

ESTUDIO DE LA BIORREMEDIACION COMO UNA ALTERNATIVA EN LA
MITIGACION DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

MARTHA CECILIA RINCÓN LIZCANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2004

ESTUDIO DE LA BIORREMEDIACION COMO UNA ALTERNATIVA EN LA
MITIGACION DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

MARTHA CECILIA RINCÓN LIZCANO

Monografía para optar al título de
Especialista en Química Ambiental

DIRECTOR :
ING. JAIRO PUENTE BRUGES
Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2004

DEDICATORIA

A Dios por permitirme con su divina providencia
culminar una meta más en mi proyecto de vida, a mi esposo
por ser mi punto de apoyo cada día para lograr
culminar mis estudios, a mi
madre por estar siempre al lado de mis sueños ayudándome a
alcanzarlos, a mi hija por ser el motor que me impulsa a
mi realización como mujer y profesional.

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

Mi director de proyecto, ing. Jairo Puentes y
a los ing. Julio E. Pedraza, José Isaías Vargas,
Gustavo Ruiz, de igual forma al Biólogo Esp.

Ricardo Restrepo por su Colaboración y
apoyo en la culminación
del presente trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO HISTORICO	5
2. BIODEGRADACIÓN	11
3. BIORREMEDIACIÓN INTRINSICA	12
4. BIORREMEDIACIÓN	13
5. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS METODOS DE BIORREMEDIACIÓN	15
5.1. Adición de nutrientes	15
5.2. Inoculación	15
5.3. Uso de microorganismos modificados genéticamente	15
6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACION	17
7. CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROORGANISMOS	18
7.1. Producción de Biosurfactantes	18
7.2. Papel de la quimiotaxis en la biorremediación	21
8. PROCESOS DE LA BIORREMEDIACION	24
8.1. Degradación enzimática	24
8.2. Biorremediación animal	24

8.3	Remediación bacteriana	25
8.2.1.	Cepas modificadas genéticamente	27
8.2.1.1.	Cepa suicida modifica genéticamente	28
8.2.1.2.	Cepas biosensoras	29
8.2.2.	Biodegradación microbiana de compuestos tóxicos	29
8.2.2.1.	Degradación de Plaguicidas	29
8.2.2.2.	Degradación de hidrocarburos	31
8.3.	Fitorremediación	33
8.3.1.	Tipos de fitorremediación	40
8.3.2.	Especies fitorremediadoras	44
8.3.3.	Ventajas y desventajas de la fitorremediación	46
9.	FACTORES INCIDENTES EN LOS PROCESOS DE LA REMEDIACIÓN	48
9.1.	Focos de contaminación	48
9.1.1.	Foco puntual	48
9.1.1.1.	Gestión inadecuada	48
9.1.1.2.	Acciones causadas por imprudencias o negligencias	48
9.1.1.3.	Vertidos irregulares, voluntarios e involuntarios	49
9.1.1.4.	Tipos de residuos que pueden constituir un foco puntual	49
9.1.1.5.	Residuos derivados de la industria	49
9.1.1.6.	Residuos derivados de la minería	49
9.1.1.7.	Otras fuentes de contaminación	50
9.1.2.	Focos difusos	50
9.1.2.1.	Agricultura	50

9.1.2.2.	Ganadería	51
9.1.2.3.	Silvicultura	51
9.1.2.4.	Depósito ácido	51
9.1.2.5.	Transporte	52
9.2.	Mecanismo de infiltración	52
9.3.	Tipo de contaminante	53
9.3.1.	Partículas en suspensión	53
9.3.2.	Sales en disolución	53
9.3.3.	Otros contaminantes fisicoquímicos	54
10.	TIPOS DE TÉCNICA PARA LA SOLUCIÓN O MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	57
10.1.	Técnicas de confinamiento	57
10.1.1.	Barreras de lodo	58
10.1.2.	Lechada de cemento	59
10.1.3.	Barreras químicas	59
10.1.4.	Barreras de paneles	60
10.1.5.	Membranas sintéticas	61
10.1.6.	Vitrificación in situ	62
10.2.	Biorremediación intrínseca	63
10.3.	Técnicas de tratamiento in situ	63
10.3.1.	Técnicas de tratamiento in situ de carácter biológico	64
10.3.1.1.	Biorremediación	64
10.3.1.2.	Fitorremediación	66

10.3.1.3. ventajas y desventajas de las técnicas biológicas	
de tratamiento in situ	68
10.3.2. Técnicas de tratamiento in situ de carácter fisicoquímico	70
10.3.2.1. Atenuación Natural Controlada	70
10.3.2.1.1. Acción bacteriana	71
10.3.2.1.2. Sorción	72
10.3.2.1.3. Mezcla y dilución	72
10.3.2.1.4. Evaporación	73
10.3.2.2. Barreras reactivas permeables	75
10.3.2.3. Extracción de vapores del suelo y aireación del suelo	79
10.3.2.4. Inyección de aire	80
10.3.2.5. Flushin in situ	81
10.3.2.6. Tratamientos térmicos	83
10.3.2.7. Oxidación química	83
10.3.2.8. Electrodesconaminación	84
10.3.2.8.1. Migración	85
10.3.2.8.2. Electroósmosis	85
10.3.2.8.3. Electroforesis	86
10.3.2.9. Fracturación	87
10.3.2.9.1. Fracturación hidráulica	87
10.3.2.9.2. Fracturación neumática	88
10.4. Técnicas de tratamiento ex situ	89
10.4.1. Técnicas biológicas de tratamiento ex situ	89

10.4.1.1. Biofiltración	89
10.4.1.2. Compostaje	91
10.4.2. Técnicas de tratamiento fisicoquímicas ex situ	91
10.4.2.1. Desorción térmica	91
10.4.2.2. Lavado del suelo	91
10.4.2.3. Extracción con solventes	92
10.4.2.4. Dehalogenación química	92
11.RESTRICCIONES Y CONSIDERACIONES DE LA BIORREMEDIACION	93
11.1. Restricciones	93
11.1.1. Restricciones de tiempo	94
11.1.2. Restricciones de costo	94
11.1.3. Restricciones de lugar	94
11.2. Consideraciones técnicas en la Biorremediación	95
11.2.1. Consideraciones a escala	96
12.ALGUNOS TRABAJOS REALIZADOS EN EL CAMPO DE LA BIORREMEDIACION	98
13.CONCLUSIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	118

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Biorremediación intrínseca	12
Figura 2. Aplicación de los Biosurfactantes	20
Figura 3. Zonas de acumulación de distintos metales en la planta.	34
Figura 4. Discaria americana	40
Figura 5. Esquema de fitoextracción y rizofiltración	42
Figura 6. Especies fitorremediadoras.	45
Figura 7. Pluma de contaminación generada por el vertido a partir de un foco puntal.	56
Figura 8. Esquema de una sección de sistema de barreras de lodo,	58
Figura 9. Esquema del proceso de inyección de lechada de cemento bajo una mancha de contaminación.	59
Figura 10. Esquema de una barrera química	60
Figura 11. Instalación de una barrera de paneles.	61
Figura 12. Extensión de una geomembrana en una zanja perimétrica respecto al área a aislar	62
Figura 13. Esquema de funcionamiento de un sistema de vitrificación,	63
Figura 14. Base conceptual de la fitoextracción:	68
Figura 15 Bacterias atrapando sustancias químicas contaminantes para su alimentación.	71
Figura 16. Sorción de contaminante por el suelo.	72

Figura 17 Efecto de dilución de contaminante por efecto del flujo de aguas subterráneas.	73
Figura 18. Evaporación y descomposición de contaminante por efecto del calor solar.	73
Figura 19. Representación esquemática de una barrera reactiva permeable interceptando una pluma de contaminación.	75
Figura 20 . Sistema de “ <i>funnel and gate</i> ” en una barrera reactiva permeable	76
Figura 21. Combinación de las técnicas de extracción de vapor del suelo y aireación del suelo	79
Figura 22. Sistema de <i>Flushing in situ</i>	81
Figura 23 . Esquema de un dispositivo para oxidación química.	83
Figura 24. Esquema del proceso de electrodescontaminación.	85
Figura 25. Transporte de un fluido a través de los poros de una roca mediante electro ósmosis.	86
Figura 26. Esquema de un sistema de fracturación neumática,	88
Figura 27 Biofiltro piloto para remover VOCs ICP 1998.	90
figura 28. Biofiltro piloto para remover H ₂ S. ICP 2000.	90
Figura 29. Excavación de suelo contaminado mediante pala retroexcavadora.	92
Figura 30. Labores de limpieza en las Penínsulas de Alaska y de Kenai	99

TITULO: ESTUDIO DE LA BIORREMEDIACION COMO UNA ALTERNATIVA EN LA MITIGACION DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL*

AUTOR: Martha Cecilia Rincón Lizcano**

PALABRAS CLAVES: Biorrecuperación, biorrecuperación enzimática, fitorremediación, remediación in situ, ex situ, biodegradación, cepa, biofiltración.

RESUMEN

El presente trabajo desea mostrar la biorremediación como una tecnología amiga del medio ambiente, rica en diversidad de aplicaciones a través de los más variados procesos, como lo son la biorremediación microbiana, la biorremediación enzimática, intrínseca, animal y la fitorremediación, en situaciones in situ o ex situ, así mismo se resalta el hecho de ser una tecnología de fácil aplicación, económica y en algunos casos en donde se puede obtener un beneficio económico de los productos de la misma biorremediación resulta rentable frente a las tradicionales técnicas fisicoquímicas, que en la mayoría de los casos trasladan el contaminante de un lugar a otro dentro del ambiente, sin llegar a dar solución real al problema de contaminación tratado por dichas técnicas, la biorremediación por el contrario fija el contaminante en el caso de un proceso de mitigación o lo degrada a compuestos menos tóxicos e incluso inofensivos para el medio ambiente y el hombre.

La importancia de este trabajo radica en la presentación de un compendio de información relacionada con las técnicas de biorremediación, al tiempo que se describen sus limitaciones y sus ventajas de utilización frente a los procedimientos fisicoquímicos, así mismo se hace una relación de algunos trabajos hechos en el campo de la biorremediación en Colombia y en otros países.

* Monografía

** Escuela de Ciencias. Especialización en Química Ambiental. Jairo Puente

TITULE: STUDY OF THE BIORREMEDIACION LIKE AN ALTERNATIVE IN THE MITIGATION OF THE ENVIRONMENTAL CONTAMINATION *

AUTOR: Martha Cecilia Rincón Lizcano **

KEY WORDS: Biorecuperation, enzymatic biorecuperation, fitoremediation, remediation in situ, ex situ, biodegradation, stump, biofiltration.

SUMMARY

The present work wants to show the bioremediation like a technology friend of the environment, rich in diversity of applications through the most varied processes, as they are it the microbial bioremediation, the enzymatic, intrinsic bioremediation, animal and the fitoremediation, in situations in situ or ex situ, likewise the fact is stood out of being a technology of easy application, economic and in some cases where one can obtain an economic benefit of the products of the same bioremediation it is profitable in front of the traditional technical physical-chemical that transfer the pollutant from a place to another inside the atmosphere in most of the cases, without ending up giving real solution to the problem of contamination tried by this techniques, the bioremediation on the contrary fixed the pollutant in the case of a mitigation process or it degrades it to less toxic and even inoffensive compounds for the environment and the man.

The importance of this work resides in the presentation of a summary of information related with the bioremediation techniques, at the time that their limitations and their use advantages are described in front of the procedures physical-chemical, likewise a relationship of some works is made in the field of the biorremediación in Colombia and in other countries.

Key words: Biorecuperation, enzymatic biorecuperation, fitoremediation, remediation in situ, ex situ, biodegradation, stump, biofiltration.

* Monography

** Science Schol. Enviromental Chemistry Especialitation. Jairo Puente

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y el desarrollo industrial sin precedentes alcanzados durante el último siglo, han incrementado la presencia de contaminantes sólidos y líquidos convencionales a niveles críticos, así como el vertimiento de gases contaminantes a la atmósfera. La consecuencia ha sido la aparición de problemas de contaminación que antes se desconocían y para los cuales la naturaleza no estaba preparada. De otro lado, la industria química con la revolución de la fabricación de nuevos materiales, produce continuamente una gran cantidad de compuestos xenobióticos, cuya estructura química difiere considerablemente de los compuestos orgánicos naturales. Algunos de estos compuestos xenobióticos, son grupos halógenos y nitrogenados, utilizados como propelentes, refrigerantes, disolventes, bifenoles policlorados (PCB), plásticos, detergentes, explosivos y plaguicidas, los cuales muestran un carácter resistente (recalcitrantes) a la biodegradación⁽¹⁾. Otros se degradan muy lentamente, de modo co-metabólico sólo en presencia de un segundo sustrato, que es empleado como fuente primaria de energía, o dan lugar a residuos, a veces poliméricos, peligrosos para el ambiente. Algunos de los xenobióticos más recalcitrantes sufren un proceso de biomagnificación en las redes tróficas. Este proceso se inicia con los microorganismos y causa la acumulación del xenobiótico en los niveles tróficos superiores, donde provoca graves daños ecológicos. Aunque los hidrocarburos

del petróleo no sean xenobióticos, su uso a gran escala y los vertidos accidentales han provocado daños ambientales graves. Por eso en el presente trabajo se tratará el tópico de la Biorremediación de hidrocarburos.

La comprensión científica de estos fenómenos complejos y del papel que los microorganismos desempeñan en ellos es esencial para prevenir o controlar los daños que pueden ocasionar los vertimientos o fugas de hidrocarburos y Xenobióticos hacia el medio ambiente. La degradación de estos contaminantes es un proceso que se puede dar de forma natural por los microorganismos autóctonos de la zona contaminada siempre que tengan las vías metabólicas apropiadas. En la actualidad, para mejorar las posibilidades que los microorganismos pueden ofrecer en su poder biodegradador, se están desarrollando tecnologías basadas en el uso de los microorganismos con amplias capacidades biodegradadoras con el propósito de ser utilizados en la prevención y remediación de la contaminación.

La Biorremediación (proceso que utiliza las habilidades catalíticas de los organismos vivos para degradar y transformar contaminantes tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos, presenta un enorme potencial en la mitigación de la contaminación ambiental). La biorremediación se ha centrado en la explotación de la diversidad genética y versatilidad metabólica que caracteriza a las bacterias para transformar contaminantes en productos inocuos o, en su defecto, menos tóxicos, que pueden entonces integrarse en los ciclos

biogeoquímicos naturales. No obstante, existen casos aislados de utilización de otros tipos de organismos como, por ejemplo, los hongos y, más recientemente, las plantas (la llamada "fitorremediación" es un campo altamente prometedor) (7) es una de las tecnologías aplicables a este fin. Para que la biorremediación sea eficaz, los contaminantes deben ser susceptibles al ataque microbiano (transformación metabólica), los productos metabólicos deben ser inocuos, y el proceso no debe tener efectos secundarios adversos en los ecosistemas. Además las condiciones ambientales deben permitir el crecimiento *in situ* de los agentes microbianos que llevan a cabo la biorremediación o la extracción del contaminante de manera que pueda biodegradarse *ex situ* en biorreactores. "Por suerte o por desgracia, la naturaleza no es un reactor de tanque agitado y olvidar este hecho ha llevado a desafortunados fracasos al intentar aplicar modelos predictivos elaborados para dichos reactores a procesos de biorremediación *in situ* de aguas y suelos contaminados. Por ejemplo, uno de los tratamientos más habituales que se realizan cuando se aborda la biorremediación de una zona contaminada es la introducción de una cepa o población microbiana que posea las rutas degradativas necesarias para metabolizar el contaminante a eliminar. El éxito de estas inoculaciones depende no solamente de factores abióticos como el pH, temperatura, potencial de reducción y la disponibilidad de agua y nutrientes, sino también de factores bióticos tales como la competencia microbiana, amensalismo, parasitismo y depredación que pueden limitar el crecimiento y desarrollo de las poblaciones inoculadas"(7)

La biorremediación suele ser una alternativa rentable para restaurar la calidad del medio ambiente. Y aunque no es una panacea, en muchos casos la biorremediación permite degradar, depurar o inmovilizar contaminantes peligrosos y se está convirtiendo en una técnica ampliamente usada para la limpieza del ambiente. Aunque falta mucho por hacer no hay que obviar el gran potencial que puede tener la biorremediación en un futuro, sobretodo teniendo en cuenta las posibilidades que nos puede ofrecer los microorganismos modificados genéticamente. Lamentablemente esto último conlleva a polemizar acerca de su manejo y sobre todo a la imprevisibilidad de estos microorganismos en el medio, la utilización de microorganismo mejorados genéticamente abren la posibilidad de ser usados en la actualidad solo en condiciones controladas y que presenten una plena garantía ecológica.

1. MARCO HISTORICO

Se atribuye el nacimiento de la biorremediación, a la manipulación de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales municipales aplicada desde tiempos ancestrales, los primeros en hacerlo fueron los Romanos, quienes elaboraron planos arquitectónicos, diseñaron y construyeron sistemas de alcantarillado para la recolección de aguas residuales para su posterior tratamiento biológico dentro de tanques de almacenamiento, llegando por primera vez a evidenciarse la importancia del tiempo de retención del agua residual dentro de los tanques vs. la actividad metabólica de los microorganismos frente a los contaminantes presentes en el agua residual. Los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales se basan en los principios legados por los romanos, donde la degradación microbiana se lleva a cabo inicialmente dentro de un proceso aeróbico y posteriormente dentro de un proceso anaeróbico para el tratamiento de los lodos.

La utilización de microorganismos en el sector industrial y agrícola se orientó hacia procesos de fermentación para la obtención de etanol utilizado en el consumo humano, otro campo de aplicación de los microorganismos se dio en la industria farmacéutica con el propósito de obtener a través de transformaciones

microbiológicas compuestos activos para la elaboración de una gran diversidad de medicamentos.

Para comprender la utilización de la biorremediación se debe mirar como la humanidad fue dando una mirada hacia el control o mitigación de la contaminación, hasta llegar a la utilización de esta técnica como alternativa ambientalmente limpia. Hacia el año 1910 se dio paso a la propuestas legislativas la primera de ellas se enfoco en el control de emisiones de compuestos tóxicos hacia el medio ambiente en la industria insecticida, posteriormente se legisla sobre la disposición final de residuos sólidos hacia el año 1965. Sobre el tratamiento de aguas y suelos residuales se legislo hacia el año 1974. Posteriormente, se orientó las miradas hacia remediación de sitios contaminados con hidrocarburos y compuestos orgánicos, en donde se incluyeron proceso físicos químicos de separación y reacciones que en su momento se presentaban como una solución inmediata al problema ambiental. Estos métodos simplemente removían el agente contaminante del medio de un lugar a otro, sin llegar a una verdadera solución al problema de contaminación. En 1974 se crea la normatividad para el control del vertimiento de sustancias tóxicas sobre los recursos naturales, hacia 1980 se crea la autoridad encargada de identificar las fuentes de contaminación y los costos de dicha contaminación. Durante dos décadas años 80_s y 90_s las entidades ambientales centraron sus esfuerzos en la divulgación de las leyes para el manejo ambiental, la preservación de la atmósfera y del recurso hídrico y la preservación de los ecosistemas naturales con el fin de disminuir las actividades causantes del deterioro ambiental, ganando de esta manera experiencia en el manejo del medio

ambiente, fue en esta época en donde se reguló sobre el manejo del recurso aire, el permiso para la descarga de efluentes y se sensibilizó sobre el manejo adecuado de los recursos naturales. A esta época se le denominó la edad del control de la polución; en donde se resalta la importancia de evaluar ciertos parámetros como lo son la identificación y caracterización de los contaminantes, los residuos peligrosos y el manejo adecuado del almacenamiento o tratamiento de los mismos por parte del sector gubernamental y el sector privado, buscando tratar el contaminante, sin trasladar la contaminación de un medio a otro dentro del ambiente, y a un bajo costo para el sector industrial, buscando incluso la obtención de beneficios económicos en aquellos tratamientos de residuos contaminantes. Como es evidente se orientaron todos los trabajos de remediación ambiental hacia el cuidado del ambiente y la preservación de la salud humana.

Los conceptos de biorrecuperación se han desarrollado a partir de la gestación y el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales y de residuos sólidos. La eliminación de aguas residuales mediante su vertido en suelos agrícolas, actividad que se inició a finales del siglo XIX, suponía el empleo de las bacterias del terreno en procesos de descontaminación. Durante la primera mitad del siglo XX, se desarrollaron métodos para el tratamiento de contaminantes más sofisticados, tales como los lechos bacterianos, los lodos activados o la fermentación anaeróbica. Desde 1960, se han seguido incluyendo nuevos métodos de aplicación al terreno y procesos para la biodegradación de determinados tipos de compuestos bajo la categoría de procesos de tratamiento

biológico. Los avances alcanzados en el tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos han sido aplicados al tratamiento de terrenos y acuíferos contaminados, esto es, biorrecuperación. Durante los últimos años, la mayor parte de los estudios publicados sobre biorrecuperación se han referido al tratamiento de aquellos terrenos contaminados con compuestos derivados del petróleo. Esto es en parte debido a que la mayoría de los hidrocarburos derivados del petróleo son susceptibles a ser tratados mediante biorrecuperación, y en parte, debido al gran número de emplazamientos contaminados con hidrocarburos resultantes de fugas en depósitos de almacenamiento subterráneos. Durante los últimos 30 años, se ha venido utilizando con éxito la biorrecuperación en el tratamiento de terrenos contaminados con petróleo, por tal razón es en este campo en donde hay mayor concentración de trabajos de investigación e innovación biotecnológica.

La biorrecuperación se ha hecho cada vez más importante en el tratamiento de residuos peligrosos. Se ha demostrado que algunos de los compuestos químicos, incluidas las familias de compuestos clorados tales como el tricloroetileno y determinados bifenilos policlorados, los cuales en algún momento se pensó eran resistentes a la degradación, son biodegradables, al menos en condiciones de laboratorio. Otros compuestos que, en la actualidad, constituyen uno de los objetivos de la biorrecuperación comprenden: disolventes tales como la acetona y los alcoholes; compuestos aromáticos como el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, conocidos como BTEX, así como hidrocarburos aromáticos polinucleares (HPA) y el clorobenceno; nitro-y clorofenoles, y pesticidas. Entre los

contaminantes que más frecuentemente se encuentran en terrenos y aguas subterráneas están los hidrocarburos aromáticos tales como BTEX, como resultado de vertidos o fugas, y los compuestos alifáticos clorados tales como el tetracloroetileno o percloroetileno (PCE), el tricloroeteno (TCE) y el 1,1,1tricloroetano, utilizados en la industria como desengrasantes.

La biorrecuperación constituye una tecnología de reciente implantación, hecho que debe ser tenido en cuenta siempre que se lea bibliografía referente al tema. A la fecha, gran parte de las aplicaciones de la biorrecuperación han sido experimentales y los trabajos desarrollados se han dedicado a comprobar la aplicabilidad de un método de biorrecuperación a unas determinadas condiciones del emplazamiento y a determinados contaminantes. La mayoría de la bibliografía publicada nombra casos en los que la biorrecuperación ha sido un éxito. Aquellos casos en los que la biorrecuperación no tuvo éxito no se han pormenorizado de igual forma. En la bibliografía, el éxito de la biorrecuperación, a menudo, se mide mediante el porcentaje de reducción en la concentración del contaminante en el terreno o las aguas subterráneas. Tales criterios resultan poco convincentes, ya que la biorrecuperación puede conseguir altos porcentajes de eliminación y aun así, no alcanzan los objetivos de depuración establecidos. Al mismo tiempo, los contaminantes pueden ser transportados más allá de los límites del terreno o las aguas contaminadas, o transformados de manera abiótica, a través de otros procesos, tales como volatilización, migración o fotooxidación. En tal caso, los objetos de la biorrecuperación, la eliminación e inmovilización de los

contaminantes, no se cumplirían necesariamente. Un proceso de biorrecuperación apropiado debería comprender controles que documenten el transporte de contaminante, como por ejemplo una cubierta que recoja los materiales volátiles o pozos de seguimiento que detecten la migración del contaminante. Al mismo tiempo, se necesita obtener alguna prueba de que se ha llevado a cabo la biorrecuperación. Esta prueba puede ser en forma de aumento en la actividad microbiana, aumento en la emisión de dióxido de carbono, aumento del consumo de oxígeno o presencia de productos metabólicos.

2. BIODEGRADACION

La biodegradación se define como un procedimiento natural, a lo largo del cual distintos microorganismos son capaces de eliminar los contaminantes orgánicos e inorgánicos de un determinado medio. La mayoría de los microorganismos son capaces de utilizar compuestos presentes en su entorno y transformarlos en precursores de sus constituyentes celulares, ya que obtienen ellos, la energía que necesitan para realizar los procesos biosintéticos. A causa de esta capacidad de adaptación, las bacterias del suelo y algunos hongos son capaces de metabolizar núcleos y radicales relativamente inertes y utilizarlos como fuente de carbono y energía para su crecimiento. De aquí surge el interés de microorganismos (levaduras, hongos o bacterias) en la transformación de productos de desecho tanto industriales como naturales. De esta forma se realiza la descontaminación ambiental de sustancias tóxicas y/o persistentes, además, se consigue la integración del carbono y del nitrógeno contenido en los compuestos de estructura inerte al ciclo biológico del suelo, con lo que se contribuye al mantenimiento del propio equilibrio biológico en la naturaleza y a la salud humana.

3. BIORREMEDIACIÓN INTRÍNSECA:

Se deja que el propio ambiente natural resuelva el problema si se determina que en el propio ambiente hay las poblaciones y condiciones optimas(temperatura, pH, nutrientes etc...). Aún así se sigue un control para asegurarse que no se producen compuestos tóxicos secundarios. A continuación se muestra una figura que esquematiza los procesos de degradación intrínseca que dispone el ambiente:

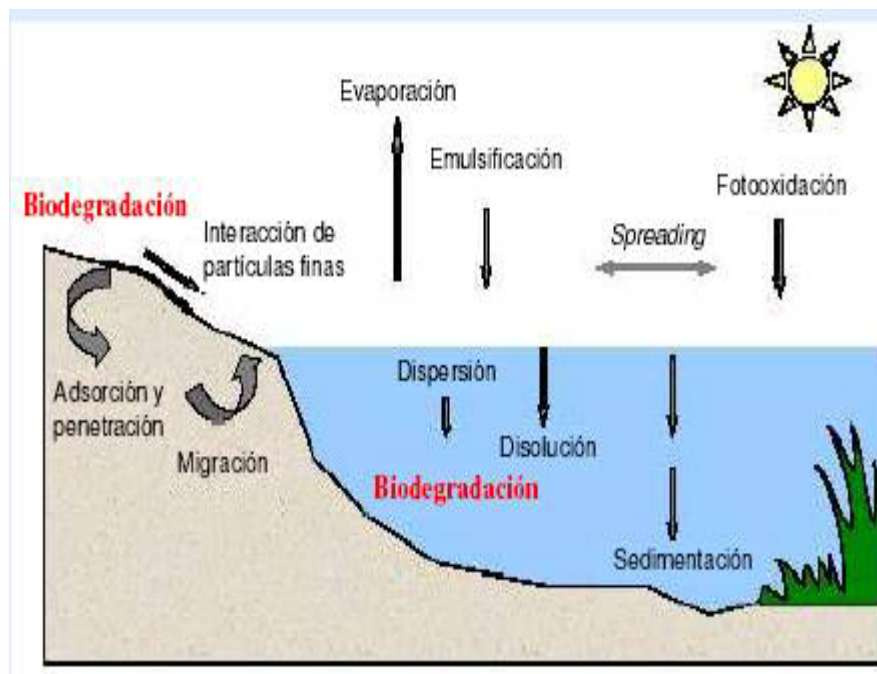


Figura 1. biorremediación intrínseca

4. BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación se refiere al uso de sistemas biológicos y a la adición de materiales a ambientes contaminados para producir una aceleración del proceso natural de biodegradación intrínseca de la polución del aire o de los sistemas acuáticos y terrestres. Los sistemas biológicos utilizados son microorganismos y plantas.

Estas degradaciones o cambios ocurren usualmente en la naturaleza (por lo cual el proceso se denomina "atenuación natural"), sin embargo la velocidad de tales cambios es baja. Mediante una adecuada manipulación, sistemas biológicos pueden ser optimizados para aumentar la velocidad de cambio o degradación y así usarlos en sitios con una elevada concentración de contaminantes. En general, las manipulaciones involucran producción e inmovilización de enzimas en determinados soportes y cambios genéticos a algunas cepas bacterianas.

Diversos contaminantes pueden ser eliminados por biorremediación: pesticidas, herbicidas, petróleo y sus hidrocarburos derivados, gasolina y metales pesados, entre otros, lo cual demuestra la validez de esta técnica para proteger el medio ambiente y reducir el uso de sustancias tóxicas.

La biorremediación puede ser aplicada mediante dos técnicas:

-biorremediación in-situ: se intenta acelerar el proceso en el mismo ambiente modificando las condiciones ambientales o por inoculación microbiana, se está convirtiendo en una alternativa cada vez mas popular porque es mas barata que otros métodos de limpieza. Se trata de acelerar los procesos degradadores naturales de biodegradación mediante el suministro de oxígeno y nutrientes a la pluma contaminante durante un período prolongado.

-biorremediación ex-situ: consiste en extraer el contaminante y degradarlo en otro sitio en condiciones controladas de laboratorio. Evidentemente la mayoría de veces no se puede hacer a parte que es un proceso mas caro.

5. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN

5.1. ADICION DE NUTRIENTES.

Aplicado para superar la principal limitación sobre la velocidad de la biodegradación natural de petróleo.

De los tres métodos de biorremediación, la acción de nutrientes ha sido el más estudiado, y actualmente se presenta como el de más factible aplicación para la mayoría de contaminantes.

5.2. BIOAUMENTACION

Aplicado para aprovechar la ventaja de las especies de microorganismos más eficientes en la degradación de petróleo.

5.3. USO DE MICROORGANISMOS MODIFICADOS GENÉTICAMENTE

Probablemente no es necesario en la mayoría de los casos debido a la amplia variedad de microorganismos naturales.

Uso de potencial para degradar componentes de petróleo que no son degradados por microorganismos no modificados.

Su desarrollo y utilización debe afrontar importantes restricciones legales

Factores que influyen en el proceso de biodegradación/biorremediación:
temperatura, disponibilidad de oxígeno y nutrientes, luz, humedad, pH del medio,
estructura química de la sustancia a ser degradada.

6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN

Ventajas

- Generalmente sólo origina cambios físicos menores sobre el medio
- Cuando se usa correctamente no produce efectos adversos significativos
- Puede ser útil para retirar algunos de los compuestos tóxicos del petróleo
- Ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas
- Es menos costosa que otras tecnologías

Desventajas

- Para muchos tipos de contaminante su efectividad no ha sido determinada
- Muy difícil aplicación en el mar
- El tiempo necesario para actuación es largo
- Su implementación es específica para cada lugar contaminado
- Su optimización requiere información sustancial acerca del lugar contaminado y las características del vertido ⁽²⁵⁾
- la etapa limitante de la biodegradación o detoxificación de la mayoría de compuestos en el medio ambiente se relacionan con la biodisponibilidad ⁽⁹⁾

7. CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROORGANISMOS

Actualmente en el campo de investigación en biorremediación se está haciendo grandes esfuerzos para buscar nuevas habilidades o características de los microorganismos que puedan aumentar esta biodisponibilidad. Por eso en este capítulo se presentan dos características microbianas que pueden aumentar esta biodisponibilidad y podrían ser utilizadas en técnicas de biorremediación.

Estas características son:

- Producción de biosurfactantes
- Papel de la quimiotaxis en biorremediación

7.1. PRODUCCIÓN DE BIOSURFACTANTES

Los hidrocarburos son moléculas muy hidrofóbicas que forman micelas entre ellas altamente insolubles en agua. Esto hace que la superficie de actuación que tienen los microorganismos disminuya mucho, por lo tanto disminuye la biodisponibilidad del sustrato. Y es que un paso esencial en la degradación de hidrocarburos es que estos entren en contacto directo con la membrana para que sea interiorizado y puedan actuar las oxigenasas. Por eso dentro de la versatilidad microbiana no es sorprendente que algunos microorganismos puedan producir una gran variedad de moléculas emulsionantes (biosurfactantes) se ha demostrado que estimula el

crecimiento de estas bacterias degradadoras acelerando por tanto la biorremediación.

Los biosurfactantes se pueden clasificar en dos tipos:

Bajo peso molecular: suelen ser glicolípidos. El más estudiado es el rhamnolípido producido por diversas especies de *Pseudomonas* spp. La función principal de estos biosurfactantes es reducir las tensiones entre-fases (agua-roca por ejemplo).

Alto peso molecular: Son producidos por diferentes especies y suelen ser polisacáridos, proteínas, lipoproteínas, lipopolisacáridos o mezclas de estos polímeros. Estos biosurfactantes no son tan eficaces reduciendo tensiones entre-fases, pero si son buenos emulsionantes. Además se ha demostrado que son eficaces a bajas concentraciones y tienen una considerable afinidad por el sustrato.

Las funciones que harían estos biosurfactantes a la hora de aumentar la biodisponibilidad serían:

- Dispersar el petróleo aumentando la superficie de contacto.
- Aumentan la biodisponibilidad de compuestos hidrofóbicos
- También tiene funciones evolutivas para los propios microorganismos

Otro aspecto de los biosurfactantes es que sea demostrado que su producción se da en poblaciones que han llegado a un estado estacionario de crecimiento. Es decir como la mayoría de metabolitos secundarios. A parte esta producción es inducida por mecanismos de “quorum sensing” y se ha visto que como mas densidad poblacional exista, mas producción de biosurfactante habrá.



Figura 2. aplicación de los biosurfactantes

Además tiene muchas ventajas frente emulsionantes químicos ,como pueden ser diferentes detergentes, que se puedan utilizar para aumentar esta biodisponibilidad:

- Son selectivos.

- Tienen mayor eficiencia para aumentar la biodisponibilidad de compuestos hidrofóbicos

- Menos estables, por lo tanto mas ecológicos.

- Además se ha visto que surfactantes no biológicos pueden tener un efecto positivo o negativo en la degradación según el sustrato y el tipo de microorganismo₍₉₎

7.2. PAPEL DE LA QUIMIOTAXIS EN BIORREMEDIACIÓN

La quimiotaxis es la habilidad que tienen algunos microorganismos flagelados para detectar y responder a compuestos ambientales. Este fenómeno puede intervenir o tener importancia a muchos niveles diferentes en un microorganismo, como puede ser a nivel fisiológico , supervivencia o incluso intervenir a nivel poblacional.

Por ejemplo la quimiotaxis interviene en la formación de nódulos en las raíces de legumbres por especies de *Rhizobium*, *Agrobacterium*, etc...Estas plantas producen exudantes que contienen moléculas que pueden actuar como señales quimio-atrayentes y que son capaces de inducir la expresión en estas bacterias de genes relacionados con la formación de estas asociaciones.

La quimiotaxis puede intervenir y tener un valor importantísimo en la supervivencia sería la capacidad de detectar compuestos tóxicos y así alejarse de ellos. Como se puede intuir esta habilidad de algunos microorganismos para detectar y ser atraídos por diferentes compuestos como podrían ser hidrocarburos , podría tener un papel muy importante a la hora de diseñar sistemas mas eficientes de biorremediación aumentando la biodisponibilidad.

Aunque se tiene evidencias de este mecanismo ya hace varios años aún hay mucho desconocimiento sobre los receptores y genes implicados en la quimiotaxis

De hecho aún no se han publicado muchos trabajos que realmente demuestren la posible utilidad de la quimiotaxis en la biorremediación. Pero si recientemente de los pocos genes conocidos que están implicados en la quimiotaxis se ha demostrado que la mayoría están relacionados con los genes implicados en vías catabólicas de hidrocarburos ⁽⁹⁾

Una vez visto que es lo que se conoce de la quimiotaxis y suponiendo que realmente puede afectar a la eficiencia de biorremediación hay que decir que una posible traba en su aplicación sería que la quimiotaxis no se ha observado en condiciones anaerobias. Entonces habría una limitación al igual que pasa con la degradación de hidrocarburos en condiciones anaerobias, porque precisamente la mayoría de zonas contaminadas donde se podría aplicar están en condiciones anaerobias. Aún así como se vió también, se creía que no se daba degradación en condiciones anaerobias y no era así, por lo que no sería de extrañar que la quimiotaxis también se diera.

Para finalizar, comentar en que aspectos podría la quimiotaxis acelerar el proceso de biorremediación.

La razón mas obvia es que estas cepas serán capaces de entrar en contacto con el compuesto a degradar reduciendo problemas de biodisponibilidad.

Otra ventaja, aunque a nivel evolutivo, sería que las células móviles que carezcan de estas vías degradativas pero se sientan atraídas por estos lugares contaminados, aumentará la posibilidad que contacten con especies que si tengan estas vías facilitando la transmisión genética horizontal, sobretodo si estas vías están codificadas en plásmidos. Esto evidentemente podría ser un “handicap” a la hora de utilizar cepas modificadas genéticamente.

8. PROCESOS DE LA BIORREMEDIACION

Los procesos mediante los cuales funciona la biorremediación pueden dividirse en 4 grupos (Degradación enzimática, biorremediación animal, remediación microbiana y fitorremediación.) de acuerdo al organismo que efectúa la degradación del compuesto xenobiótico en los siguientes tipos:

8.1. DEGRADACIÓN ENZIMÁTICA

La degradación enzimática consiste en la utilización de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Dichas enzimas son previamente producidas por bacterias transformadas genéticamente con el gen que codifica para cada enzima en particular. Esta aplicación de la biotecnología lleva décadas en el mercado y hoy en día las compañías biotecnológicas ofrecen las enzimas y también los microorganismos genéticamente modificados. ⁽²⁵⁾

8.2. BIORREMEDIACIÓN ANIMAL.

Existen animales que actúan como agentes descontaminantes, ya que pueden desarrollarse en medios con fuerte toxicidad y poseen en su interior microorganismos capaces de retener los metales pesados ⁽⁷⁾

8.3. REMEDIACIÓN BACTERIANA

Se refiere al uso de microorganismos directamente en el foco de contaminación. Estos microorganismos pueden ya existir en ese sitio o pueden ser originarios de otros ecosistemas en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado (inoculación). En el primer caso, muchas veces suelen administrarse más nutrientes (adición de nutrientes) al medio con el fin de acelerar el proceso de biodegradación. Otra posibilidad es la de introducir cepas modificadas por técnicas de ingeniería genética, a las cuales se les introdujo el gen que codifica para una o más enzimas detoxificadoras (Uso de microorganismos modificados genéticamente).⁽²⁵⁾

Tradicionalmente, se ha visto a las bacterias como organismos dañinos para la vida, puesto que tradicionalmente se han considerado como causantes de enfermedades ó incluso de muertes. Así mismo como contaminantes de alimentos, sin tomar en cuenta que muchas de ellas son necesarias para nuestra vida cotidiana, tales como las levaduras, la participación bacteriana en los procesos digestivos, en los procesos de degradación de las heces, en la desintegración de la basura ó su participación en asociación con diferentes leguminosas en los procesos de fijación del nitrógeno atmosférico. No obstante, nunca se había visto la parte positiva de su accionar degradando sustancias tóxicas, nocivas para nuestra existencia.

La biorremediación bacteriana ya sea mediante el uso de cepas nativas, mediante el mecanismo de la bioaumentación o el diseño de cepas modificadas genéticamente se ha convertido en una nueva alternativa para atacar de manera directa muchos de los problemas que presentan la contaminación de aguas y suelos causada por diferentes contaminantes. De manera especial por la presencia de fertilizantes, pesticidas y herbicidas que son de uso común en el campo, amén de los derrames de hidrocarburos durante su extracción, transporte ó después de su utilización. La capacidad mostrada por aislados bacterianos acumulando, degradando ó transformando diversos contaminantes a otros de menor nocividad y por lo mismo de menor impacto al ambiente, es lo que ha incentivado a distintas instituciones de investigación en la formación de equipos de investigadores, Inter. y multidisciplinarios para el diseño y aplicación de nuevas tecnologías

Un ejemplo de ello lo constituye el uso de bacterias que, asociadas a leguminosas han demostrado que se puede sustituir , al menos de manera parcial, una buena cantidad de los fertilizantes utilizados y que son causa de la contaminación de los mantos freáticos, por su filtración en los suelos donde son utilizados o bien por el arrastre de los mismos por las lluvias y otros factores ambientales hacia los cauces de los ríos con la consiguiente contaminación de las aguas.

Hoy día, investigaciones realizadas en distintos centros han aportado múltiples opciones en el uso de bacterias nativas de los sitios que se encuentran sometidos

a la influencia de la contaminación por hidrocarburos. Muchas de ellas han adquirido una capacidad sustantiva para poder sobrevivir en esas condiciones pues se han sabido adaptar aprovechando como sustrato los compuestos hidrocarbonados, degradándolos y transformándolos a otros menos nocivos con la finalidad de que el proceso degradativo pueda llegar hasta su destrucción total, llevándolo hasta el punto final, que sería convertirlo a bióxido de carbono.

Ensayos realizados en laboratorio en donde se obtienen, aíslan y purifican microorganismos que son crecidos en medios específicos, sometidos a diferentes pruebas químicas y bioquímicas para mas tarde cultivarlos en medios específicos y sometiéndolos al contacto con diferentes concentraciones del hidrocarburo que se pretende degradar, permiten conocer el comportamiento de las cepas aisladas frente al hidrocarburo de referencia. Esto da una idea más certera de la capacidad de degradación de este contaminante puesto que, cepas de un mismo género pero de diferente especie, no necesariamente poseen la misma capacidad de degradación de un mismo hidrocarburo. Ejemplo de ello son las cepas aisladas y probadas de los géneros *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Vibrio*, entre otros⁽²⁸⁾

8.3.1. CEPAS MODIFICADAS GENÉTICAMENTE

Existen aplicaciones biotecnológicas(cepas modificadas genéticamente) que pueden tener la ingeniería genética en la biorremediación, y se proponen a continuación dos ejemplos

8.3.1.1. CEPA SUICIDA MODIFICADA GENÉTICAMENTE

Uno de los problemas de la utilización de cepas modificadas genéticamente es que una vez liberadas en el medio estas podrían difundirse a otros lugares no contaminados o bien una vez hubieran hecho su faena descontaminadora degradando todo el contaminante estas persistirían allí en los dos casos aumentando el riesgo de transferencia genética horizontal. Por eso interesaría tener un fuerte control sobre estas cepas desde el punto de vista espacial y temporal. Y esto se podría conseguir utilizando una **cepa suicida modificada genéticamente**.

Por ejemplo queremos eliminar un cierto hidrocarburo en una zona y conocemos bien las vías de degradación de este hidrocarburo y los promotores y elementos que intervienen en su regulación. Con esto se podría diseñar un sistema donde en esta cepa degradadora se podría introducir un gen letal tal como la colicina E3Rnase debajo el control de un promotor regulado por un represor dependiente de un corepresor (que sería el hidrocarburo a degradar). Es decir un control negativo reprimible. De esta manera si el microorganismo se va del lugar de acción o el contaminante es totalmente degradado, al no existir corepresor en el medio, el represor no podría actuar y por lo tanto se expresaría el gen letal matando a la célula. Sin embargo si se mantiene en la zona contaminada y queda contaminante para degradar el represor reprimirá el gen letal.

8.3.1.2. CEPAS BIOSENSORAS

Otro ejemplo de aplicación sería construir **cepas biosensoras**. Consistiría en hacer otra fusión génica entre un promotor regulado por un activador inducido por el contaminante y un gen “reporter” fácil de detectar como es el caso del gen lux. Esta cepa biosensora nos permitiría monitorear “in situ” como va el proceso de degradación mediante la producción de bioluminiscencia, A más luz producida indicará mayor grado de degradación. Además estas cepas biosensoras se podrían optimizar teniendo en cuenta los mecanismos de transporte del contaminante dentro la célula como podrían ser las mismas proteínas MCP. Como más eficientes sea este transporte mayor entrada de contaminante, por lo tanto mas degradación y activación del gen lux, siendo una cepa biosensora mucho mas sensible.⁽⁹⁾

8.3.2. BIODEGRADACIÓN DE COMPUESTOS TÓXICOS POR MICROORGANISMOS

8.3.2.1. DEGRADACIÓN DE PLAGUICIDAS

Los compuestos tóxicos más usados son los plaguicidas, los cuales en muchos casos resultan ser muy tóxicos. Estos compuestos químicos constituyen una adecuada fuente de carbono y donadores de electrones para ciertos

microorganismos del suelo. En la literatura existen algunos ejemplos de degradación de plaguicidas por microorganismos, entre los cuales se pueden citar los siguientes:

Las *Pseudomonas* son las bacterias más eficientes en la degradación de compuestos tóxicos. La capacidad de estas bacterias para degradar depende del tiempo de contacto con el compuesto, las condiciones ambientales en las que se desarrollen y su versatilidad fisiológica. Se evaluaron tres especies de *Pseudomonas* para la biodegradación del herbicida Aroclor 1242. Los resultados obtenidos demuestran la gran capacidad de las bacterias para degradarlo, siendo el porcentaje de degradación de 99,8% , 89,4% y 98,4% respectivamente.

Se aislaron varias especies de hongos en suelos contaminados con pesticidas de Argelia. Las especies más frecuentes fueron *Aspergillus fumigatus*, *A. Níger*, *A. terreus*, *Absidia corymberifera* y *Rhizopus microsporus var microsporis*. En este experimento, 53 especies aisladas destacaron por su habilidad para la degradación del herbicida metribuzin en medio líquido. Se demostró a su vez que el herbicida promovía el crecimiento de los géneros *Absidia* y *Fusarium*, los cuales lograron eliminar el 50% del compuesto después de 5 días. Por otra parte, la especie *Botrytis cinerea* eliminó el herbicida linuron casi completamente, y 31 especies pudieron eliminar el metroburon, destacando *Botrytis cinerea* que lo eliminó casi en su totalidad.

Otro experimento mostró la eficiencia de la bacteria *Rhodococcus* sp. para degradar las triazinas a nitrato. Fournier et al. (2002) realizaron un ensayo para estudiar las transformaciones del herbicida atrazina como consecuencia de la descomposición microbiana. Este compuesto logró ser transformado en nitrito (30%), óxido nitroso (3,2%), amonio (10%) y formaldehído (27%).

8.3.2.2. DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS

Otro grupo de compuestos tóxicos muy abundante son los hidrocarburos. Se ha demostrado que la eficiencia de bacterias del género *Pseudomonas* en la degradación del ácido 3-Phenoxybenzoico en suelos. también se evaluó el papel biodegradativo de dos *Pseudomonas* que habían sido manipuladas genéticamente. Las bacterias resultaron ser efectivas en todos los casos; sin embargo, las bacterias modificadas genéticamente tuvieron una mayor capacidad para sobrevivir a factores ambientales adversos. Este resultado es alentador, dado que uno de los factores que muchas veces impide la biorremediación de suelos *in situ* son las condiciones ambientales desfavorables para el crecimiento bacteriano.

Otra especie de bacteria que ha sido usada para la degradación de hidrocarburos es *Sphingomonas wittichii* RW1, la cual en condiciones anaeróbicas es capaz de transformar el 2,7 diclorobenceno, produciendo el metabolito 4 clorocatenol y el 1,2,3,4 tetraclorodibenceno.

Los hongos también han sido evaluados para la degradación de hidrocarburos. Se ha estudiado el papel del hongo *Cladophialophora sp.* sobre la degradación de benceno, tolueno, etilbenzeno y xileno. El hongo no fue capaz de degradar el benceno, pero degradó los compuestos alcalinizados (tolueno, etilbenzeno y xileno). El mecanismo de degradación ha sido una combinación de asimilación y cometabolismo. El tolueno y el etilbenzeno fueron usados como fuente de carbono y energía. En el proceso degradativo actúa la enzima monooxigenasa la cual se encarga de la degradación del tolueno, etilbenzeno y el xileno.

Otros microorganismos, menos estudiados pero que también contribuyen a la degradación de agentes contaminantes en el suelo, son las cianobacterias. Se ha estudiado el papel de las especies *Phormidium* y *Oscillatoria* sobre la degradación de hidrocarburos. Los estudios señalan que en 7 días se había degradado el n-octadecano y el ristano en un 25% y 34%, respectivamente. Estos valores demuestran el potencial de estas cianobacterias para el desarrollo de futuras técnicas de biodegradación en suelos contaminados con hidrocarburos.

Las algas también juegan un papel importante en los procesos de biodegradación. Se ha estudiado el proceso de biotransformación del esteroide estrógeno por acción de *Chlorella vulgaris*. Con luz, esta especie metaboliza el 50% del estradiol, transformándolo a un compuesto desconocido, aunque otros estrógenos como el estriol hidroxiestrona y el etinil estradiol se mantuvieron estables en el cultivo del alga.⁽⁷⁾

8.4. FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación es una tecnología naciente que sirve para explotar las capacidades metabólicas proporcionando un medio barato, simple y seguro para paliar áreas contaminadas y/o aguas de desecho. (30)

La fitorremediación podría ser definida como el conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados por medio de la utilización de plantas(terrestres, acuáticas, leñosas, etc.) y los cultivos “in Vitro” derivados de ellas, que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, remover, contener, retener degradar o transformar dichas sustancias a formas menos tóxicas.

Esta definición incluye cualquier proceso biológico, químico o físico, inducido por las plantas, que ayude en la absorción, secuestro, degradación y metabolización de los contaminantes, ya sea por las plantas mismas o por los microorganismos que se desarrollan en la rizósfera.(20)

Las bases conceptuales de la fitorremediación provienen de la identificación de plantas que hiperacumulan metales. Existen plantas que tienen esta capacidad

intrínseca pero también pueden obtenerse plantas con estas capacidades por medio de técnicas de Ingeniería Genética. (25)

Las plantas que hiperacumulan metales lo guardan en unas estructuras microscópicas celulares llamadas vacuolas. Estos orgánulos son una doble membrana lipídica que protege a la célula de los efectos tóxicos del metal. Se desconoce porqué algunas plantas tienen este comportamiento de acumular tanto metal pesado como son capaces de almacenar, pero algunos estudios apunta a la posibilidad de que el motivo es evitar que insectos o animales las ingieran.

La capacidad de estas plantas tiene un gran interés científico, ya que la avidez por acumular metales pesados de estos organismos puede ayudar a la descontaminación de zonas industriales o altamente contaminadas, siendo acumulados en las plantas y retirados con cierta facilidad del medio. A este proceso se denomina biorremediación y, cuando hace referencia en concreto al cultivo de plantas se denomina fitorremediación. Si hay una zona contaminada con un material pesado, por ejemplo cadmio, la única opción que existe en la actualidad es poner una cerca y un cartel que indique que es una zona contaminada, construir un “parqueadero” en la superficie o hacer un movimiento de tierras retirando el estrato contaminado, con el costo económico que ello supone. Utilizando la fitorremediación, sería posible extraer el metal de la tierra mediante cultivos en rotación de una duración de 5 a 10 años, esta técnica sería

económica, y limpiaría la zona de tal forma que el suelo podría ser utilizado en otros menesteres.

Las plantas que de forma natural realizan la acumulación de metales no pueden ser utilizadas para la fitorremediación porque tienen crecimiento lento y en general son pequeñas. En su lugar, los investigadores podrían introducir los genes en plantas con crecimiento rápido y de mayor tamaño. Otra utilidad podrían ser los alimentos que podrían compensar las carencias de ciertas áreas del Mundo. La ingestión de metales en pequeñas dosis es necesaria, pero en algunas regiones de la Tierra no forman parte de la dieta, provocando problemas de salud. Otra posible aplicación de este descubrimiento podría ser la producción de semillas que aprovecharan mejor los recursos, evitando así el aporte de fertilizantes agrarios⁽¹¹⁾

Las semillas poseen un elevado número de grupos funcionales capaces de **"secuestrar" metales** y otros compuestos orgánicos de interés. Al proceso de adsorción le sigue un proceso de absorción y por tanto de distribución de las especies acumuladas en el resto de la planta en su proceso de germinación y crecimiento (habrá que evaluar en qué parte de la planta la preconcentración es máxima).⁽¹⁹⁾

La fitorremediación constituye un método competitivo y sencillo de limpiar las cada vez más abundantes áreas contaminadas en todo el mundo. La identificación de plantas que germinan en ambientes muy contaminados presenta, frente a otros

sistemas complejos de limpieza, un gran interés en la recuperación de suelos y/o aguas.

Los estudios *in Vitro* se consideran de interés para establecer la capacidad de acumulación de las semillas seleccionadas para un tipo de aplicación de la fitorremediación, en la que hay preconcentración de metales y compuestos orgánicos (volátiles y no volátiles). En el campo de metales se concentra en : As, Pb., Hg., Zn, Ti, Cd y en el de compuestos orgánicos en pesticidas. (30)



Figura 3.

Este uso de las plantas para sanear aguas y suelos contaminados, ha venido consolidándose. Hasta ahora hay unas 400 plantas con distintos grados de eficiencia en la acumulación de sustancias tóxicas, las que han tenido éxito en la remoción de metales pesados provenientes de la actividad minera. Los hidrocarburos policíclicos aromáticos (derivados del petróleo en su mayoría) son contaminantes ambientales que se encuentran por doquier. Las mayores rutas de entrada en las aguas y suelos tienen su origen en derrames,

degradación de fósiles y descargas de desechos domésticos e industriales.

Se define hiperacumulación como la posibilidad de las plantas de almacenar altas cantidades de sustancias . En condiciones experimentales, no naturales, se alude a valores de absorción 10 veces superiores a los alcanzados por las mismas plantas utilizadas como testigo.

Miembros de las familias Brassicaceae (géneros *Alyssum* y *Thlaspi*) y Fabaceae fueron los primeros señalados como hiperacumuladores. El género *Thlaspi* contiene especies que hiperacumulan Zn, Ni, Cd y Pb. como *T. caerulescens* que crece en suelos de calaminas y serpentinas, y cuya distribución en Gran Bretaña y Bélgica esta estrechamente vinculada con las minas de Zn y Pb.

Las plantas que hiperacumulan metales han llamado la atención desde hace tiempo como indicadoras geobotánicas de depósitos de minerales. Mas recientemente la posibilidad de extraer metales del suelo y concentrarlos en la parte aérea proporcionan una aplicación práctica en fitorremediación. Estas plantas representan un modelo para estudiar los mecanismos de acumulación de metales como así también su tolerancia y detoxificación.

Es importante reconocer que la fitorremediación ofrece ventajas adicionales a la limpieza de suelos y mantos freáticos al emplear alguno de los siguientes mecanismos:

- I. Incremento de la actividad y población microbiana en el subsuelo, que eleva la cantidad de carbón orgánico.
- II. Mejoras en la aeración del suelo por la liberación de oxígeno por las raíces.
- III. Retardación del movimiento e intercepción de compuestos orgánicos y algunos metales.
- IV. Estimulación de las transformaciones de compuestos tóxicos a compuestos de menor toxicidad.
- V. Captación de hidrocarburos volátiles por las hojas, que sirven de “tapadera” a los lugares contaminados.

En la década pasada la fitorremediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, fue ampliamente estudiada. En muchos estudios se encontró que el limitante en la efectividad de esta tecnología es el transporte de los contaminantes desde la superficie externa hacia el interior de la planta.

Investigaciones sobre el tema han encontrado que tres factores son los que controlan la cantidad de contaminante (orgánico) que la raíz puede tomar: 1) propiedades del compuesto; 2) condiciones ambientales, y 3) características de la especie de planta.

Para un compuesto químico dado, se ha demostrado que la cantidad de contaminante que la raíz puede tomar, es proporcional a la afinidad que tiene el contaminante hacia el octanol o el agua (denominado coeficiente de partición

octanol/agua). Este coeficiente de partición ayuda a predecir la cantidad de un compuesto que se acumulara, por ejemplo, en los tejidos de los seres vivos.

La resistencia a la desorción desprendimiento de contaminantes orgánicos de suelos y sedimentos, se ha estudiado y reportado ampliamente en la última década.

Estos estudios sugieren que una fracción del compuesto contaminante tiene una velocidad de desorción del suelo extremadamente lenta.

Existen varias teorías para explicar este fenómeno, pero sus autores no se ponen de acuerdo sobre cuál es el mecanismo que origina tal fenómeno. Sin embargo, se ha observado de manera experimental que si la desorción del contaminante es suficientemente lenta, puede dejar el contaminante dentro del suelo y ahorrarse los gastos que generaría tratar de limpiarlo, sin riesgo para el medio.

Otra de las plantas utilizadas en la Fitorremediación es la *Discaria americana*, esta planta evidenció su capacidad para absorber y acumular altas concentraciones de Zn agregado al suelo. En condiciones de hidroponía los valores sobrepasaron los 6000 ppm. La *discaria americana* es una planta arbustiva, perenne, que pertenece a la familia de las *Rhamnaceae*, y que es capaz de fijar nitrógeno de la atmósfera en simbiosis con una actinomiceta del género *Frankia*. Ella vive en el suelo como organismo saprófito, pero en presencia de plantas actinorrizas prolifera en la

rizosfera, penetra en las raíces- generalmente a través de los pelos radicales- e induce la formación de nódulos, en los cuales se aloja.

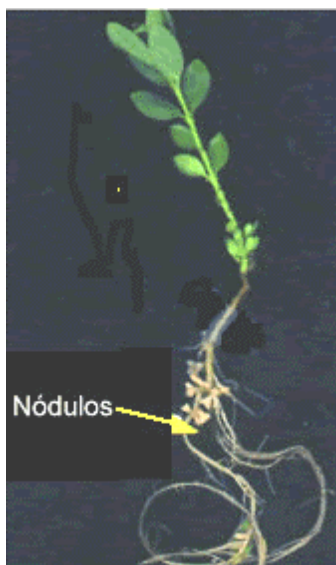


Figura 4. Discaria americana

Ese nitrógeno es aprovechado por las plantas y resulta en un posterior enriquecimiento del suelo en dicho elemento⁽¹²⁾

8.4.1. TIPOS DE FITORREMEDIACIÓN

Entre las diversas categorías de la fitorremediación se destacan: (tabla 1)

La fitoextracción, la rizofiltración, la fitoestabilización, la fitoestimulación, la fitovolatilización, la fitodegradación.⁽²⁵⁾

Taba # 1 Tipos de fitorremediación

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación Tratada
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (principalmente, la parte aérea)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Ejemplos en laboratorio y en campo:

1) Por estudio con plantas silvestres de girasol, geranio y mostaza de la India, se comprobó que el geranio tolera más la contaminación por níquel y por plomo mientras que la mostaza es más tolerante al cadmio.

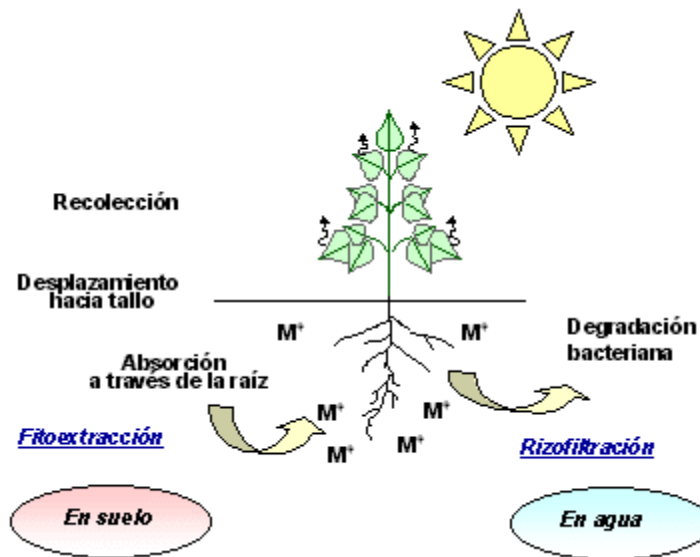


Figura 5. esquema de fitoextracción y rizofiltración

2) Rizofiltración para la extracción de Uranio de aguas subterráneas en AsthabulaOhio, EEUU.

3) Rixofiltración a nivel de cultivo in Vitro para detoxificar compuestos fenólicos en aguas contaminadas (por ejemplo los derivados de los herbicidas tradicionales y contaminantes como el 2,4-D) en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba por el grupo de investigación de la Dra. Elizabeth Agostini

4) Fitovolatilización de mercurio (Hg.) por medio de plantas transgénicas (Arabidopsis thaliana) que fueron transformadas con dos genes provenientes de

microorganismos que pueden transformar el mercurio iónico en mercurio más estable.

5) Plantas transgénicas de tabaco con genes provenientes de bacterias que le permiten detoxificar TNT y GTN en suelos de campos minados⁽³²⁾

Hasta el momento, se ha descubierto que algunas moléculas facilitan el transporte de metales pesados al interior de la planta a través de las raíces. Las sustancias orgánicas quelantes que son capaces de formar iones complejos con el metal, facilitan en gran medida la absorción. Estas sustancias pueden ser producidas por la propia planta y liberadas al suelo a través de las raíces, o pueden ser añadidas directamente por el hombre al suelo que se desee descontaminar.

Cuando se utilizan las plantas fitorremediadoras para "limpiar" zonas contaminadas, es necesario retirar después la biomasa producida, pues contiene una concentración normalmente bastante elevada de peligrosos contaminantes que retornarían de nuevo al suelo si se dejara a las plantas morir en el mismo lugar donde crecieron. Generalmente, se recoge la parte superior de las plantas y se lleva a centros especializados para su incineración. A veces, es necesaria la eliminación total de las raíces, por ser en esta zona donde se acumula el contaminante a eliminar.

En estos casos, la técnica puede resultar prohibitivamente costosa. El que se dé uno u otro caso depende del contaminante a eliminar y de la especie elegida para

su acumulación. En la actualidad, ninguna especie es capaz, por sí sola y en una única cosecha, de eliminar completamente el contaminante del suelo afectado, sino que serían necesarias varias cosechas sucesivas para devolver al suelo sus condiciones originales.

Se Puede esperar que en un futuro cada vez más cercano, y gracias a las especies hiperacumuladoras transgénicas, estos problemas se puedan solucionar, desarrollando variedades artificiales a medida, que sean más tolerantes al contaminante, posean mayor eficacia absorbente, resistan al clima de la región que se desee descontaminar y acumulen el contaminante en las hojas y partes superiores de la planta, de forma que sea más fácil de recolectar. Por último, sería deseable que la cosecha se pudiera automatizar fácilmente y que el metal fuera recuperado para ser reciclado y obtener así un beneficio económico adicional.

A simple vista parecen demasiados requerimientos, pero ya se ha comprobado otras veces que el ingenio humano no conoce límites a la hora de manipular organismos vivos, especialmente cuando se trata de una tecnología tan deseable y necesaria. En cualquier caso, la Fitorremediación es una ciencia floreciente, con un presente asombroso y un futuro muy prometedor. ⁽¹⁰⁾

8.4.2. ESPECIES FITORREMEDIADORAS

En la mayoría de los casos, no se trata de especies raras, sino de cultivos bien conocidos por todos. Así, el girasol (Heliantus anuus) es capaz de absorber en

grandes cantidades el uranio depositado en el suelo, bien por accidentes nucleares (como el de Chernobil) o por el uso bélico de proyectiles contruidos a base de este metal (como es el caso de Bosnia).

Los álamos (género Populus sp) absorben selectivamente níquel, cadmio y zinc. También la conocida Arabidopsis thaliana, una pequeña hierba que es para los biólogos vegetales lo que la mosca Drosophila es para los genetistas, es capaz de hiperacumular cobre y zinc.

Otras plantas comunes que se han ensayado con éxito como posibles especies fitorremediadoras en el futuro inmediato son la alfalfa, la mostaza, el tomate, la calabaza, el esparto, el sauce y el bambú. Incluso existen especies vegetales capaces de eliminar la alta salinidad del suelo, gracias a su capacidad para acumular el cloruro de sodio.



figura 6. Especies fitorremediadoras.

Otros géneros, por el contrario, menos conocidos, podrían llegar a hacerse famosos en los próximos años gracias a sus también excelentes propiedades como hiperacumuladores. Es el caso de una pequeña planta de la extensa familia de las coles (Brasicáceas) llamada *Thlaspi caerulescens*, que ha demostrado ser el mejor hiperacumulador conocido para el cadmio y el zinc, llegando a extraer en una sola generación hasta el 50% de todo el cadmio existente en el suelo. Otras

especies del género Thlaspi han demostrado su capacidad para acumular también plomo y cobre.

Una hierba llamada Amaranthus retroflexus ha mostrado ser 40 veces más efectiva que sus competidoras en absorber el amenazador cesio-137 radiactivo, que es uno de los más peligrosos contaminantes de las centrales nucleares, por su capacidad de pasar a la leche de vaca y de ahí a la alimentación humana. Amaranthus también resulta muy prometedora como hiperacumulador de plomo, uno de los contaminantes que se encuentran en mayor cantidad en nuestros suelos y que resulta, además, muy difícil de absorber por los vegetales. Por su parte, un helecho originario de Florida, el Pteris vittata, ha demostrado recientemente ser capaz de absorber el peligroso arsénico, siendo capaz de concentrarlo hasta 200 veces respecto al suelo de donde lo toma. Lo más curioso es que el helecho Pteris crece mejor en suelos que contienen elevadas cantidades de arsénico que en los que carecen de él, un hecho que tiene sorprendidos a los científicos.⁽¹⁰⁾

8.4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN

Ventajas:

- Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas.

- Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.
- Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.

Desventajas

- El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas.
- La fitotoxicidad es un limitante en áreas fuertemente contaminadas.
- Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.
- La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación.
- Se requiere comprender mejor la naturaleza de los productos de degradación (fitodegradación).

9. FACTORES INCIDENTES EN LOS PROCESOS DE REMEDIACIÓN

En general, los contaminantes que se encuentran en el suelo son: metales pesados, contaminantes orgánicos y exceso de sales. En concreto, tres son los factores fundamentales a considerar al analizar las alternativas de remediación:

- el foco de contaminación
- el mecanismo de infiltración
- el tipo de contaminante

9.1. FOCO DE CONTAMINACIÓN

9.1.1. FOCOS PUNTUALES: Se derivan en su mayor parte de la industria y sus actividades asociadas. Se pueden producir en numerosos emplazamientos y situaciones, pero las podríamos asociar en :

9.1.1.1. GESTIÓN INADECUADA, donde se incluyen los diferentes fallos de instalaciones, procesos, humanos y de gestión de residuos.

9.1.1.2. ACCIDENTES CAUSADOS POR IMPRUDENCIAS O NEGLIGENCIAS.

En estos casos la contaminación se podría paliar si se cuenta con protocolos adecuados para controlar los posibles contaminantes.

9.1.1.3. VERTIDOS IRREGULARES, VOLUNTARIOS O INVOLUNTARIOS.

9.1.1.4. TIPOS DE RESIDUOS QUE PUEDEN CONSTITUIR UN FOCO PUNTUAL

9.1.1.5. RESIDUOS DERIVADOS DE LA INDUSTRIA.

Los tipos de residuos industriales que pueden constituir esta contaminación se pueden dividir en:

- sólidos
- líquidos
- otros (pastosos, emulsiones o lodos de tratamiento químico.)

En este caso, los contaminantes pueden llegar al suelo de diferentes formas:

- Vertido directo
- Vertido controlado
- Vía atmosférica

9.1.1.6. RESIDUOS DERIVADOS DE LA MINERIA.

En este caso nos referimos al impacto que pueden tener:

- Explotaciones a cielo abierto.
- Escombreras y taludes

-Aguas ácidas etc

Estos impactos producirán en el suelo:

-Degradación o pérdida de suelo

-Contaminación por elementos químicos.

9.1.1.7. OTRAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN:

Extracción de hidrocarburos, Curtido de pieles, Refinado del petróleo, Industria química, Fabricación de pesticidas, Cementeras, Siderurgia., Vertederos.

9.1.2. FOCOS DIFUSOS

9.1.2.1. AGRICULTURA.

En este medio, las actividades se realizan directamente sobre el suelo, por lo que en este sector la contaminación se asocia fundamentalmente al uso incorrecto de fertilizantes y biocidas.

Por otra parte, la agricultura intensiva está asociada a la pérdida de cobertura vegetal y materia orgánica del suelo, lo que supone la incidencia de los procesos de erosión y pérdidas de suelo, a lo que se añade el peligro de compactación causado por la maquinaria agrícola, la sobreexplotación de acuíferos debida al regadío y la acumulación de metales pesados debidos al uso de fertilizantes.

9.1.2.2. GANADERIA

Puede constituir una causa importante de contaminación de las aguas subterráneas por percolación de purines en el terreno. En este caso, además de hablar de contaminación química, habría que considerar la contaminación microbiológica. También, la ganadería extensiva presenta problemas de erosión por el pastoreo en zonas de pendiente o compactación, acelerando la desertización de los suelos.

9.1.2.3. SILVICULTURA

Las explotaciones forestales tienen un importante impacto sobre el suelo a causa de la apertura de pistas y el tránsito de maquinarias, que favorece la erosión y compactación del suelo, además la preparación de la madera para usos industriales hace que se utilicen multitud de productos fitosanitarios, que tienen alta toxicidad.

9.1.2.4. DEPÓSITO ÁCIDO.

Algunos contaminantes atmosféricos sufren reacciones de oxidación que les convierte en compuestos ácidos que al depositarse sobre el terreno puede provocar reacciones de acidificación en el medio.

9.1.2.5. TRANSPORTE.

Un foco difuso de contaminación lo constituye el transporte de materiales que en el caso de fuga o mala manipulación constituiría una nueva contaminación.

Por todo lo anterior, se deduce que las medidas enfocadas hacia la descontaminación de los suelos deben ser diversas, debido a que las actividades origen del proceso de degradación o contaminación son variadas⁽¹⁷⁾

9.2. MECANISMO DE INFILTRACIÓN

El mecanismo puede ser o bien un acceso directo del contaminante al acuífero o a capas profundas del suelo, ya sea por mecanismos antrópicos (pozos) o naturales (sumideros), o bien un acceso difuso, a través de una infiltración en sentido estricto del contaminante en el suelo. El primer caso es más problemático a primera vista, puesto que afecta de forma mucho más rápida y completa a las aguas subterráneas, pero es más sencillo de solucionar a medio-largo plazo, puesto que una parte importante de la solución consiste en impedir ese acceso. La infiltración, por su parte, suele implicar un menor grado de afectación a las aguas subterráneas, debido a la capacidad de atenuación del suelo, pero a su vez esto hace que el suelo quede afectado, lo que a menudo prolonga el problema en el tiempo y el espacio.

9.3. EL TIPO DE CONTAMINANTE

El tipo de contaminante es siempre fundamental para definir las posibilidades de remediación. Las principales alternativas en este sentido pueden ser las siguientes:

9.3.1. PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

Suelen ser poco problemáticas, debido a que tienden a ser filtradas con facilidad por el suelo, o en el propio subsuelo. No obstante, en el caso de infiltraciones directas a acuíferos con menor capacidad de filtrado, pueden llegar a presentar un problema.

9.3.2. SALES EN DISOLUCIÓN.

Los componentes aniónicos o catiónicos que el agua lleva en disolución pueden ser captados en grado variable por los mecanismos naturales de depuración del suelo (sistemas coloidales con capacidades sorcitivas). Como ya es conocido, unos son más problemáticos que otros, lo que hace también muy variada la gama de soluciones que pueden adoptarse para su eliminación, si bien una de las más adecuadas suele ser la extracción y tratamiento de las aguas contaminadas, por lo general sencilla en este tipo de casos.

9.3.3. OTROS CONTAMINANTES FÍSICO-QUÍMICOS.

En relación con lo anterior, la presencia de sales en disolución a menudo va acompañada de acidez, alcalinidad, condiciones redox inapropiadas, etc. Como en el caso anterior, la infiltración a través del suelo, o la naturaleza de la roca que constituye el acuífero, a menudo mitiga el problema, pero éste puede ser en el detalle muy variado, y admitir diversas alternativas de remediación.

NAPLs:

Corresponden a las siglas en inglés de “*Non Aqueous Phase Liquid*”: fase líquida no acuosa, es decir, líquidos inmiscibles con el agua, y de menor densidad, es decir, suelen ser hidrocarburos derivados del petróleo, que por lo general no tienden a infiltrarse en presencia de agua, debido a que flotan sobre ésta.

DNAPLs:

Corresponden a las siglas en inglés de “*Dense Non Aqueous Phase Liquid*”: fase líquida densa no acuosa, es decir, líquidos inmiscibles con el agua, y de mayor densidad que ésta, que pueden ser de naturaleza diversa, y que constituyen en la actualidad un serio problema por la persistencia y capacidad de infiltración y migración de estos productos en el subsuelo. Algunos de ellos corresponden a disolventes orgánicos, como el Tricloroetano, empleado en tintorería.

Otros factores que pueden también influir en esta cuestión pueden ser la localización concreta del problema (proximidad de poblaciones, proximidad a cuencas hidrográficas importantes), y la clase y propiedades de los suelos afectados, que puede influir decisivamente en la evolución de la contaminación, y va a condicionar la aplicación de las técnicas de descontaminación.

Con estas cuestiones básicas, el primer estudio a llevar a cabo para definir las posibilidades de remediación de un problema de este tipo es el de distribución geométrica de los contaminantes en el área problema, que puede ser básicamente de tres tipos:

Generalizada. Es decir, que afecte aproximadamente por igual a todo un acuífero o a todo un suelo. Suele ser consecuencia de contaminación difusa o directa, y por lo general corresponde a sales en disolución, con un potencial de difusión alto.

Puntual. Afecta solamente a un área de extensión limitada, y suele estar constituida por un contaminante químico o un líquido inmiscible con agua, con escasa capacidad de infiltración, ya sea por su naturaleza o su escaso volumen, o por la naturaleza del terreno que la alberga.

Plumas. Las plumas son la derivación de una contaminación puntual, cuando persiste durante largos periodos de tiempo, o está constituida por un volumen

importante de contaminantes. La figura 7 muestra de forma esquemática la geometría que suelen presentar.

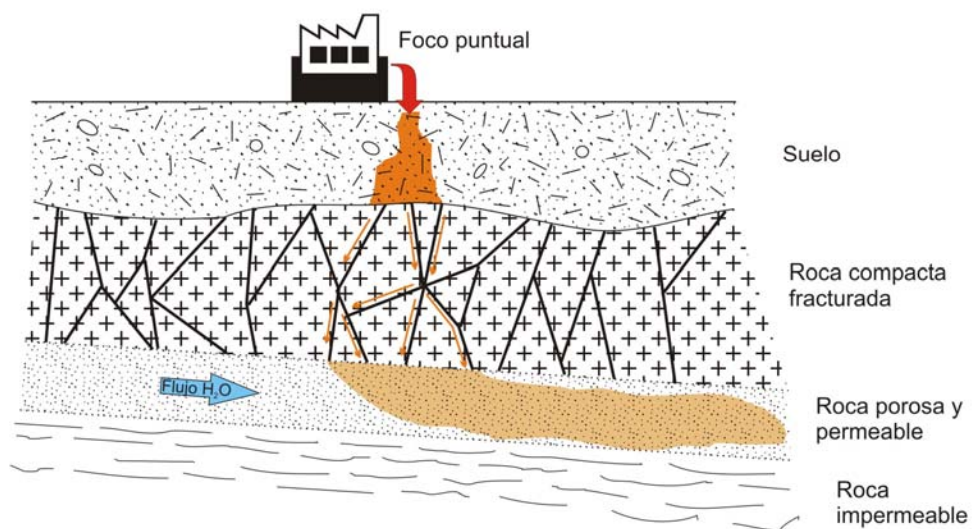


Figura 7.- Pluma de contaminación generada por el vertido a partir de un foco puntual.

Se trataría en este caso de una contaminación por aguas contaminadas con sales, o por DNAPLs, que se infiltran a través del suelo a partir de un foco puntual industrial.⁽³¹⁾

10. TIPOS DE TECNICAS PARA LA SOLUCIÓN O MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

Dentro de las técnicas más utilizadas se encuentran: técnicas de confinamiento, biorremediación intrínseca, técnicas de tratamiento in situ, técnicas de tratamiento ex situ, a continuación se hace una descripción de cada una.

10.1. TÉCNICAS DE CONFINAMIENTO

Aunque no son técnicas de biorremediación, son importantes como proceso primario para algunos casos especiales y se basan en el aislamiento de las aguas o suelos contaminados, de forma que su objetivo básico es evitar que esa contaminación se transfiera lateralmente. Por lo general son de aplicación cuando la contaminación está muy localizada y no resulta viable ninguna de las demás alternativas.

El aislamiento o confinamiento se basa, en cualquier caso, en la construcción de **barreras**, que pueden ser de muy diversos tipos:

10.1.1. BARRERAS DE LODO

Consisten en trincheras verticales que se excavan alrededor del área contaminada y se rellenan con un lodo, que impermeabiliza el perímetro a aislar. El relleno estará constituido por mezclas más o menos complejas del propio suelo con arcillas especiales (sepiolita, bentonita), que confieran mayor estanqueidad, o determinadas propiedades filtrantes a la barrera. También el cemento puede utilizarse para aumentar el grado de confinamiento. Este tipo de barreras suelen tener profundidades máximas de 15 m., entre 0,6 y 1,2 m. de espesor, y su mayor efectividad se consigue si quedan ancladas en una capa infrayacente de menor permeabilidad

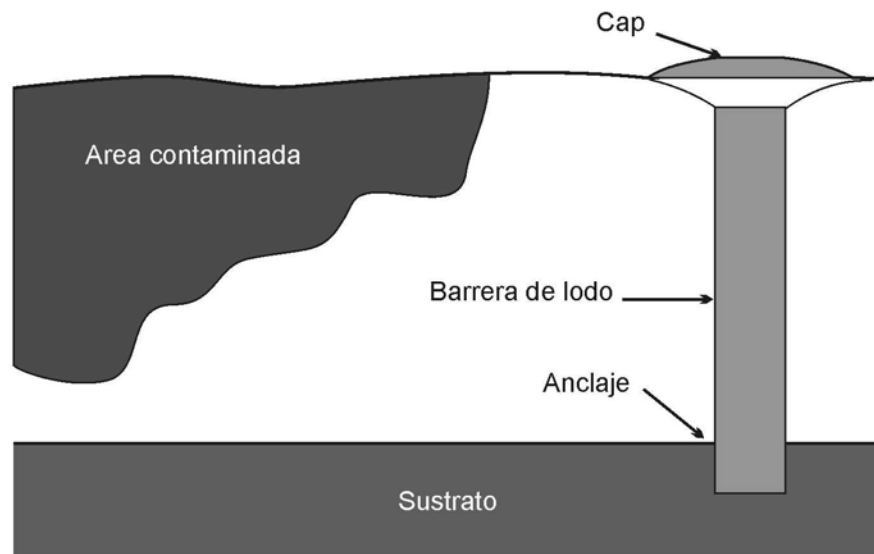


Figura 8.- Esquema de una sección de sistema de barreras de lodo, en la que la barrera queda anclada en un sustrato de baja permeabilidad.

10.1.2. LECHADA DE CEMENTO

Consiste en impermeabilizar mediante inyección de una capa continua de cemento bajo todo el perímetro inferior del área contaminada . Se requiere un equipamiento específico para llevar a cabo este tipo de inyección.



Figura 9.- Esquema del proceso de inyección de lechada de cemento bajo una mancha de contaminación.

10.1.3. BARRERAS QUÍMICAS.

Como en al caso anterior, de inyecta bajo el área afectada un producto que impida la dispersión del contaminante, en este caso un agente químico, que en unos casos se emplea para reducir la permeabilidad del sustrato, y en otros para producir algún efecto sobre el contaminante: reducir su toxicidad o movilidad (figura 10).

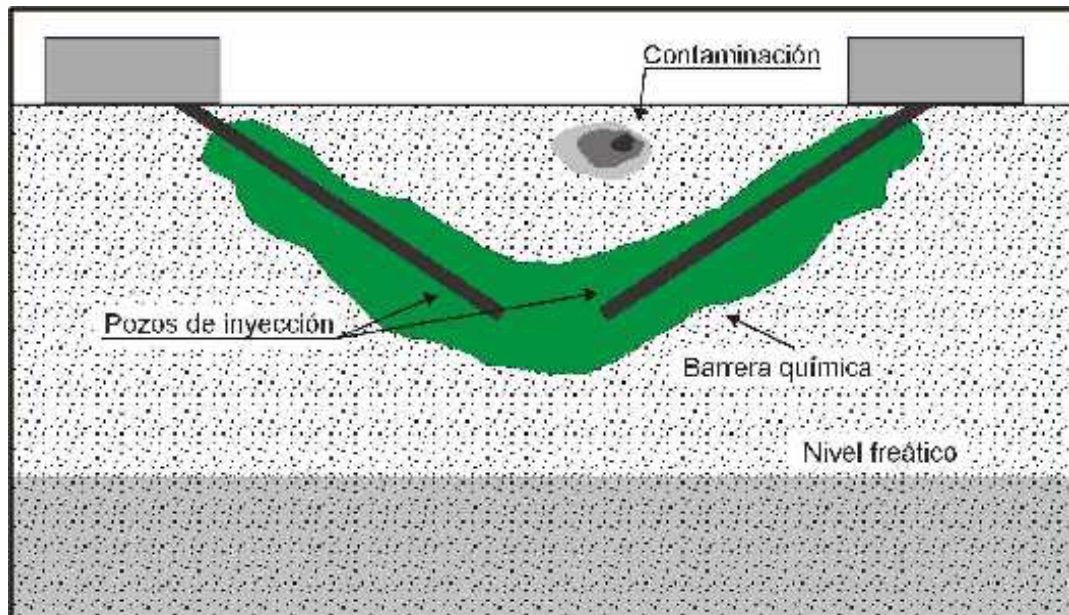


Figura 10.- Esquema de una barrera química, consistente en un producto (con color verde en la figura) que se inyecta bajo la zona contaminada.

10.1.3. BARRERAS DE PANELES.

Consiste en implantar barreras formadas por paneles o tabiques de madera, cemento, hormigón armado, acero, de forma que en algunos casos puedan penetrar el terreno sin necesidad de excavación (figura 11).

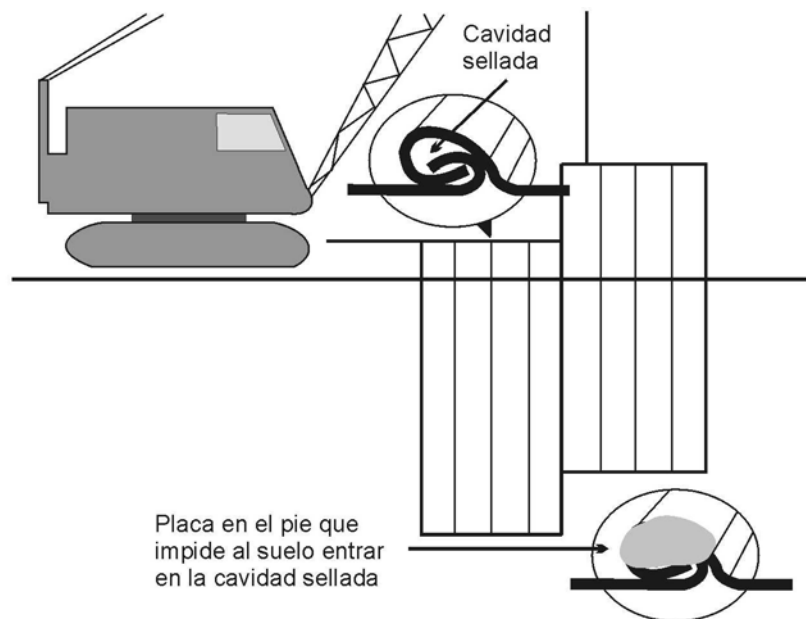


Figura 11.- Instalación de una barrera de paneles, cuyas uniones quedan selladas mediante un dispositivo mecánico.

10.1.4. MEMBRANAS SINTÉTICAS.

Formadas por las llamadas geomembranas, elementos textiles de diseño con permeabilidades diferenciadas, que pueden instalarse mediante la correspondiente excavación en el entorno del área afectada (figura 12).

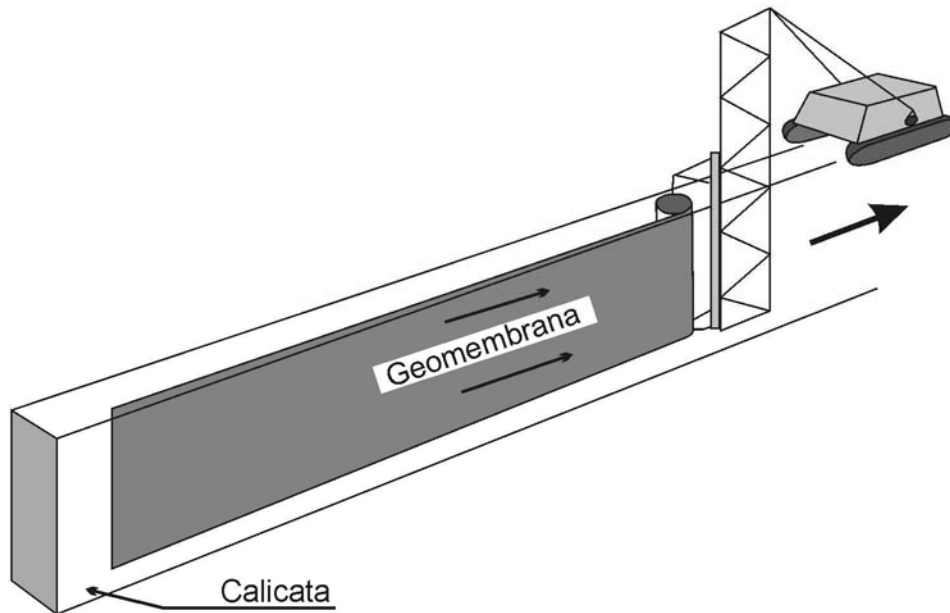


Figura 12.- Extensión de una geomembrana en una zanja perimétrica respecto al área a aislar.

10.1.5. Vitrificación in situ.

Esta técnica consiste en fundir el suelo a muy alta temperatura (1.600-2.000°C) mediante una corriente eléctrica, de forma que se consiga:

La destrucción total de contaminantes orgánicos, que se transforman en gases que son recogidos en una campana instalada en la zona al efecto.

El aislamiento completo de otros contaminantes que el suelo pueda contener (inertización): sobre todo, metales pesados, que quedan formando parte de un vidrio muy resistente a la meteorización.

La vitrificación *in situ* constituye una alternativa agresiva, pero muy efectiva para contaminaciones polifásicas que incluyan compuestos muy refractarios al resto de tratamientos a considerar, y para problemas relativamente superficiales. Esta técnica se ha llegado a aplicar con éxito hasta unos 6 m de profundidad (figura 13). (31)

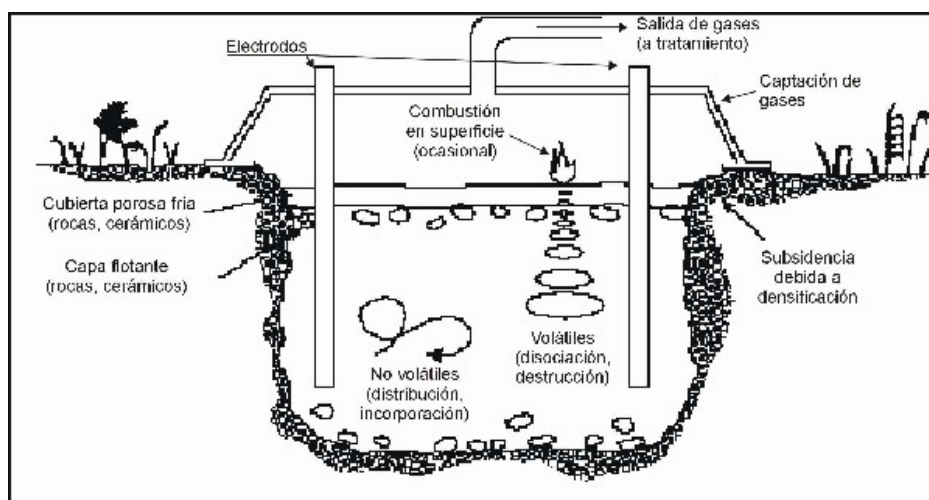


Figura 13.- Esquema de funcionamiento de un sistema de vitrificación, sobre a base de una corriente de alto voltaje y un sistema de recuperación de los gases emitidos, para su tratamiento.

10.3.1. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO IN SITU

Suelen ser de utilidad cuando el problema afecta a un volumen muy importante del suelo, que haga inviable su aislamiento y su tratamiento *ex situ*, o cuando éste supone un coste económico que lo hace inviable, ya que el tratamiento *in situ* suele implicar un menor coste económico. El tratamiento *in situ* puede ser de dos tipos: biológico o físico-químico.

Las técnicas de remediación *in situ* de carácter **biológico** son dos: biorremediación y fitorremediación.

Las técnicas de remediación *in situ* de carácter **físico-químico** incluyen las siguientes: Atenuación natural controlada, Barreras reactivas permeables, Extracción con vapor y aireación del suelo, *Flushing in situ*, Tratamientos térmicos, Oxidación química y Fracturación

10.3.1. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN IN SITU DE CARÁCTER BIOLÓGICO

10.3.1.1. LA BIORREMEDIACIÓN

Consiste en utilizar microorganismos (bacterias) para resolver o mitigar el problema, y es especialmente efectiva en el tratamiento de contaminantes orgánicos, incluido el petróleo. Para que las bacterias puedan eliminar las sustancias químicas dañinas, el suelo y las aguas subterráneas deben tener la temperatura, los nutrientes y la cantidad de oxígeno apropiados. Esas condiciones permiten que las bacterias crezcan y se multipliquen, y asimilen más sustancias químicas. Cuando las condiciones no son las adecuadas, las bacterias crecen muy despacio o mueren, o incluso pueden crear sustancias químicas más dañinas.

Si las condiciones del área no son las adecuadas, se intenta mejorarlas. Una manera de hacerlo es bombeando aire al interior del suelo, así como nutrientes u otras sustancias, como la melaza. A veces se añaden microbios si no los hay. Las

condiciones adecuadas para la biorremediación no siempre se logran bajo la tierra. En algunas áreas el clima es muy frío o el suelo es demasiado denso. En esas áreas se puede recurrir a excavar y sacar el suelo a la superficie, donde la mezcla del suelo se calienta para mejorar las condiciones. También, pueden añadirse los nutrientes necesarios, o puede añadirse oxígeno revolviendo la mezcla o haciendo pasar aire a presión a través de ella. Sin embargo, algunas bacterias funcionan sin oxígeno (anaeróbicas). Con la temperatura adecuada y la cantidad necesaria de oxígeno y nutrientes, las bacterias pueden hacer su trabajo de “biocorregir” las sustancias químicas.

A veces mezclar el suelo puede hacer que las sustancias químicas dañinas se evaporen antes de que las bacterias puedan mediar con ellas. Para evitar que esas sustancias químicas contaminen el aire, se puede mezclar el suelo dentro de tanques o edificaciones especiales, donde las sustancias químicas que se evaporan se pueden recolectar y tratar.

Los microorganismos pueden ayudar a eliminar la contaminación de las aguas subterráneas, al igual que del suelo. En este caso, el agua se mezcla con nutrientes y aire antes de que ser reinyectada al terreno. También pueden bombearse nutrientes y aire por los pozos, de forma que la mezcla se produzca directamente en profundidad. Los nutrientes y el aire añadidos ayudan a las bacterias a biorremediar las aguas subterráneas. Una vez que se han eliminado

las sustancias químicas dañinas, las bacterias ya no tienen “nutrientes” disponible y mueren.

La biorremediación es muy segura, ya que depende de microbios que existen normalmente en los suelos. Esos microbios son útiles y no representan un peligro para las personas en el sitio o la comunidad. Además, no se emplean sustancias químicas peligrosas. Los nutrientes que se añaden para que las bacterias crezcan son fertilizantes de uso corriente en el césped o el jardín. La biorremediación transforma las sustancias químicas dañinas en agua y gases inofensivos y, por lo tanto, las destruye totalmente.

10.3.1.3. LA FITORREMEDIACIÓN

es una técnica biológica que en el detalle se puede subdividir en varios aspectos, que corresponden a distintas posibilidades de aplicación de las plantas a la remediación de problemas producidos por la contaminación.

La más común y tradicional de las formas de fitorremediación es la revegetación de terrenos afectados por actividades mineras. En este caso, la presencia de plantas sobre la escombrera atenúa los efectos de dispersión de los materiales que la constituyen por el viento o el agua, y favorecen la generación de un suelo que actúa como una barrera, evitando parcialmente la emisión de los contaminantes que contiene. Para esta técnica pueden emplearse plantas de las

denominadas ruderales, que son capaces de desarrollarse sobre suelos muy degradados, iniciando la colonización de éstos. En otros casos, y para acelerar el proceso, es necesario recubrir la escombrera con suelo vegetal que facilite el empleo de plantas más comunes. No obstante, esta técnica se encuadra más en los procedimientos de restauración que en los de remediación.

Otra vertiente de esta técnica de fitorremediación es la descontaminación de suelos contaminados por hidrocarburos biodegradables. En este caso, determinadas plantas, en especial algunas arbóreas, son capaces de alimentarse de este tipo de compuestos presentes en el suelo, e incorporarlos a su metabolismo, transformándolos en materia vegetal así como en productos gaseosos simples (CO_2 , agua) que se emiten durante la respiración vegetal.

También se aplican las plantas a la extracción de contaminantes de tipo metal pesado presentes en el suelo (fitoextracción: figura 14). En este caso, la planta absorbe los metales pesados del suelo, siempre y cuando se encuentren en formas bioasimilables (en disolución, o formando complejos orgánicos), y los incorpora a su metabolismo. En la mayor parte de los casos el resultado es una acumulación del metal pesado en la planta, que a menudo es preferencial en unos u otros órganos de la misma (raíces, tallos, hojas, frutos).

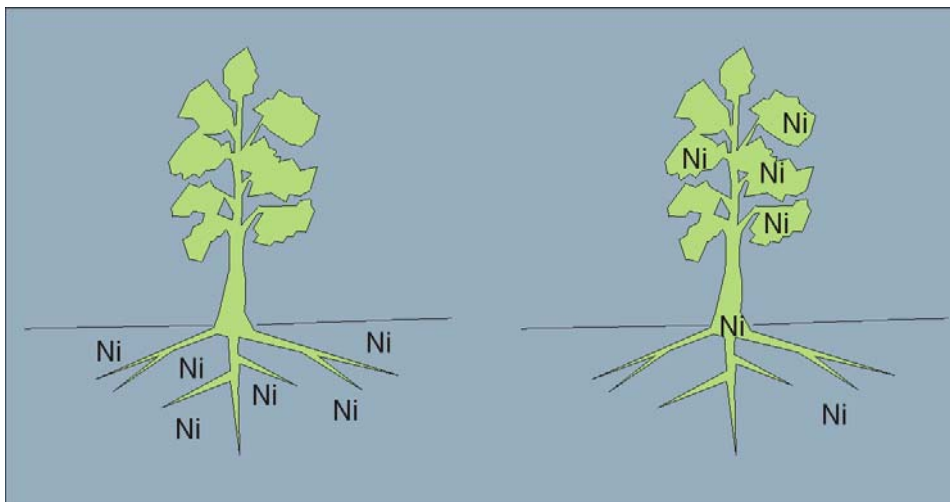


Figura 14.- Base conceptual de la fitoextracción: el metal (Ni) contenido en el suelo es captado por la planta e incorporado a sus tejidos.

Las raíces de algunas plantas son capaces de actuar como barreras frente a los metales pesados. En estos casos se produce una acumulación del metal pesado en la corteza de la raíz, puesto que éstos son arrastrados junto con el agua hasta ésta, y ahí quedan detenidos y acumulados. También pueden favorecer reacciones de transformación del contaminante en sustancias químicas menos dañinas, mediante la acción de los organismos o microbios que viven en las raíces de las plantas.

10.3.1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TÉCNICA IN SITU BIOLÓGICAS

Como principales ventajas de esta técnica se pueden indicar las siguientes:

- La biorremediación es una técnica *in situ*, lo que evita la necesidad de extraer el suelo, e incluso el contacto de los trabajadores con el suelo o agua contaminados.
- La biorremediación evita la liberación de gases dañinos al aire y se generan muy pocos residuos.
- La biorremediación Generalmente esta técnica no requiere tanto equipamiento ni trabajo como la mayoría de los métodos alternativos. Por lo tanto, suele resultar más económica.
- La fitorremediación radica en su bajo coste. Los métodos clásicos de remediación para sustancias solubles (caso más barato) cuestan en el entorno de 100.000 a 1.000.000 de Euros por hectárea. Por el contrario, la fitorremediación tiene un coste entre 200 y 10.000 Euros por hectárea.

Como inconvenientes, se pueden citar los siguientes:

- La biorremediación no es de aplicación más que para la descontaminación de hidrocarburos biodegradables.
- La biorremediación no suele ser efectiva más que en condiciones relativamente superficiales.
- La biorremediación presenta factores intrínsecos que la hacen completamente inviable en determinados casos.

- No cualquier planta vale, se requieren las denominadas “hiperacumuladoras”: plantas que poseen la capacidad de acumular y tolerar 10-100 veces más un determinado metal comparado con las plantas normales.
- Las plantas hiperacumuladoras acumulan un solo metal, y hasta ahora no se han encontrado hiperacumuladoras para toda la diversidad de metales pesados asociados a la actividad minera.
- Muchas hiperacumuladoras crecen lentamente, y poseen una escasa biomasa.
- Se conoce muy poco de las características agronómicas de muchas de estas plantas, tales como sus requerimientos de fertilizantes, y su susceptibilidad a enfermedades o ataques por los insectos. ⁽³¹⁾

10.3.2.1 TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN IN SITU DE CARÁCTER FÍSICO-QUÍMICO

10.3.2.1.1. ATENUACIÓN NATURAL CONTROLADA (MNA, MONITORED NATURAL ATTENUATION)

Se basa en el aprovechamiento y potenciación los procesos naturales para eliminar o reducir la contaminación en los suelos y las aguas subterráneas. La atenuación natural tiene lugar en la mayoría de las áreas contaminadas, pero para

que se produzca a ritmo suficiente como para que se pueda considerar un mecanismo efectivo de descontaminación deben darse las condiciones adecuadas en el subsuelo para que se produzca la descontaminación de forma efectiva. De no ser así, la eliminación de la contaminación no será ni lo suficientemente rápida ni completa. Los científicos supervisan o verifican la existencia de esas condiciones para asegurarse de que funciona la atenuación natural. A eso se le denomina atenuación natural controlada o MNA (por sus siglas en inglés).

Cuando el medio ambiente se halla contaminado con sustancias químicas, la naturaleza las elimina por cuatro vías:

10.3.2.1.1.ACCIÓN BACTERIANA

Las bacterias que viven en el suelo y en las aguas subterráneas utilizan algunas sustancias químicas como alimento. Cuando las sustancias químicas están completamente digeridas, las transforman en agua y en gases inofensivos(CO_2):

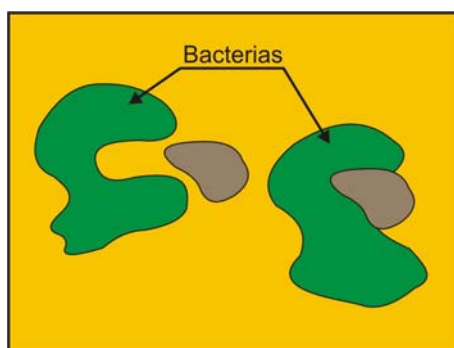
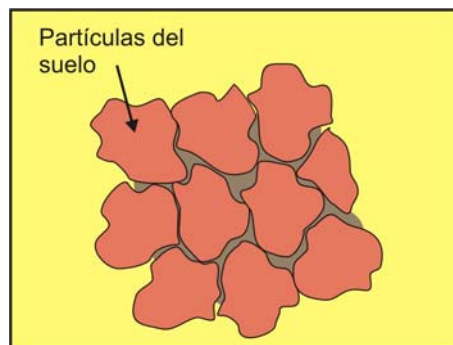


Figura 15 - Bacterias atrapando sustancias químicas contaminantes (en marrón) para su alimentación.

10.3.2.1.2. SORCIÓN

Las sustancias químicas se pegan o sorben al suelo, que las fija al lugar . De ese modo no se eliminan las sustancias químicas pero sí se impide que contaminen las aguas subterráneas y que escapen del lugar, al menos mientras las condiciones físico-químicas del suelo permanezcan estables.



**Figura 16.- Sorción de contaminante
(marrón) por el suelo.**

10.3.2.1.3. MEZCLA Y DILUCIÓN

Al pasar las aguas subterráneas a través del suelo, la contaminación se puede mezclar con el agua limpia. De ese modo se diluye la contaminación

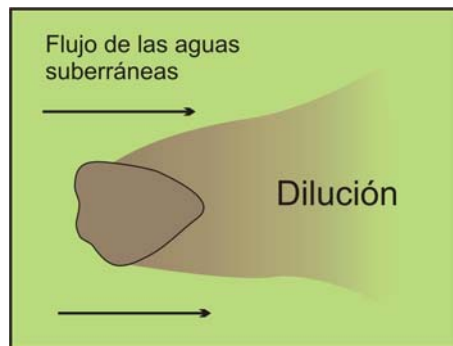


Figura 17 .- Efecto de dilución de contaminante (marrón) por efecto del flujo de aguas subterráneas.

10.3.2.1.4. EVAPORACIÓN

Algunas sustancias químicas, como el petróleo y los solventes, se evaporan, lo que significa que se convierten de líquidos a gases dentro del suelo. Además, si esos gases escapan al aire en la superficie del terreno, la luz del sol puede destruirlos.

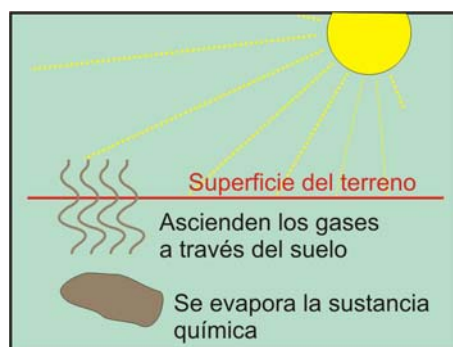


Figura 18.- Evaporación y descomposición de contaminante por efecto del calor solar.

La MNA funciona con mayor eficacia en los sitios donde se ha eliminado previamente la fuente de contaminación. Con posterioridad, los procesos naturales se deshacen de la pequeña cantidad de contaminación que queda en el suelo y en las aguas subterráneas. El suelo y las aguas subterráneas se examinan con regularidad para garantizar que hayan quedado limpios.

Según el área, la MNA puede dar los mismos resultados, con casi la misma rapidez, que otros métodos. Dado que la MNA se realiza bajo tierra, no es necesario excavar ni construir. Por ende, no hay que eliminar desechos soterrándolos (enterrándolos), afectando menos al medio ambiente. Asimismo, permite a los trabajadores evitar el contacto con la contaminación.

La MNA requiere menos equipamiento y trabajo que la mayoría de los otros métodos y por lo tanto resulta más económica. Puede que la supervisión durante años sea costosa, pero el costo sigue siendo menor que el de otros métodos.

La MNA es el único método de descontaminación que se usa en algunos sitios Superfund (USA) donde hay contaminación de las aguas subterráneas. En más de 60 sitios donde las aguas subterráneas están contaminadas, la MNA es sólo un método más entre los que se usan.

La MNA también se emplea en derrames de petróleo y gasolina de los tanques.

10.3.2.2. BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES

Son similares a algunas de las utilizadas para el aislamiento que ya se ha comentado con anterioridad, solo que, a diferencia de éstas, las BRP se instalan donde se ha identificado un flujo de aguas subterráneas contaminadas, para su depuración. Las BRP se construyen cavando una zanja larga y estrecha en el camino de las aguas subterráneas contaminadas. La zanja se llena de material reactivo capaz de eliminar las sustancias químicas dañinas.

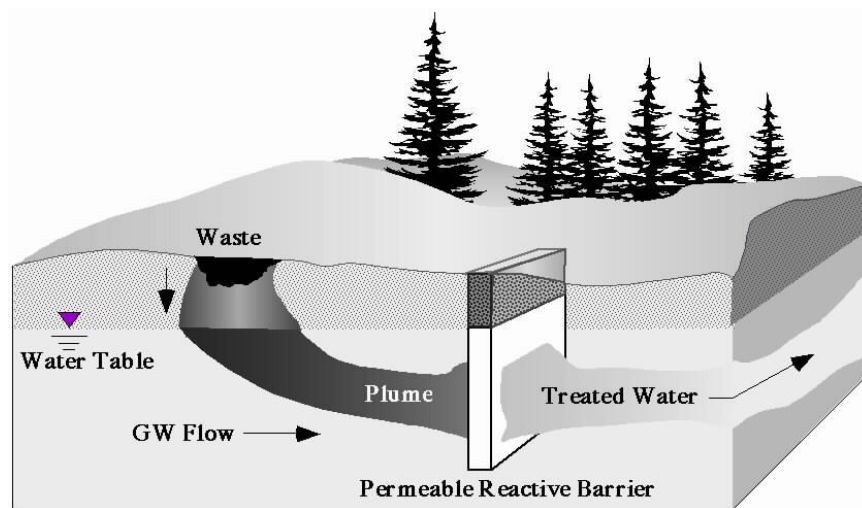


Figura 19 .- Representación esquemática de una barrera reactiva permeable interceptando una pluma de contaminación.

Entre los materiales reactivos más corrientes que pueden emplearse están el hierro, la caliza y el carbono, activado o no. Los materiales reactivos se mezclan con arena para facilitar que el agua fluya a través de la barrera, en lugar de alrededor de ella. En algunos sitios, la barrera es parte de un embudo que dirige

las aguas subterráneas contaminadas hacia la parte reactiva de la pared, disposición que recibe en inglés el nombre de “*funnel and gate*”. La zanja o el embudo relleno se cubren con tierra, por lo que no resulta visible en la superficie.

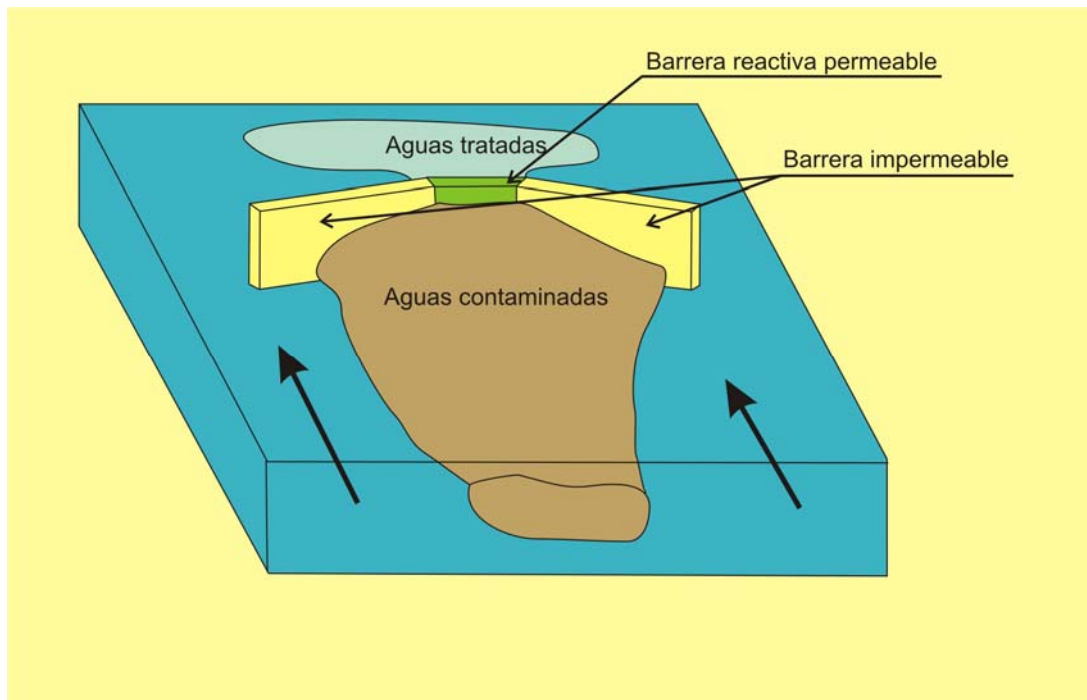


Figura20 .- Sistema de “*funnel and gate*” en una barrera reactiva permeable (verde en la figura). Las flechas mayores indican el sentido general de flujo del acuífero en el que se localiza la pluma de aguas contaminadas (en marrón).

El material que se emplea para construir la barrera depende del tipo de contaminante que se encuentre en las aguas subterráneas.

Diferentes materiales eliminan la contaminación empleando distintos métodos: Atrapando o sorbiendo las sustancias químicas en su superficie. Por ejemplo, el

carbono tiene una superficie a la que se sorben las sustancias químicas cuando las aguas subterráneas lo atraviesan.

Precipitando las sustancias químicas disueltas en el agua. Por ejemplo, la caliza hace que los metales disueltos precipiten.

Transformando las sustancias químicas dañinas en inofensivas. Por ejemplo, el hierro puede transformar algunos tipos de solventes en sustancias químicas inofensivas.

Estimulando a los microorganismos del suelo a que se alimenten de las sustancias químicas. Por ejemplo, los nutrientes y el oxígeno en las BRP contribuyen a que los microorganismos crezcan y asimilen más sustancias químicas. Cuando las bacterias metabolizan totalmente las sustancias químicas, las pueden transformar en agua y en gases inofensivos como el dióxido de carbono o anhídrido carbónico.

La Tabla adjunta muestra los agentes que pueden emplearse en este tipo de barreras, y los contaminantes sobre los que se aplican.

Agentes Tratantes y Contaminantes Tratables		
Agentes Tratantes	Contaminantes a Tratar	Estatus
Hierro metálico	Halocarbonos (*), metales reducibles	En práctica
Metales reducidos	Halocarbonos, metales reducibles	Demostración en campo
Pares de metales	Halocarbonos	Demostración en campo
Calizas	Metales, aguas ácidas	En práctica
Agentes sorcitivos	Metales, C. organicos	Demostración en campo, en práctica
Agentes reductores	Metales reducibles, C. organicos	Demostración en campo, en práctica
Aceptadores biológicos de electrones	Hidrocarburos del petróleo	En práctica, demostración en campo

(*) Por ejemplo CFC's

Las BRP eliminan muchos tipos de contaminación subterránea, y funcionan mejor en sitios de suelos arenosos poco compactos con flujo sostenido de aguas subterráneas. La contaminación no debe encontrarse por debajo de unos 15 metros de profundidad. Dado que no hay que bombear las aguas subterráneas contaminadas a la superficie, las BRP pueden resultar más económicas que otros métodos. Hay que eliminar pocos residuos soterrándolos en vertederos, con lo que también se ahorra dinero. No hay piezas que se rompan ni equipamiento sobre la superficie, de modo que los terrenos pueden utilizarse mientras se está llevando a cabo la descontaminación. No se incurre en costos energéticos con las BRP, ya que funcionan con el flujo natural de las aguas subterráneas.

10.3.2.3. EXTRACCIÓN DE VAPORES DEL SUELO Y LA AIREACIÓN DEL SUELO (SOIL VAPOR EXTRACTION AND AIR SPARGING)

Son dos técnicas diferentes, aunque a menudo complementarias, que se emplean para extraer contaminantes químicos del suelo vaporizándolos. Son complementarias porque la primera se emplea por encima del nivel freático, mientras que la segunda se utiliza por debajo de éste.

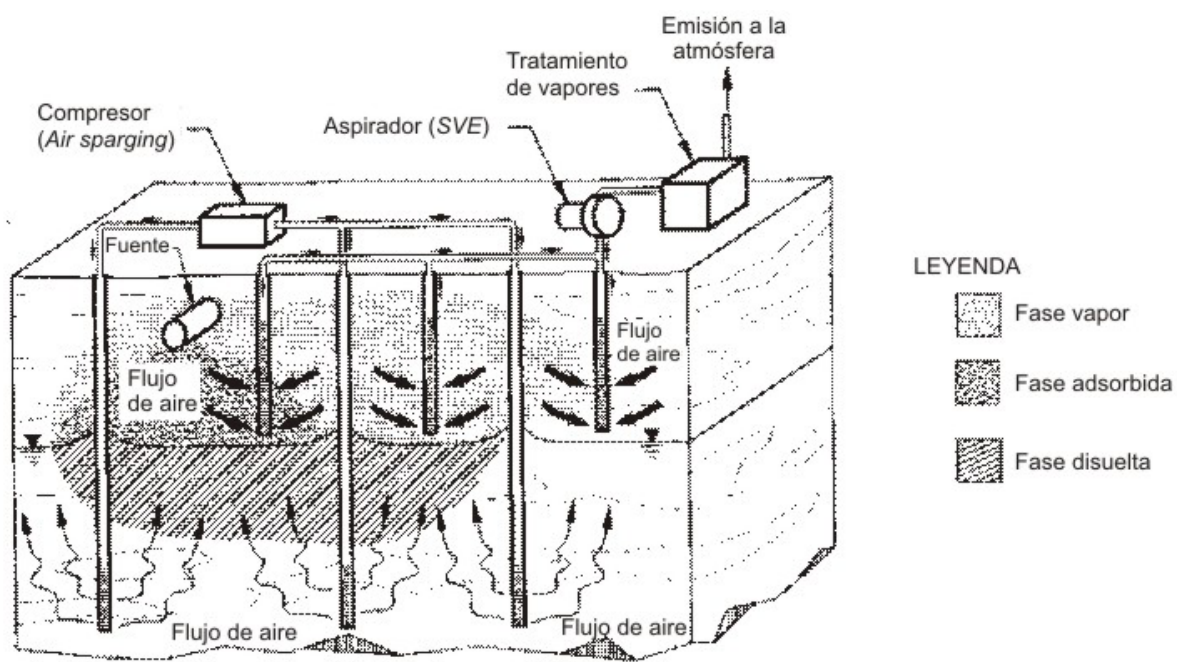


Figura 21 .- Combinación de las técnicas de extracción de vapor del suelo y aireación del suelo: la primera actúa por encima del nivel freático, y la segunda por debajo.

La extracción de vapores (SVE) consiste en la perforación de pozos por encima del nivel freático, en los que se genera un vacío, de forma que se bombean los volátiles contenidos en el suelo (contaminantes). Pueden combinarse con pozos

de inyección de aire, ya que esto favorece la evaporación de los contaminantes. El número de pozos de inyección y de extracción para un área contaminada puede variar desde uno a cientos, en función de la extensión del problema, y de las características en detalle del área: tipo de suelos, de contaminantes, etc. Los gases que se extraen son recogidos y tratados, de forma que se separan los contaminantes para su tratamiento posterior o almacenamiento en condiciones de mayor seguridad.

10.3.2.4. INYECCIÓN DE AIRE (*AIR SPARGING*)

consiste precisamente en la inyección de aire en el terreno, por debajo del nivel freático. En estas condiciones, la aireación del agua subterránea favorece la vaporización de los contaminantes, que son bombeados a superficie a través de pozos de extracción similares a los de extracción de vapor. La entrada de aire al suelo que suponen estas dos técnicas favorece, además, el desarrollo de microorganismos bacterianos, que a su vez favorecen la descontaminación a través de la transformación metabólica de los contaminantes en agua y CO₂. Las instalaciones requeridas para este tipo de tratamiento son económicas y de fácil mantenimiento, lo que hace que sean bastante empleadas.

10.3.2.5. FLUSHING IN SITU

Es una técnica química que se utiliza para eliminar contaminantes de tipo NAPL o DNAPL, inmiscibles con el agua, y que por tanto, no son arrastrados por los flujos acuosos. Esta técnica se basa en la infiltración en el terreno (desde superficie o pozos de inyección), de compuestos químicos que reaccionan con el contaminante, disolviéndolo. Los productos utilizados son surfactantes (detergentes) y cosolventes (alcoholes), que se mezclan con agua y se ponen en contacto con el contaminante, y se bombean a superficie a través de pozos de extracción (ver figura 22). La técnica se ve especialmente favorecida cuando el contaminante se encuentra en un terreno arenoso en contacto con otro arcilloso infrayacente.

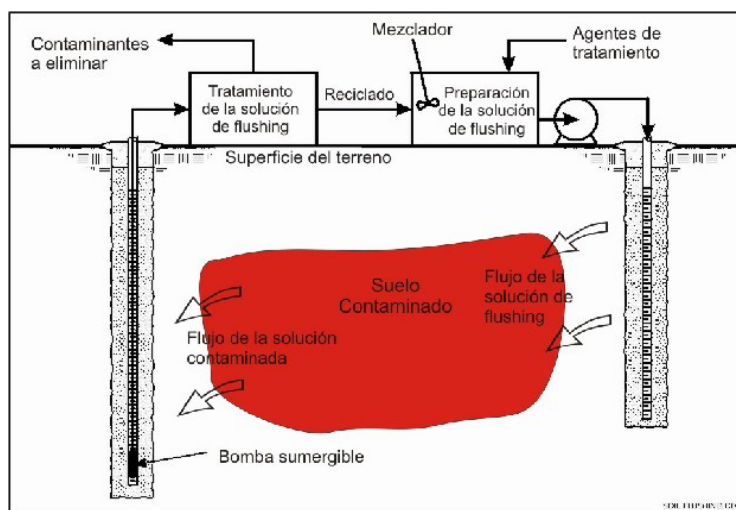


Figura 22.- Sistema de *Flushing in situ* actuando sobre una porción de suelo contaminado (en rojo). El agua y los reactivos se introducen por el pozo de la derecha, y los productos de la reacción se extraen por el de la izquierda en la imagen.

Es una técnica mucho más problemática que las anteriores, dado que implica el manejo e infiltración en el terreno de sustancias químicas (con cierta toxicidad y coste económico a considerar). Sin embargo, resulta efectivo en muchas ocasiones, y es la alternativa a métodos *ex situ*, normalmente de mayor en costos.

10.3.2.6. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Son un grupo de técnicas que se basan en la extracción de contaminantes a través de su movilización a altas temperaturas. Los productos químicos así movilizados se desplazan a través del suelo y las aguas subterráneas hasta pozos, donde son captados y bombeados hasta la superficie. Así, este apartado incluye la inyección de vapor, de aire caliente, de agua caliente, el calentamiento mediante resistencia eléctrica, o mediante radiofrecuencia o por conductividad térmica (calentamiento de tubos de acero). En todos los casos, se consigue una movilización del contaminante químico, que se extrae a través de un pozo al efecto.

El costo de estas técnicas es relativamente alto, pero a menudo se muestran muy efectivas, incluso en condiciones muy desfavorables (contaminantes retenidos en terrenos arcillosos).

10.3.2.7. OXIDACIÓN QUÍMICA

Emplea compuestos oxidantes para destruir la contaminación de suelos y aguas subterráneas, transformando ésta en compuestos inocuos, como agua y CO_2 . Esta técnica permite destruir muchos combustibles, solventes, y plaguicidas.

La técnica se base simplemente en la introducción en el terreno de los oxidantes, a través de pozos a diversas alturas, sin que sea necesario bombear los productos de la oxidación. No obstante, se observa que se obtiene una mayor efectividad de la técnica si establece un sistema cerrado, reinyectando lo obtenido por el pozo de extracción: con ello se ayuda a que se mezcle mejor el oxidante con los productos que constituyen la contaminación

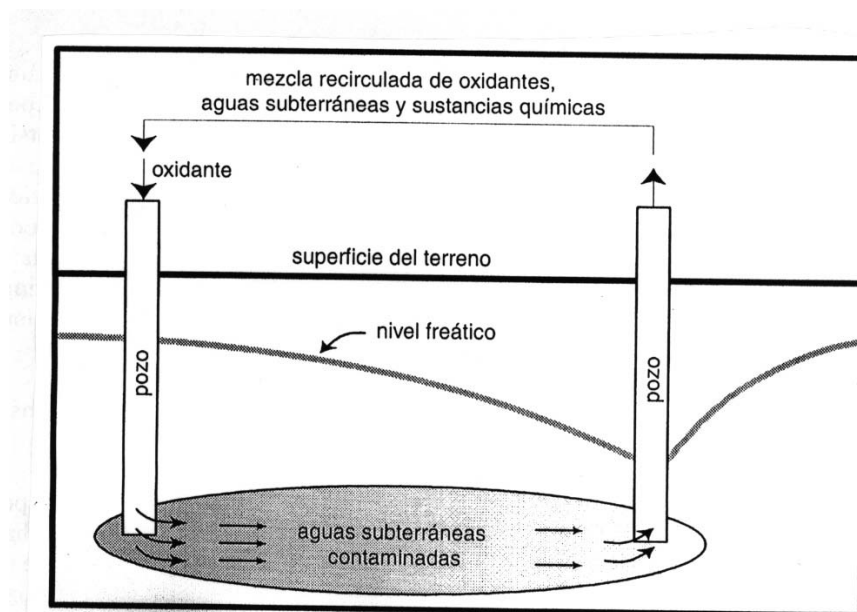


Figura 23 .- Esquema de un dispositivo para oxidación química.

Los productos oxidantes más utilizados son el agua oxigenada y el permanganato de potasio (de menor costo). También puede emplearse el ozono, aunque su carácter de gas hace más problemático su manejo. En algunos casos junto con el oxidante se emplea un catalizador, que aumenta el rendimiento del proceso de oxidación.

Por otra parte, la oxidación puede crear el suficiente calor como para hacer hervir el agua subterránea, lo que favorece la movilidad de los contaminantes que no resulten oxidados. En resumen, se trata de una técnica muy adecuada para actuar frente a determinados contaminantes, sobre todo cuando se encuentran a profundidades considerables, a las que otros métodos no pueden llegar.

Ocasionalmente en vez de oxidar es necesario reducir: caso del Cr^{6+} , altamente tóxico, que se reduce mediante sulfitos a Cr^{3+} , inocuo.

10.3.2.8. ELECTRODESCONTAMINACIÓN

Consiste en la movilización de los contaminantes bajo la acción de campos eléctricos. Se basa en la introducción a suficiente profundidad de electrodos en el suelo y la aplicación de una diferencia de potencial. Esto produce un flujo de los contaminantes en medio acuoso siguiendo las líneas del campo eléctrico. En determinados casos puede ser necesario añadir una fase acuosa que permita o facilite el proceso.

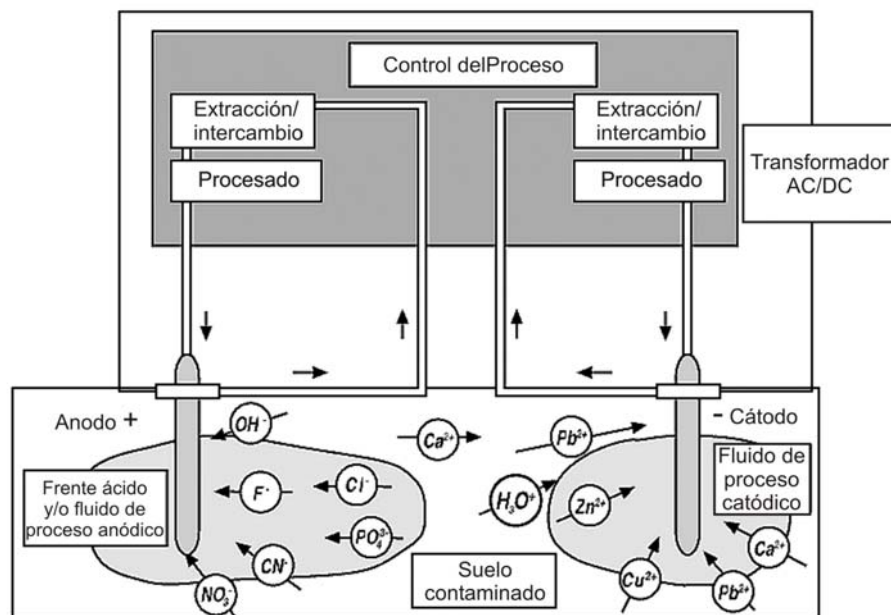


Figura 24.- Esquema del proceso de electrodescontaminación.

Los mecanismos concretos por los que se produce la movilización de los contaminantes son los de migración, electro osmosis y electroforesis.

10.3.2.8.1. LA MIGRACIÓN

Es una movilización de los contaminantes en forma iónica a favor del campo eléctrico. Representa el movimiento de las partículas en disolución en el agua intergranular del suelo o subsuelo, sobre la base de su comportamiento iónico.

10.3.2.8.2. ELECTRO OSMOSIS

Representa el movimiento del líquido en relación a las superficies sólidas del campo eléctrico: se produce una movilización en masa del líquido, como

consecuencia de la interacción con las paredes de los poros. Esto se produce debido a que en las superficies no equilibradas de las partículas del suelo predominan las cargas negativas, y atraen al líquido hacia el cátodo, que se comporta como un gran catión

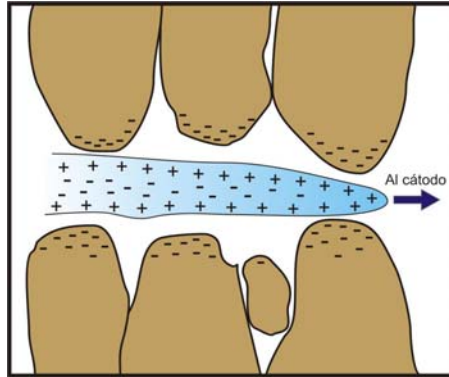


Figura 25 .- Transporte de un fluido a través de los poros de una roca mediante electro ósmosis.

10.3.2.8.2. ELECTROFORESIS

Corresponde al desplazamiento de partículas coloidales cargadas en suspensión en un líquido. Tiene una importancia muy inferior a la de los dos fenómenos anteriores.

El conjunto de estos mecanismos provoca el desplazamiento de los contaminantes bajo la acción del campo eléctrico. Los cationes van hacia el cátodo mientras que los aniones lo hacen hacia el ánodo, y ambos son extraídos posteriormente. El

procedimiento tiene la ventaja de que apenas si resulta influenciado por la textura o la permeabilidad del suelo, factores limitantes de otras técnicas.

La técnica resulta de aplicación, con buenos resultados, en el caso de suelos con altos contenidos en metales pesados (Cu, Zn, Pb., As), así como en el caso de la contaminación por compuestos orgánicos.

10.3.2.9. FRACTURACIÓN

Se emplea a menudo en combinación con otras de las técnicas descritas, ya que se trata de un procedimiento por el cual se induce una fracturación en suelos o terrenos en general muy compactos, de forma que las técnicas que se basan en la movilización de los contaminantes pueden actuar mejor. Se basa en dos posibilidades: fracturación hidráulica y fracturación neumática.

10.3.2.9.1. FRACTURACIÓN HIDRÁULICA

Utiliza agua, que es bombeada a presión a través de pozos. La fuerza del agua favorece la fracturación del material que compone el terreno en cuestión, así como la apertura de las fracturas ya existentes. Para fracturar suelos a profundidades considerables se añade arena al agua, que favorece la fracturación y que las fracturas permanezcan abiertas.

10.3.2.9.2. FRACTURACIÓN NEUMÁTICA

Utiliza aire a presión para fracturar la roca , y a menudo también favorece la movilización de los contaminantes.

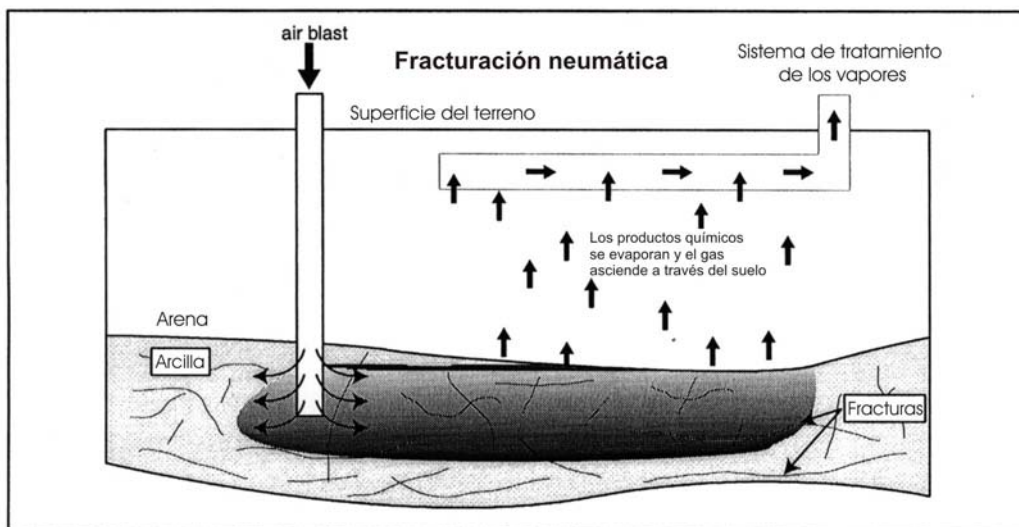


Figura 26.- Esquema de un sistema de fracturación neumática, basado en el empleo de aire a presión, para ayudar a la movilización de los contaminantes del suelo.

En algunos casos se puede llegar a plantear la utilización de explosivos.

En definitiva, es una técnica auxiliar, que en unos casos ayuda a introducir los reactivos requeridos para el tratamiento descontaminante, y en otros favorece la migración de los productos del proceso hacia los pozos de extracción, y en general, favorece la liberación de los contaminantes contenidos en el terreno, y su migración a través del mismo.

10.4. TRATAMIENTOS EX SITU

Estas técnicas tienen en común que el suelo es removido de su lugar original, y tratado en una planta externa, para la eliminación del contaminante mediante una variedad de técnicas disponibles. Tras el tratamiento, el suelo puede ser devuelto a su lugar original, siempre y cuando se verifique que está completamente descontaminado.

En este apartado se reconocen las siguientes técnicas:

10.4.1. TÉCNICAS DE TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS EX SITU

10.4.1.1. BIOFILTRACIÓN

El proceso de biofiltración se basa en la entrada de aire contaminado a birreactores en los cuales la flora microbiana convierte los contaminantes orgánicos volátiles en dióxido de carbono, agua y biomasa. Puesto que los microorganismos desarrollan su actividad en medio líquido, la biodegradación debe tener lugar en fase acuosa; también se puede decir que es el proceso en el cual se extrae una fracción de suelo contaminado y se le agrega materia orgánica como hojarasca, residuos de coco o caña, con lo que el suelo se convierte en poroso, aporta nutrientes y en ocasiones microflora. Esta técnica es muy económica y de posible aplicación.



Figura 27. biofiltro piloto para remover VOCs ICP 1998.

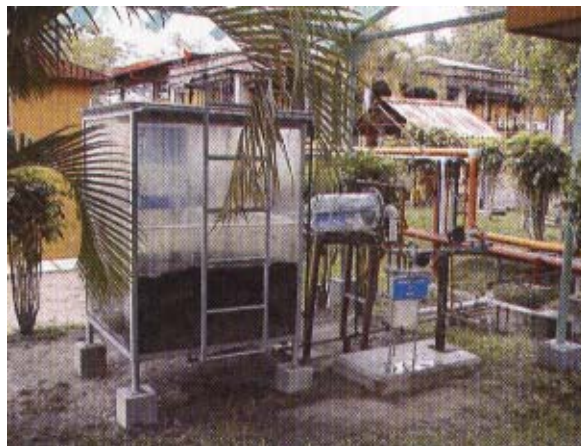


figura 28. biofiltro piloto para remover H₂S. ICP 2000.

10.4.1.2. COMPOSTAJE

En el proceso de Compostaje se extrae una fracción de suelo contaminado y se le agrega materia orgánica como hojarasca, residuos de coco o caña, con lo que el suelo se convierte en poroso, aporta nutrientes y en ocasiones microflora. Esta técnica es muy económica y de posible aplicación en todo el mundo.

10.4.2. TÉCNICAS DE TRATAMIENTOS FISICO-QUIMICOS EX SITU

10.4.2.1. Desorción térmica:

Basada en el calentamiento del suelo en una “unidad de desorción”.

10.4.2.2. Lavado del suelo:

Basado en el empleo de detergentes y en la separación granulométrica de las fracciones más finas (siempre más contaminadas, por la mayor capacidad de sorción de las arcillas) de las más gruesas: arena, siempre más limpia, y más fácil de limpiar.

10.4.2.3. Extracción con solventes:

Basada en el empleo de productos disolventes, que son muy efectivos en determinados contaminantes.

10.4.2.4. Dehalogenación química:

Consiste en la eliminación de halógenos del suelo, mediante reactivos específicos. Al ser tratamientos puramente químicos, no se va a ampliar en su estudio y descripción.

Finalmente, cuando no hay otra alternativa, el suelo se excava y se lleva a un almacenamiento de residuos tóxicos y peligrosos para su disposición final ⁽³¹⁾



Figura 29.- Excavación de suelo contaminado mediante pala retroexcavadora.

11. RESTRICCIONES Y CONSIDERACIONES DE LA BIORREMEDIACIÓN

11.1. RESTRICCIONES

Las restricciones y consideraciones prácticas a la hora de desarrollar un plan de descontaminación incluyen.

11.1.1. RESTRICCIONES DE TIEMPO

El tiempo que puede dedicarse a la recuperación frecuentemente es uno de los elementos a considerar cuando se eligen los procesos de tratamiento. En general, la biodegradación *in situ* puede ser un proceso bastante rápido, cuando se compara con otros que requieren mayores infraestructuras. Sin embargo, existen importantes diferencias de tiempo para las distintas metodologías de biodegradación. El uso de microorganismos seleccionados (o reciclados) puede acelerar los procesos, pasando de desarrollarse en meses a hacerlo en unas pocas semanas. No obstante es posible que además existan diferentes tratamientos más rápidos para algunos agentes xenobióticos⁽⁴⁾.

11.1.2. RESTRICCIONES DE COSTO

Las inversiones realizadas por las comunidades mundiales para la biodegradación llegaron a 10 mil millones de dólares en el año 2000 y a 30 mil millones se estiman durante la próxima década del 2000. Esto supone la realización de procesos de limpieza mediante una mezcla de métodos físicos, químicos y biológicos. Actualmente, los métodos biológicos se emplean en un 15-20 por ciento de los casos. El Biotratamiento requiere menos energía, y es el único método que puede lograr la mineralización de los materiales residuales en productos inocuos. Sin embargo, el Biotratamiento necesita mas tiempo, y no siempre alcanza el nivel de limpieza requerido por la normatividad legal. Esto lleva a la necesidad de un tratamiento adicional y por lo tanto se elevan los costos. No obstante, el Biotratamiento también genera un volumen importante de residuos útiles, lo que reduce de forma significativa el costo de tratamiento residual. ⁽⁴⁾

11.1.3. RESTRICCIONES DEL LUGAR

La composición física del lugar donde se encuentran los materiales peligrosos, repercute de una forma importante sobre la capacidad de los microorganismos para llevar a cabo la biorremediación. La localización de la zona contaminada afecta las perspectivas dela biorremediación en función de la temperatura, pH y la

humedad. En cuanto a la temperatura, incluso las variaciones climatológicas afectan la capacidad degradadora de los microbios. La temperatura no solo afecta la velocidad de la actividad enzimática, sino también a la biodisponibilidad, el transporte en las membranas celulares, etc. La acidez o alcalinidad del medio también influye sobre la biorremediación, afectando, por ejemplo al crecimiento de los microorganismos y ala especie celular de xenobióticos presentes. Quizás lo más importante sea la disponibilidad de una humedad óptima, puesto que para la actividad biológica es imprescindible contar con un contenido de agua en el medio.

En muchos casos los microorganismos autóctonos pueden degradar el material contaminante si se suministra los nutrientes, la humedad y los receptores de electrones adecuados. Los nutrientes implicados son el nitrógeno, carbono, fósforo, y sales minerales. Normalmente se añade oxígeno como receptor de electrones, aunque en ocasiones se añade nitrito o peróxido de hidrógeno en lugar de oxígeno. Además pueden existir casos en los que se desee una degradación anoxigénica añadiéndose los nutrientes sin la adición de oxígeno. ⁽⁴⁾

11.2. CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN LA BIORREMEDIACIÓN

Existen varios factores que deben considerarse cuando se desarrolla una propuesta para el uso de la biorremediación. De una importancia inmediata es la presencia o ausencia de población microbiana en el lugar, capaz de degradar el residuo peligroso. Aunque existen algunos materiales residuales que resisten la

degradación microbiana, en general se puede obtener organismos capaces de atacar a la mayoría de los residuos. Puede ser necesario potenciar a los microorganismos en términos de densidad celular o actividad metabólica. Es posible que sea preciso un tiempo o esfuerzo (gasto) para desarrollar cepas adaptadas a un lugar en particular, el lugar puede requerir una serie de modificaciones para maximizar el potencial degradativo de los microorganismos; y los costos asociados a estos procesos pueden superar los disponibles para el proyecto. Otra consideración a tener en cuenta es la necesidad de un cosustrato u otra sustancia inductora para mejorar el metabolismo de un residuo específico. Si se trata de una sustancia demasiado costosa o tóxica, quizás no sea factible utilizarla, especialmente si las metodologías propuestas son el tratamiento *in situ*.

(4)

11.2.1 CONSIDERACIONES A ESCALA

Los pasos necesarios para la implantación de un programa de biorremediación, comienzan por las determinaciones de factibilidad (es decir, ¿se puede hacer?), y finalizan con las cuestiones de ingeniería y economía (es decir, ¿cómo puede diseñarse a la escala necesaria en un lugar concreto con un costo razonable?); este procedimiento implica un examen detallado del lugar, una estimación de la cantidad y del tipo de material que se va a degradar, una demostración a gran escala y un análisis del costo del proceso, una consideración de las cuestiones reglamentarias (es decir, ¿se permitirá el uso de microorganismos modificados y/o

naturales?, ¿cuáles son los límites reglamentarios impuestos por las autoridades competentes para los productos primarios y finales?). Una estimación del tiempo necesario para completar el proceso de remediación, y una evaluación de los restantes procedimientos que puedan combinarse con el biotratamiento para acelerar la limpieza y rebajar los costos. El llevar a cabo un examen detallado de todos los anteriores factores se considera esencial si se desea conseguir el éxito total de un proyecto de biorremediación. Por lo general, el uso de tratamientos biológicos permite llevar a cabo un proceso de tratamiento rentable que puede hacer descender el nivel de materiales tóxicos por debajo de los niveles máximos legales. Aunque, ocasionalmente, el proceso puede emplear más tiempo que los procesos abióticos, como, por ejemplo, la incineración, en general consigue una mineralización completa, con lo que disminuyen las posibilidades de exposición de las poblaciones humanas a los residuos posiblemente tóxicos o cancerígenos ⁽⁴⁾.

12. ALGUNOS TRABAJOS REALIZADOS EN EL CAMPO DE LA BIORREMEDIACION

12.1. las Penínsulas de Alaska y de Kenai

Exxon Valdez, Alaska - Mar.1989 (Sobre la costa de las Penínsulas de Alaska y de Kenai, en el Golfo de Alaska) (Prince Williams Sound)

Técnica utilizada: Aplicación de nutrientes a 110 millas de playa contaminada.

¿Cuáles fueron los pasos seguidos en el proceso de biorremediación?

En primer lugar, se realizó un estudio para determinar si la adición de nutrientes era una tecnología apropiada para este vertido y esta zona. Se aplicaron nutrientes a 110 millas de playa. Se realizaron además estudios adicionales de EPA (Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/>) para evaluar las técnicas de aplicación de nutrientes. Se decidió poner en marcha un programa de larga duración para monitorizar las playas tratadas.

Se evaluó el potencial de la utilización de microorganismos a esas playas para favorecer la biodegradación

¿Cuáles fueron los resultados?

Se incrementó la velocidad de biodegradación entre 2 y 4 veces mediante la aplicación de nutrientes

Los procesos mediante los cuales funciona la biorremediación se pueden dividir en 3 grupos:

Degradación enzimática, remediación microbiana y fitorremediación.⁽²⁵⁾



Figura 30. Labores de limpieza en las Penínsulas de Alaska y de Kenai

12.2. "PROYECTO DOÑANA 2005"

El 24 de Abril de 1998, un dique de contención -hoy tristemente célebre- de una balsa de almacenamiento de aguas residuales en la mina de piritas de Aznalcóllar (Sevilla), cedió ante el peso de 5 millones de metros cúbicos de agua ácida. Grandes cantidades de zinc, arsénico, plomo, cobre y otros metales pesados se extendieron por la zona, afectando directamente a 4.500 hectáreas de tierras húmedas y de cultivo a lo largo del Río Guadiamar. El accidente de Boliden fue el mayor vertido de metales pesados en Europa desde la Segunda Guerra Mundial, pero no el único. Solamente en Europa, existen actualmente 4 millones de hectáreas contaminadas por metales pesados, una extensión comparable a la superficie de Suiza.⁽¹⁷⁾ El Ministerio de Medio Ambiente Español presentó en

pocas semanas el "Proyecto Doñana 2005" que consistía en un conjunto de actuaciones en los diferentes arroyos y ríos afluentes al Parque Nacional de Doñana y la Junta de Andalucía quiso recuperar el río Guadiamar hacía un Corredor Verde. A ambos proyectos iniciales, todas las asociaciones conservacionistas hicieron una larga lista de críticas y sugerencias. Sin embargo, lo importante y enormemente positivo en ambos proyectos ha sido la decisión de recuperar la zona con perspectivas a largo plazo y reducir los efectos ambientales y socioeconómicos negativos en la zona. En el caso del río Guadiamar, el Corredor Verde supone la única vía de restauración que reduce la contaminación en el suelo sin poner en peligro la imagen de credibilidad de la producción agrícola andaluza y del destino turístico Doñana. El Corredor Verde se ha concebido pronto como un proyecto en continuo proceso de evolución, dependiendo de los resultados de las diferentes fases que se estaban ejecutando en la zona afectada. La limpieza de los lodos, no siempre se ha realizado de una forma coordinada entre el Ministerio de Medio Ambiente, la Junta de Andalucía y la empresa Boliden. Tampoco esta última ha seguido las técnicas establecidas o ha cumplido con el grado de limpieza acordado para la posterior restauración. La descoordinación ha hipotecado sobremanera al Corredor Verde donde aún está limpiando la Consejería de Medio Ambiente algunas zonas en Entremuros. Por tanto, requiere la utilización de trampas acuáticas y fitorremediación para la lenta extracción de los metales pesados del suelo.⁽²²⁾

La fitorremediación, metodología de la que se valen plantas y árboles para remover o neutralizar contaminantes, puede constituir una técnica promisorio para el tratamiento de suelos, aguas subterráneas y residuales contaminadas por metales pesados, compuestos xenobióticos orgánicos y radionuclidos. Algunas de las especies vegetales sobre las que se realizaron experiencias son: tabaco, pastos, alfalfa, maíz, sorgo y soja. Esta es una tecnología emergente con un mercado en expansión en EE.UU. y Europa. ⁽²⁴⁾

La ministra de Medio Ambiente Española, Elvira Rodríguez, hizo balance de la situación en la que se encuentra el Parque Nacional de las Islas Atlánticas de Galicia un año después de la catástrofe. Rodríguez subrayó que "tras el enorme trabajo" realizado, las Islas Atlánticas están "prácticamente" limpias, los ecosistemas se están recuperando y las playas y los fondos ofrecen un estado "óptimo". Consecuencia de todo ello, explicó, es la llegada de aves migratorias al Parque, "un buen síntoma de la recuperación ecológica de este espacio". Según los expertos, está previsto que el Parque acoja más de 40.000 parejas de aves como el arao, alcatraz atlántico, pardelas, colimbos o charranes. Otro de los indicadores de la recuperación de la zona es la afluencia de visitantes durante la primavera y el verano. Desde que se abrió al público en Semana Santa y hasta finales de septiembre ha recibido 170.841 visitantes, de los cuales 90.000 acudieron en agosto.⁽¹⁴⁾

12.3. MINA DE URANIO Y COBRE DE AUSTRALIA.

El primer uso de vegetación en la remediación en minas de Uranio, ha sido en procesos de confinamiento, estabilización de suelos para evitar su erosión, y revegetación de toda el área como inicio de un nuevo ecosistema estable. Posteriormente se introdujo el concepto más específico de fitorremediación como tratamiento de remediación de un área contaminada. se aplicó en *Rum Jungle*, mina de uranio y cobre ubicada en el norte tropical de Australia, cuya operación cesó en 1971 En Badajoz, España, en la mina de U *La Haba*, cuyo decomisionado estaba programado para 1994 Un ejemplo más complejo de multiestratificado es el propuesto para cubrir las colas apiladas en la planta de molienda de U de *Andújar*, en Andalucía, España.

12.4. DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS CON PETRÓLEO CRUDO MEDIANTE MICROORGANISMOS AUTÓCTONOS Y PASTO ALEMÁN [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.]

Los agroecosistemas localizados en algunas áreas petroleras en el Estado de Tabasco están contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo en capas y horizontes del suelo (Rivera-Cruz *et al.*, 2002 a), provenientes de derrames y lixiviados de lodos de perforación. La superficie de suelo contaminado con petróleo en el Estado de Tabasco fue 1904 ha de 1993 a 2002 [Procuraduría Federal para la Protección del Ambiente (PROFEPA), 2002]. El petróleo en el

suelo causa problemas ecotoxicológicos; los daños para las plantas y los microorganismos se originan por el potencial tóxico, carcinogénico y mutagénico de los hidrocarburos el objetivo es que el suelo recupere su condición natural y la capacidad de uso que tenía antes del derrame Los resultados experimental desde con diferentes pastos, han sido satisfactorios en la restauración de suelos contaminados con petróleo. Los pastos son aptos para restaurar suelos porque producen una densa red de raicillas que llegan hasta 2.7 m de profundidad en el suelo, y estimulan el crecimiento poblacional de los microorganismos por la acumulación de compuestos orgánicos exudados ricos en carbono y nitrógeno que son utilizados como fuente energética Los Gleysoles del Estado de Tabasco tienen petróleo acumulado, pero mantienen praderas con pasto *alemán* [(*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.] utilizado para bovinos y también pasto silvestre *cabezón* (*Paspalum virgatum* L.) sin uso forrajero pero con importancia

(23)

12.5. UTILIZACIÓN DE PLANTAS NO ACUMULADORAS PARA FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

La planta de altramuz fue la escogida como modelo del estudio realizado. Se estudió su capacidad de absorción de As y Cd y su distribución en la planta; y los principales mecanismos de tolerancia:

Gran resistencia de la planta a As y Cd (acumulación en raíz). Práctica ausencia de síntomas visuales. Identificación de las fitoquelatinas (PCs) inducidas por As y Cd. Son los principales complejantes de As y Cd tras la pared celular Indicadores muy sensibles del estrés causado por As y Cd. ⁽¹⁹⁾

El altramuz en la descontaminación de suelos contaminados por el vertido de Aznalcóllar:

Alcanza un 50% de biomasa óptima en condiciones agronómicas.

Alta acumulación de Mn, Zn y Ni; y menor de As, Cd, Cu y Pb. El cultivo induce un descenso significativo en la disponibilidad de los metales. Esto sugiere su aplicación en fitoestabilización.

12.6. Fitorremediación de aguas contaminadas Premio Argentino Junior del Agua AIDIS-WEF 2003

Primer premio.

El objetivo general del trabajo fue la búsqueda de soluciones que permitieran la depuración de metales pesados de las aguas mediante fitorremediación: como contaminante testigo se seleccionó el cinc, ya que es el que se encuentra en mayor proporción en las pilas de uso doméstico, y la planta *Salvinia* sp, para comprobar su capacidad de absorber el cinc disuelto en agua, y el mecanismo por medio del cual podría hacerlo. Se detalla la taxonomía y morfología de la planta, el

cuidado y preparación en el laboratorio, experiencias con azul de metileno y con cinc y los bioensayos realizados para determinar la toxicidad del cinc y el nivel de la fitorremediación⁽⁸⁾

12.7 LA LENTEJA DE AGUA (*Lemna minor* L.): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORIA

Además, con base en los estudios de remoción de compuestos tóxicos por plantas acuáticas, se pueden considerar estos sistemas de tratamiento como una alternativa ecológica y económicamente viable, tanto para el tratamiento de los efluentes municipales domésticos como industriales. En la fábrica de Imusa S.A., localizada en el municipio de Rionegro (Antioquia), se tienen operando desde 1988 unos canales sembrados con *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua); se ha comprobado una eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes que alcanza más de 97% en los metales pesados y hasta el 98% en sólidos suspendidos ⁽¹³⁾

12.7. EL MERCURIO DE VALPARAÍSO

Se formó un equipo multidisciplinario de investigadores de la Universidad Católica de Valparaíso y de la Empresa Nacional Minera (Enami), cuya tarea principal es evaluar alternativas para el biomejoramiento de suelos contaminados con metales

pesados y generar las bases metodológicas para la recuperación de las áreas afectadas, que podrán aplicarse en otros casos similares, contribuyendo a la solución de un problema ambiental de interés regional y nacional, para cuya ejecución se contará con el apoyo de profesionales que poseen experiencia y conocimientos ganados en la participación de proyectos Fondef.⁽¹⁶⁾

12.8. PLANTAS Y MICROORGANISMOS QUE SE ALIMENTAN DE...¡PETRÓLEO!

Desde hace años Petróleos Mexicanos (Pemex) lleva a efecto acciones que le permiten cumplir con las normas ambientales. De esta forma, trabaja muy de cerca con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), que como su brazo tecnológico experimenta con métodos o técnicas que den solución a los problemas de contaminación por hidrocarburos. La entidad del IMP responsable de efectuarlo es la subdirección de Protección Ambiental, que desde su creación ha conjuntado un equipo de científicos que sugieren y experimentan con las técnicas más avanzadas a nivel mundial. Actualmente, trabaja con métodos de biorremediación que de tener los resultados esperados serán implementados en las zonas en que haya problemas de suelos contaminados.⁽²¹⁾

12.9 DINÁMICA POBLACIONAL Y MANEJO DE MANGLARES COMO FITORREMEDIADORES EN EL GOLFO MÉXICO

Los manglares del Golfo de México tema del presente estudio ocupan los márgenes de las lagunas costeras de la cuenca baja de la desembocadura del Río Pánuco, así como de los esteros , lagunas interdunales y marismas aledañas, constituyendo un manglar intermedio entre los del sur y del norte, que influyen directamente en gran parte del comercio pesquero de la zona conturbada de Tampico, así como en la situación económica de los pescadores ya que la madera del mangle se utiliza para construir habitaciones, cimbras, cercos, arte de pesca, muelles y leña. Además, los manglares son el hábitat natural de fauna acuática con un papel importante como fitorremediador de contaminantes presentes en el agua. ⁽¹¹⁾

12.10. MANEJO DE *Eichhornia crassipes* EN UN SISTEMA LENTICO EUTROFICADO CASO CIENAGA MIRAMAR BARRANCABERMEJA

Mediante un experimento se determinó la capacidad de retención de fósforo y nitrógeno de la *E crassipes*. Se realizaron pruebas y ensayos para conocer el aprovechamiento que se le puede dar a la biomasa de *E crassipes* cosechada de la Ciénaga Miramar al igual que su capacidad para evapotranspirar agua y la

capacidad de retener sólidos suspendidos, paralelamente se realizaron ensayos de biodegradación de la biomasa de *E crassipes* mediante técnicas de compostación, del cual se obtuvo un compostaje estable, que fue suministrado como alimento a un pool de lombrices *Roja californiana (Eisenia fetida)* para llevar a cabo una segunda descomposición y así obtener un sustrato rico en elementos húmicos y aprovechable como fertilizante natural. Se realizaron pruebas de los sustratos obtenidos, compostaje y humus en plantas comestibles y de rápido desarrollo. ⁽¹¹⁾

12.11. IDENTIFICACIÓN DE ACTIVIDADES CONTAMINANTES Y ESTIMATIVO DEL PAGO DE TASAS RETRIBUTIVAS EN LOS MUNICIPIOS QUE SE LOCALIZAN EN EL TRAMO DEL RÍO FONCE ENTRE CHARALÁ Y SAN GIL 1 .

Es importante para la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) implementar, bajo los principios de la Ley Colombiana, el cobro de la tasa retributiva. En los actuales momentos, la contaminación ambiental, especialmente de ríos, lagunas, quebradas y fuentes de agua en general, es ocasionada por el transporte y depósito lecho de grandes cantidades de basura y sustancias que afectan al ser humano. Una forma de contrarrestar esta acción del hombre, se constituye en la aplicación de la ley por parte de la Autoridad Ambiental, de tal modo, que sirva para remediar o mitigar la contaminación del agua. El cobro de la tasa va dirigido a las personas que utilizan el agua, la atmósfera y el suelo como cuerpos receptores de los contaminantes. Los recursos económicos recaudados,

deberán ser invertidos en programas de descontaminación, monitoreo, seguimiento, verificación y capacitación ambiental a los usuarios. ⁽¹¹⁾

12.12. BIODEGRADACIÓN DE DOS HERBICIDAS COMERCIALES (Gramoxone y Matancha) POR MEDIO DE LA BACTERIA *Pseudomonas putida*.

En el siguiente trabajo de investigación se buscó analizar la biodegradación De dos herbicidas comerciales (Gramoxone y Matancha) por medio de la bacteria *Pseudomonas putida*. Para lograrlo se realizó la identificación de la bacteria suministrada por CINBIN (centro de investigación biotecnológica), por medio de la morfología microscópica y sus reacciones bioquímicas. Una vez identificada como *Pseudomonas putida* la bacteria se sometió al proceso de adaptación a concentraciones crecientes del herbicida comercial respectivo. El estudio de la cinética de crecimiento de la bacteria se realizó en un bioreactor con aireación y agitación continuas, en condiciones estériles, durante 24 horas tomando la muestra cada 2 horas. Se sembraron 2×10^6 microorganismos midiendo su crecimiento en el medio modificado de Gramoxone y Matancha cada uno con su respectivo control. El crecimiento de la bacteria en el medio de Matancha logró mayor número de microorganismos que en el medio con Gramoxone. Los experimentos de biodegradación se desarrollaron aplicando la matriz del diseño factorial 2^3 en el cual se varió la concentración del herbicida, el nutriente y la

presencia o ausencia de carbón activo, sembrando 2×10^6 microorganismos en cada caso, en condiciones estériles. El estudio se realizó durante tres días por duplicado, en un bioreactor con controles de pH, temperatura, agitación y aireación, determinando el residual del respectivo herbicida. La determinación de porcentaje de biodegradación se realizó con base al residual de herbicida, analizando el Gramoxone por UV/Visible a 257 nm. y Matancha por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Matancha 54,5 ppm/25% nutriente presentó 68,72% de biodegradación y el medio modificado con Gramoxone 69,76 ppm/25% nutriente un 47.29%. La variable crítica para la remoción de los dos herbicidas resultó ser el carbón activado con una retención hasta de 99,9% para Matancha y 98.42 para Gramoxone y con un buen crecimiento de los microorganismos en el medio. La interacción de la concentración inicial de herbicida y porcentaje de nutriente en el medio, fue muy importante para la remoción y los mejores resultados se obtuvieron para Gramoxone 69,76ppm/25% nutriente y Matancha 54,5ppm/25% nutriente. La aplicación del ensayo a las aguas residuales tomadas en la Planta de Tratamiento Río Frío (CDMB) confirmó una buena biodegradación de los dos herbicidas. El control de proceso de biodegradación se realizó en las mismas condiciones del ensayo analizando la posibilidad de adsorción del herbicida por las células muertas del microorganismo y el desarrollo de la bacteria en medio con herbicida sin nutriente. ⁽¹¹⁾

12.13. REDUCCIÓN DE OLORES EN SEDIMENTADORES DE UN REACTOR ANAERÓBICO UASB CON UN BIOFILTRO DE COMPOST

La utilización de biofiltros de compost para el tratamiento de aire contaminado con compuestos reducidos de azufre ha sido reportada y aplicada exitosamente con alta eficiencia de remoción en los últimos años. Se desarrolló una aplicación de un biofiltro para controlar los olores de sulfuros de hidrógeno provenientes de los sedimentadores de un reactor anaeróbico UASB. La aplicación se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales Río Frío de la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) en el área metropolitana de Bucaramanga, Colombia. El biofiltro utiliza un lecho de 1 m^3 de compost vegetal dentro de un reactor cilíndrico para el tratamiento de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ de gas con $830 \text{ mg}/\text{m}^3$ (600 ppm) de H_2S . Este biofiltro trata los gases de los sedimentadores de medio reactor. Los aportes originales de este diseño van desde su modularidad que facilita el mantenimiento, hasta la alta eficiencia lograda por sus dos lechos en serie. Adicionalmente el sistema novedoso de soporte del compost evita la compactación, aumenta la eficiencia, disminuye el mantenimiento y alarga la duración del biofiltro. El arranque mediante la bioaugmentación con cepas seleccionadas para remoción de sulfuros, permite un corto tiempo de adaptación y estabilización del biofiltro. El sistema de humidificación continua por aspersión y

reciclo permite mantener la humedad del biofiltro a las condiciones requeridas y la inoculación con microorganismos de manera eficiente. ⁽¹¹⁾

12.14. REMOCIÓN DE Fe Y Mn PROVENIENTES DE DRENAJES ACIDOS DE MINAS DE CARBÓN MEDIANTE ALGAS MARINAS PARDAS *SARGASSUM S.P.*

En este trabajo de investigación se ha estudiado el uso del alga marina *Sargassum s.p.* recolectada en el litoral Atlántico colombiano como biosorbente de Fe y Mn presentes en el Drenaje Ácido de Minas de carbón. Variables como el pH de la solución, tamaño de partícula del alga y velocidad de agitación se estudiaron en búsqueda de las condiciones más adecuadas para una máxima biosorción de los metales. Se obtuvo una remoción de Fe del 96.5% y de Mn del 98% para una concentración inicial de 100 ppm de disolución sintética metálica bajo las siguientes condiciones: pH 3.2, tamaño de partícula tamiz # 8 (d=2.36 - 3.35 mm) y velocidad de agitación 0.83 Hz para ambos metales. ⁽¹¹⁾

12.15 ORCIÓN DE Cr(III) PRESENTE EN EFLUENTES DE CURTIEMBRES MEDIANTE EL ALGA MARINA *SARGASSUM sp.*

La industria del curtido de cueros genera entre otros efluentes líquidos con altos contenidos de materia orgánica, sulfuros y cromo trivalente. Este cromo trivalente no es de gran toxicidad, pero bajo ciertas condiciones del medio se oxida,

transformándose en cromo hexavalente, elemento de alta toxicidad. Los efluentes de la industria del cuero alcanzan concentraciones de cromo trivalente hasta de 450 ppm, superando las disposiciones de la Organización Mundial de la Salud para aguas de consumo, que especifica un máximo de 1 ppm.

Los métodos convencionales para la recuperación del cromo, de aguas residuales industriales, van desde la precipitación química, oxidación o reducción, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana hasta la recuperación por evaporación; sin embargo estos procesos pueden llegar a ser ineficaces, especialmente en la disposición y almacenamiento de sus desechos.

El uso de algas para la remoción de metales, ha resultado ser un método eficaz. Existe una variedad de algas con capacidad de remover cromo, dentro de las cuales el alga marina *Sargassum* sp, se destaca por sus propiedades para sorber no solamente cromo, sino otros metales pesados ⁽¹¹⁾

13. CONCLUSIONES

- Para llevar a cabo una adecuada selección de la técnica de remediación, hay que establecer en primer lugar el diagnóstico preciso del tipo de contaminante, dimensión de la contaminación y futuro uso del lugar contaminado, además sería conveniente establecer un diagnóstico sobre la posible incidencia de la contaminación en el agua subterránea
- La evaluación de las alternativas, debe hacerse con base en una serie de criterios:
 - Proteger la salud y el medio ambiente.
 - Cumplir con la legislación.
 - De fácil operación
 - Costo reducido
 - Que constituya una solución permanente.
 - Disponibilidad de la técnica seleccionada.
 - Experiencia en el tipo de proyecto a realizar.
 - Ventajas y desventajas de las diferentes alternativas.
 - Los microorganismos y características del suelo.
 - La naturaleza y concentración de los contaminantes
 - La dinámica de los contaminantes en el suelo.

-La actividad biológica del suelo y los procesos de transformación de los contaminantes

- Como conclusión sería poder integrar el conocimiento de las vías degradativas y su regulación para obtener cepas degradadoras mucho mas eficientes que las que podamos encontrar autóctonamente. Y por que no también modificar estas cepas para que tengan buenos mecanismos de quimiotaxis específicos y productoras de biosurfactantes para aumentar la biodisponibilidad. Así se podrían utilizar cepas específicas para cada vertido o contaminante disminuyendo en mucho tiempo la degradación natural.
- La falta de implementación de buenas prácticas en diferentes procesos industriales ha desembocado en la contaminación de suelos y aguas con metales como cadmio, cobre, plomo y zinc. Algunas de las industrias relacionadas con el empleo de estas sustancias son la de producción primaria de metales, aleaciones, galvanoplastia, electroplatinado, soldadura, producción de equipos, baterías, electrodos y celdas fotoeléctricas. En menor grado, las relacionadas con combustibles, aceites lubricantes, pinturas, pigmentos y aditivos.

- A medida que aumenta en todo el mundo el número de áreas contaminadas tiene más importancia identificar cuáles son las plantas que mejor se adaptan a cada contaminante la biorremediación constituye una alternativa real y que puede ser desarrollada al menos en sus etapas iniciales y con buenos resultados, en diversas dependencias de investigación. Sin embargo, no es la panacea para la solución permanente de los problemas ambientales aquí señalados. Para ello, se necesita la participación responsable no solo de las dependencias gubernamentales y no gubernamentales, sino de un nuevo concepto en nuestra formación cultural, el de una cultura de protección y prevención ambiental en donde el cuidado de las condiciones ambientales sea no solo una necesidad sino una responsabilidad. Finalmente, es menester mencionar que este tipo de tecnología es, por sus características y alcances, mucho mas económica y de un uso mas simplificado, comparada con el desarrollo y aplicación de otras existentes.
- La contaminación de los suelos por la presencia de agentes tóxicos como hidrocarburos, plaguicidas y otras sustancias constituye un problema ambiental de primer orden. El panorama actual no es tan desalentador ya que se cuenta con novedosas técnicas para la recuperación de suelos degradados por contaminación química. El uso de los microorganismos constituye una estrategia potencialmente viable. Hasta hace algunos años

las investigaciones se habían limitado a la identificación de aquellos microorganismos capaces de aislar compuestos tóxicos. Hoy día las investigaciones están dirigidas a incrementar la tasa de degradación de compuestos tóxicos, mejoramiento genético de microorganismos para que se adapten a ambientes extremos y desarrollo de diferentes técnicas biocorrectivas alternativas para la recuperación de suelos degradados.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. CARMEN CAMARA RICA, Universidad Complutense de Madrid, Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación, Departamento de Química Analítica, Facultad de ciencias exactas.
2. BOLETÍN DOCENTE, “El Cuaderno de Porque Biotecnología” de Argenbio. (Concejo Argentino Para la Información y el desarrollo de la Biotecnología)
3. CESAR GOMEZ, Gaceta # 310. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Laboratorio de Contaminación.
4. Cookson. John T. Biorremediation Engineering. Madrid. Mc Graw Hill. 1995 4.p
5. Ercoli Eduardo C. Et al 2º Simposio de Producción de Hidrocarburos. Instituto Argentino del Petroleo. Mendoza Argentina. Junio 1995 tomo1 487-496 p.
6. Eweis Juana B. Et al. Principios de Biorremediación. Mc Graw Hill. Madrid. 1999 12-13 p.
7. GARASSINI, L.. Microbiología Agraria. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 1987. P. 428-444. HAHN. W.J. et al. Biologycal Treatment of Petroleum oily Sludges. Society os Petroleum Engineers Inc. 1992. 519-528.p.
8. GARBISU, C. Amezaga, et al, 2002 Biorremediación y Ecología. Revista Ecosistemas 2002/2003 España año XI #3/2002 Septiembre-Diciembre.

9. GONZALEZ M. et al. 1990 Propiedades Físicas de los Suelos. Instituto Geográfica Agustín codazzi Subdirección Agrícola. Bogotá.
10. HALLAB. N. Surface Charge, Biofilm Composition and Cellular Morphology as Related to Cellular Adhesion to Biomaterials. 1995. 81-84.p.
11. HODGE. D. et al. Biofilter Treatment of Etanol Vapors. Enviromental Progress. Vol. 13 No. 3. August, 1994.
12. HOLMES. J. R. Biofilter Removal of VOCs and Toxics from Airborne Emisions: Desing Optimization. Research Nites. P.O. Box 2815, Sacramento CA 98512. No. 97-12 1997. P. 1-4
13. KNAPP. R. Et al. in Situ Microbial Filters. Bioremediation Technologies P 1-4 1997.
14. LELIE D. Et al. Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental # 61, 2002. España.
15. LESON. G. et al. Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Techology For VOC Emissions. Air & Waste Management Association. Vol. 41, No. 8 P. 1045-1054. 1991
16. Levin M. Et al. Biotratamiento de Residuos Tóxicos y Peligrosos. Mc Graw Hill 1997. 326-328 p.
17. Lora Federico d. Técnicas de Defensa del Medio Ambiente. Labor S.A. Madrid. 74 p MADIGAN. T. Michael. et al. Biología de los microorganismos. Prentice may. Octava Edición. 1999. 505-652.p.
18. M. CUSATO, R.P. fortosa, N. Bartoloni (Facultad de Agronomía de la Universidad de Los Andes) y L. Valiente y M. Puelles (CEQUIPE – INTI)

- 19.**MADIGAN, T Michael. Et al, Biología de los Microorganismos. Editorial Prentice may. Octava Edición, 1998. p. 5005-652.
- 20.**MORGENROTH. et al. Nutrient Limitation in a Compost Biofilter Degrading Hexane. Journal of the Air & Waste Management Association. Vol 46. April 1996. P. 300-308
- 21.**MUELLER, T. Química Inorgánica. Editorial reverté S.A. España. 1956 P 312
- 22.**NAGL. G. Controlling Emissions. Chemical Engineering. March 1997. 125-131.p.
- 23.**NAGY. G. The Odor Impact Model. Note-Book. Air & Waste Management Association. 1987. P. 132-136.
- 24.**OTTENGRAF. S. et al. Process Engineering aspects of Biological Waste gas Purification Departament of Chemical Engineering. Eindhoven University of Tecnology. P>O> Box 513,5600MB. The Netherlands. 1991.
- 25.**PARPATIYAR. Treatment of trichloroethylene (TCE) in Membrane Biofilter, Biotechnonology and Bioengineering, Vol. 50. P57-64. 1996
- 26.**PERIODICO EL MUNDO. Martes 18 de Noviembre de 2003
- 27.**REIJ. M. et al. Biofiltration of Air Containig Low Concentrations of Propene Using a Membrane Bioreactor. American Chemical Society and American Institute of Chemical Engineers. 1997 Vol 13 P. 380-386.
- 28.**SHAREEFDEEEN. Z. Et al. Biofiltration of Metanol Vapor. Biotechnology and Bioengineerig, Editorial John Wiley & Sons, Inc. Vol. 41 P 512-527. 1993

- 29.**SHARMA. V. Et al. Ferrate (VI) Oxidation of Hydrogen Sulfide.
Enviromental Science & Technology. Vol. 31. No. 9. 1997
- 30.**VII CONGRESO INTERAMERICANO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE y IV
SEMINARIO INTERNACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
SOSTENIBLE. MEMORIAS.
- 31.**Winker Michael A. Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho. Limusa
México 15 p.