flotan sobre ella; (b) los DNAPL forman piscinas.

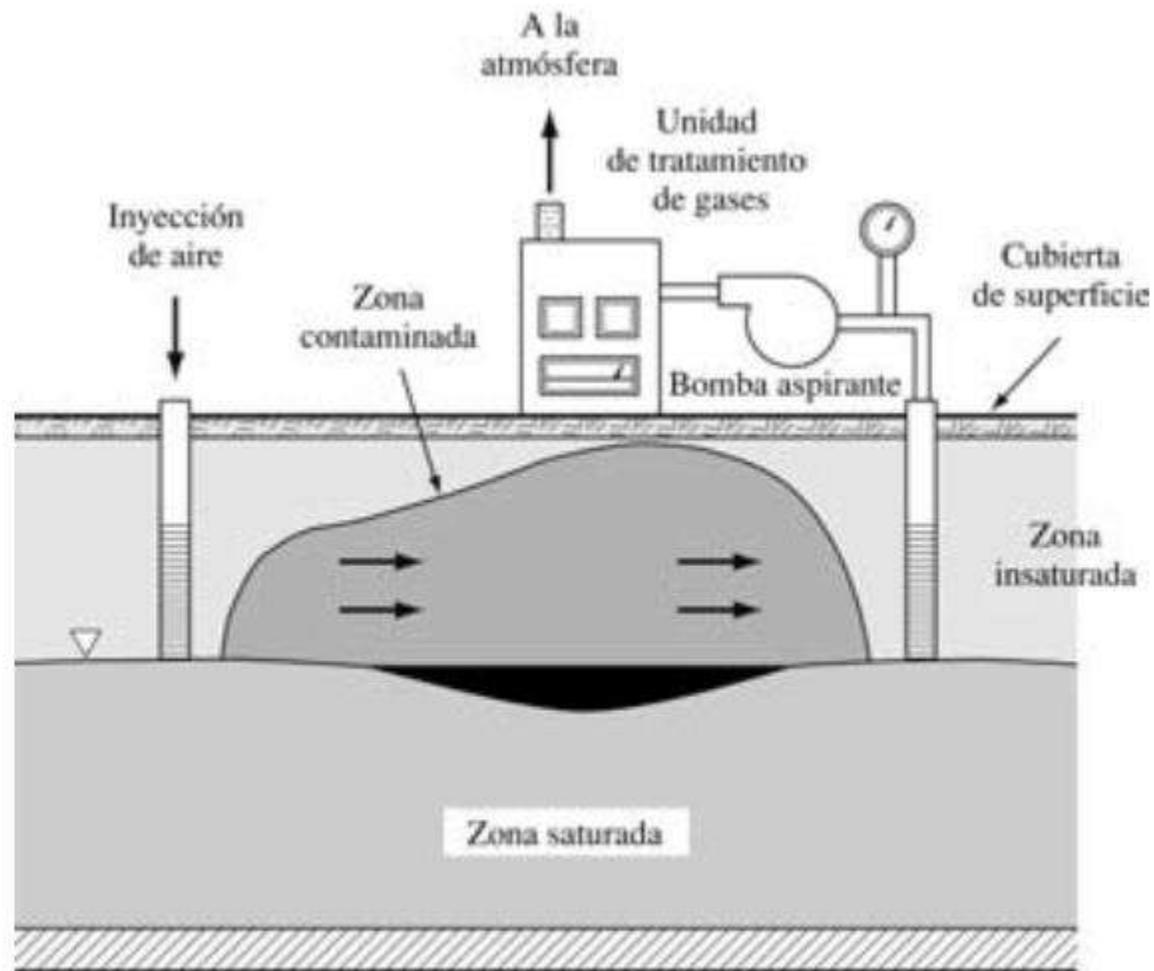
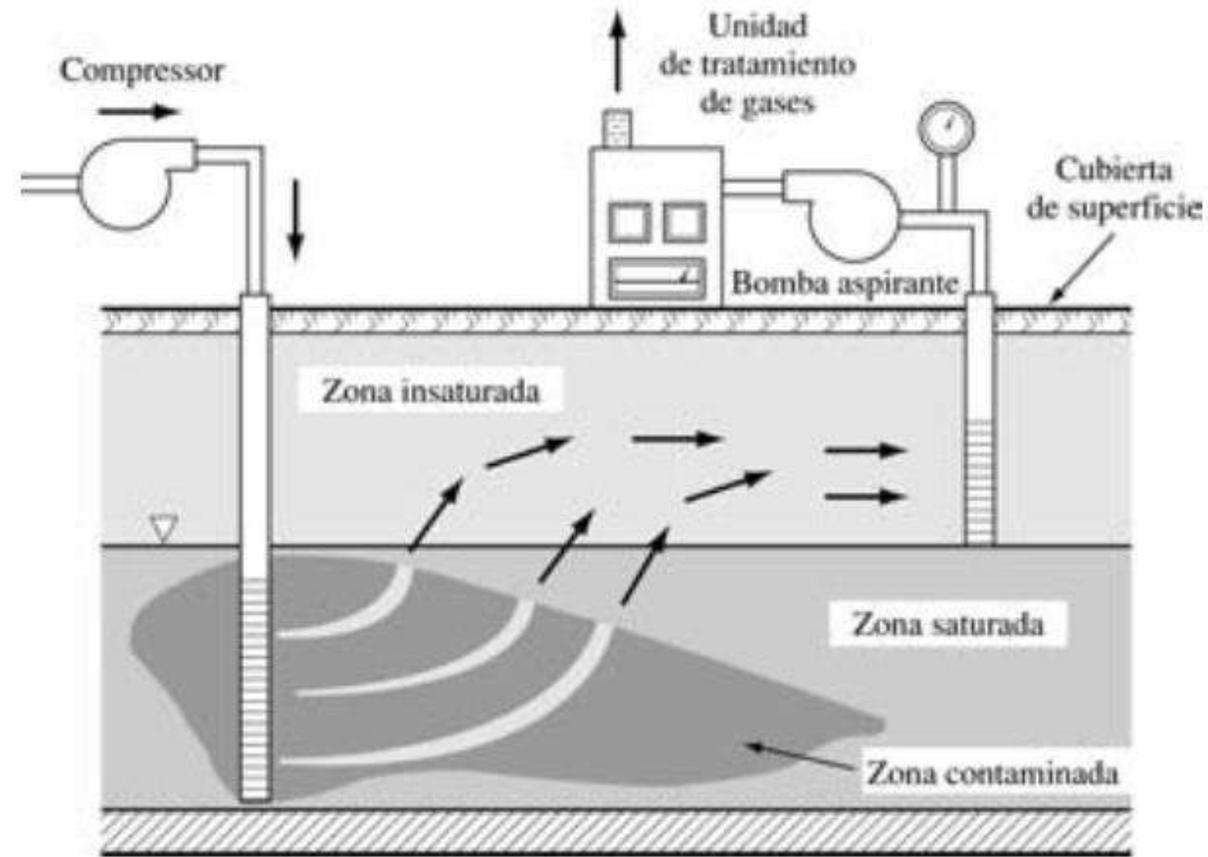


FIGURA 5.53. Un sistema de extracción de vapores del suelo.



4. Combinación de inyección de aire y extracción de vapores del suelo.

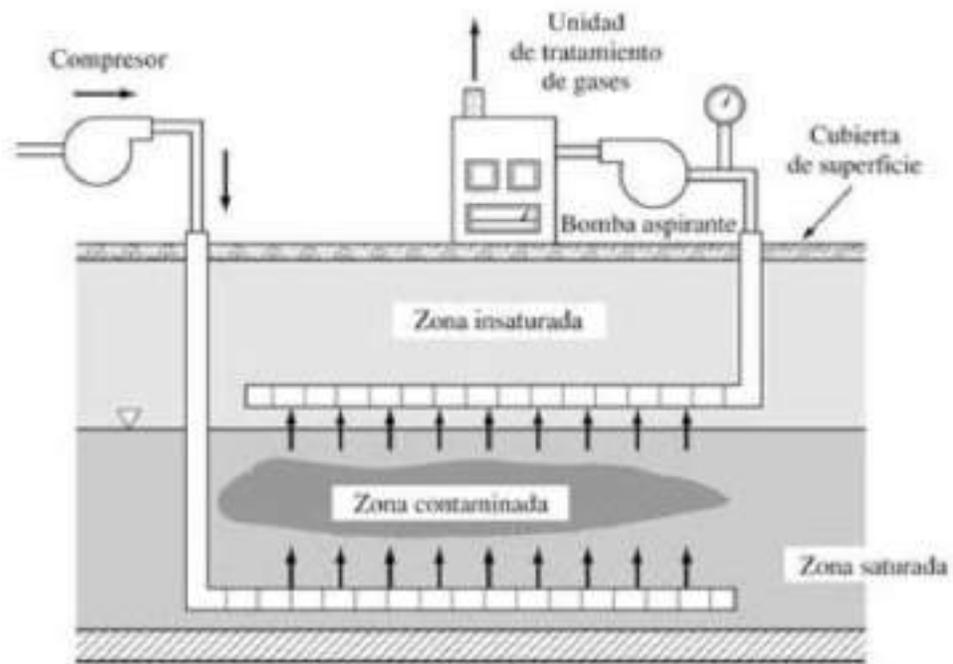


FIGURA 5.55. Inyección de aire con pozos horizontales.

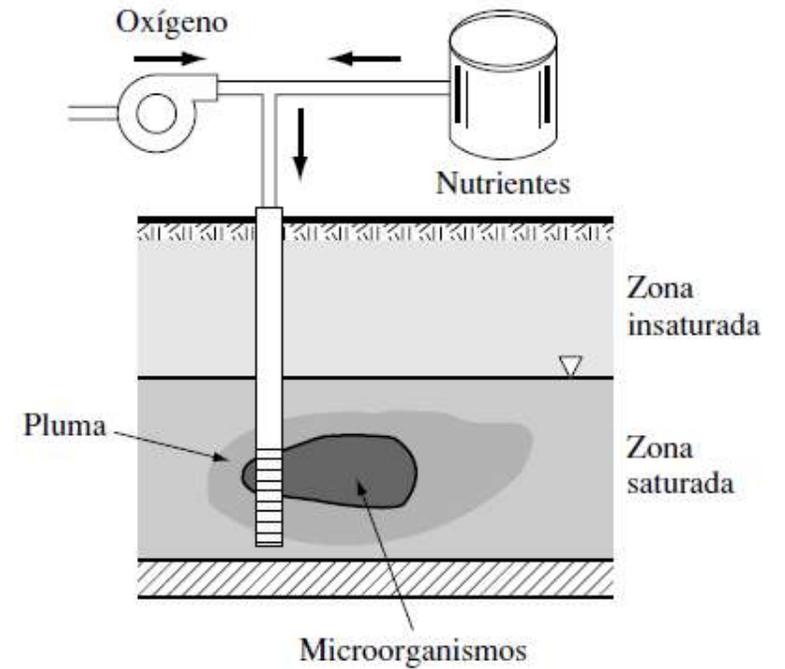


FIGURA 5.56. Biorrecuperación *in situ*.

