



Degradación microbiana de compuestos xenobióticos

Yadira Peña García
yadira.pg94@hotmail.com
Facultad de Ciencias Biológicas, UAdeC

Resumen

Uno de los mayores problemas ambientales de nuestros días es la acumulación de compuestos recalcitrantes que ocasionan impactos negativos en los ecosistemas. La concentración de compuestos xenobióticos se ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas debido a los productos provenientes de diferentes procesos industriales. Los compuestos xenobióticos son causa de preocupación principalmente por sus efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos y por sus características bioacumulables y biomagnificantes, por ello se han buscado diferentes estrategias para disminuir estos efectos. La degradación de compuestos xenobióticos es una estrategia usada ampliamente, consiste en un proceso natural llevado a cabo por diversos microorganismos que emplean dichos compuestos como una forma de supervivencia. Las rutas metabólicas de estos microorganismos transforman los contaminantes por medio de sistemas específicos disminuyendo los efectos tóxicos y contaminantes en el ambiente.

1. Introducción

Los compuestos xenobióticos son químicos presentes en el ambiente a concentraciones no naturales. La palabra xenobiótico se deriva del griego y significa "foráneo a la vida". Estos compuestos no se producen naturalmente, y de ser así, sus concentraciones son mucho más bajas que las que produce el hombre. Estos productos, mayormente antropogénicos, son persistentes en el ambiente debido a su alta estabilidad termodinámica, además, son resistentes a la biodegradación, lo que se denomina recalcitrantes. Los compuestos xenobióticos pueden tener diversos efectos tóxicos en la salud humana,



entre los que se encuentran sus efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos (Agrawal y Shahi, 2015). Su presencia por causas antropogénicas se deben a su empleo de manera directa o indirecta a

través de procesos industriales o accidentes. Por ejemplo, los pesticidas, en especial aquellos en campos de cultivo, se depositan de manera directa y no intencional y en altas concentraciones (Jantunen, 2010). En los últimos años se ha manifestado un incremento en la contaminación ambiental debido a los desechos industriales. Una gran variedad de contaminantes dañinos se produce principalmente en industrias plásticas, químicas, farmacéuticas, textiles, agrícolas, petroquímicas, papeleras, entre otras (Tabla 1).

Industria	Compuesto	Concentración	Referencias
Textil	Colorantes	$> 1 \text{ g L}^{-1}$	Robinson <i>et al.</i> , 2004; Srinivasan y Viraraghavan, 2010
Farmacéutica	Antibióticos	$4.5 - 0.34 \mu\text{g L}^{-1}$	Watkinson <i>et al.</i> , 2007; Kaipainen y Faine, 1954; Louvet <i>et al.</i> , 2010; Šabić <i>et al.</i> , 2015
Petroquímica	PAHs (Naftaleno)	$1.2 - 3700 \text{ mg kg}^{-1}$	Pampanin and Sydnes, 2013; Barata <i>et al.</i> , 2005; Li <i>et al.</i> , 2012
Papelera	Phenol	$79.5 - 268 \text{ mg L}^{-1}$	Sharma and Gupta, 2012; Swamy <i>et al.</i> , 2011 Sponza, 2003; ATSDR, 1998

Tabla 1. Compuestos xenobióticos liberados de diferentes procesos industriales.

La alta lipofilicidad de muchos de estos compuestos xenobióticos conlleva a una bioconcentración/biomagnificación, causando e incrementando los problemas de salud en los predadores en los niveles altos de la cadena trófica. En la actualidad estos persistentes compuestos se encuentran en cada parte de los océanos, muchos en muy bajas concentraciones, pero sus efectos en la vida marina



y salud pública no se entienden ampliamente (Wu, 1999). En los compuestos xenobióticos se incluyen los contaminantes orgánicos hidrofóbicos, que se encuentran persistentes en el ambiente y tienden a biomagnificarse, este grupo hace referencia a compuestos tales como bifenilos policlorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, clorobenzenos, furanos y algunos pesticidas, principalmente aquellos usados desde tiempos atrás como el DDT y la dieldrina (Jantunen, 2010).

Sinha *et al* (2009) mencionan que entre los principales compuestos xenobióticos se incluyen los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), antibióticos, colorantes azoicos, pesticidas, combustibles, alcanos, solventes bifenilos policlorados, dioxinas, compuestos poliaromáticos, clorados y nitroaromáticos.

La recalcitrancia y persistencia de los compuestos xenobióticos en suelos varía principalmente de acuerdo al tipo de compuesto y las condiciones naturales del ambiente en el que éste se encuentre. Magan *et al* (2010) comparan la persistencia relativa de diferentes compuestos cuando éstos se encuentran en suelos (figura 1).

Debido a los problemas en los ecosistemas y en la salud humana causados por compuestos xenobióticos, se han buscado y desarrollado nuevas estrategias para su remoción de ambientes contaminados.

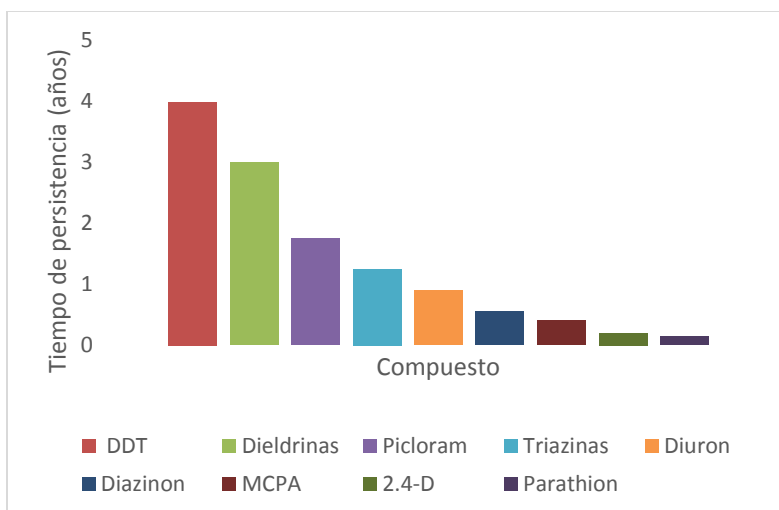


Figura 1. Niveles de persistencia relativa de compuestos xenobióticos en suelos.



2. Biodegradación de compuestos xenobióticos

La biorremediación es una alternativa para la remoción de dichos compuestos en el ambiente mediante la transformación de los contaminantes a compuestos no dañinos o sustancias menos tóxicas por medio de la acción de diferentes organismos. Esta biorremediación depende de las enzimas de los microorganismos que se encuentran envueltos en el proceso, y convierten los compuestos en productos

inocuos (Karigar y Rao, 2014). La biodegradación es un proceso natural que puede usarse para una biorremediación de ambientes contaminados, puesto que los microorganismos empleados usan los compuestos como una técnica de supervivencia, disminuyendo las concentraciones de los contaminantes (Singh, 2008), siendo además uno de los métodos más empleables por su bajo costo. Diversos microorganismos cuentan con la habilidad de usar compuestos xenobióticos, lo cual conlleva a efectos benéficos como desintoxicación, descontaminación, conversión de los compuestos a otros menos tóxicos, formación de productos de valor agregado como combustibles, fibras o plásticos. Estos microorganismos, principalmente las bacterias, tienen la habilidad de desintoxicar ambientes contaminados por medio de transformación, inmovilización o mineralización, la cual llega a ser un proceso lento y que requiere la interacción de diversos microorganismos para que tenga lugar de manera completa, sin embargo, algunas condiciones no permiten que esto ocurra, resulta una mineralización parcial (Fewson, 1988). La figura 2 muestra un ejemplo de remoción aerobia y anaerobia de dos compuestos xenobióticos diferentes. En la mayoría de los casos esta remoción ocurre por medio de degradación, sin embargo, cuando se pretende remover compuestos xenobióticos en condiciones anaerobias, es posible que los microorganismos realicen respiración a partir de la deshalogenación del compuesto en presencia de un compuesto empleado como fuente de carbono, posteriormente el compuesto es degradado total o parcialmente (Furukawa, 2010; Pieper, 2005).

Una previa adaptación de los microorganismos es crucial para un buen desempeño y por lo tanto una degradación significativa. Los efectos sobre una adaptación llegan a ser dramáticos, un ejemplo es la adición de un compuesto xenobiótico a un medio, aunque la concentración de éste se mínima (100 ppb), la tasa de degradación de un consorcio adaptado llega a ser hasta mil veces más alta que la de un consorcio no adaptado (Spain and Van Veld, 1983). Debido a la amplia variedad de compuestos xenobióticos, las rutas metabólicas para la biodegradación de cada uno de ellos varía de acuerdo al tipo de compuesto del que se trata, a las condiciones bajo las cuales ocurra la degradación, y al tipo de microorganismo que participe en ella. De igual manera, la tolerancia y crecimiento de los



microorganismos participantes en la degradación de los diversos compuestos varían de acuerdo al tipo y concentración del xenobiótico, así como las condiciones nutrimentales y ambientales.

Compuesto	Organismos degradadores	Condición	Enzimas	Genes	Intermediarios	Producto	Referencias
Bifeniles policlorados	<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> KF707 <i>Burkholderia cepacia</i> LB400	Aerobia	Bifenil 2,3-dioxigenasa, dihidrodiol deshidrogenasa, 2,3-dihidroxibifenil dioxigenasa, HOPDA hidrolasa	<i>bphA</i> , <i>bphB</i> , <i>bphC</i> , <i>bphD</i>	2,3-dihidrodiol, 2,3-dihidroxibifenil, 2-hidroxi-6-oxofenilhexa-2,4-ácido dienóico	Benzoato (clorado) y 2-oxopenta-4-enoato	Furukawa, 2010; Pieper, 2005;
	<i>Desulfitobacterium dehalogenans</i> <i>Dehalococcoides mccartyi</i> <i>Desulfitobacterium sp.</i> Strain Y51	Anaerobia	Orto-clorofenol deshalogenasa reductiva PCB halogenasas reductivas	<i>cprA</i> , <i>pcbA1</i> , <i>pcbA4</i> , <i>pcbA5</i>	Compuestos menos clorados	Bifenil	Wiegel et al., 1999; Van de Pas et al., 1999; Wang et al., 2014
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (naphthalene)	<i>Pseudomonas putida</i> Strain ND6	Aerobia	Naftaleno 1,2-dioxigenasa <i>Cis</i> -1,2-dihidro-1,2-dihidroxinaftaleno-1,2-deshidrogenasa, 1,2-dihidroxinaftaleno dioxigenasa, 2-hydroxycromeno carboxilato	<i>NahA</i> , <i>ndo</i> , <i>nahB</i> , <i>nahC</i> , <i>nahD</i> , <i>nahE</i> , <i>nahF</i>	<i>Cis</i> naftaleno dihidrodiol, naftaleno-1,2-diol, 2-hidroxicromeno-2-carboxilato, <i>trans</i> -o-hidroxibenxilidenopiruvato, salicilaldehido	Salicilato → Acetil CoA	Li et al., 2012



			isomerasa, <i>trans-o</i> - hidroxibenzili denopiruvato hidratasa- aldosa, salicyaldehid o deshidrogena sa				
<i>Thauera aromática</i> Cepa sulfaro reductora NaphS2 bacterium enrichment culture clone N47	Anaerobia	Naftaleno carboxilasa, 2-Ácido naftóico ligasa, 2-naftoil-CoA reductasa, 5,6-dihidro-2- naphthoil- CoA reductasa, 5,6,7,8- tetrahydro-2- naftoil-CoA reductasa	<i>n47 K 27540 ncr dhncr thncr</i>	2-Ácido naftóico 2-naftoil-CoA, 5,6-dihidro-2- naphthoil-CoA, 5,6,7,8- tetrahydro-2- naftoil-CoA	No identificad o	Estemann et al., 2015; Moultaki et al., 2012; Musat et al., 2009	

Tabla 2. Degradación aerobia y anaerobia de compuestos xenobióticos, microorganismos y enzimas participantes.

3. Degradación aerobia

Uno de los tipos más comunes de biorremediación es la mineralización de los contaminantes orgánicos tóxicos a productos no tóxicos como dióxido de carbono. El oxígeno es el aceptor de electrones más común durante la respiración microbiana y la degradación de compuestos xenobióticos, además, una amplia diversidad de microorganismos capaces de degradar dichos compuestos lo hacen bajo condiciones aerobias, tal como la especie *Pseudomonas*, que ha sido ampliamente estudiada por su capacidad de degradar contaminantes muy diferentes (Lovley, 2003). La mayoría de los trabajos de investigación que se han realizado para evaluar la remoción de contaminante se llevan a cabo en condiciones aerobias debido a que estos microorganismos son más fáciles para cultivar que los anaerobios, además de contar con un metabolismo más versátil (Singleton, 1994). La degradación de compuestos xenobióticos depende mayormente de las enzimas empleadas en la ruta metabólica para degradar substratos inusuales. La reacción inicial para la degradación ocurre de manera intracelular y es un proceso oxidativo que se da por la activación e incorporación de oxígeno, esta reacción es



catalizada por oxigenasas y peroxidasas principalmente. Después de esto, rutas metabólicas periféricas convierten los contaminantes en intermediarios de subsecuentes metabolismos intermediarios centrales, como el ciclo del ácido tricarboxílico, seguido de una biosíntesis de biomasa celular a partir de los metabolitos precursores centrales, por ejemplo, acetil- CoA, succinato, piruvato (Thakur, 2008).

4. Degradación anaerobia

La degradación anaerobia de los compuestos xenobióticos llega a ser muy importante, especialmente para llevar a cabo la mineralización de los xenobióticos con poca volatilidad, es decir, de estructuras y pesos más complejos. En algunos casos, la degradación de algunos compuestos no ocurre de manera aerobia si no existió un previo tratamiento anaerobio (Master *et al.*, 2002).

Muchos ecosistemas contaminados como sedimentos acuáticos, lagos estratificados, humedales y algunos suelos se caracterizan por tener una deficiencia o ausencia de oxígeno. En estos ambientes los microorganismos pueden usar nitrato, hierro, sulfato manganeso y carbonato como aceptores de electrones, la reducción de estos aceptores da como resultado la desnitrificación, reducción de hierro, sulfurogénesis, reducción de manganeso y metanogénesis respectivamente. La degradación anaerobia de compuestos orgánicos es llevada a cabo por microorganismos que emplean rutas metabólicas esencialmente diferentes a aquellos que realizan una degradación de manera aerobia, además, su desempeño en los ambientes contaminados dependen la los aceptores de electrones que se encuentren disponibles (Vázquez-Rodríguez *et al.*, 2008).

Muchos de los microorganismos involucrados en reactores anaerobios son capaces de catalizar diferentes reacciones de transformación, obteniendo además biogás, una alternativa de energía renovable que puede usarse para producir electricidad y calor. Entre las transformaciones que pueden ocurrir por estos microorganismos se encuentran hidrólisis descarboxilación, decloración, desmetoxilación y desaminación. Un gran número de estudios han empleado reactores específicos para obtener una mayor remoción del contaminante, siendo los más comunes los reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) y el reactor de tanque con agitación continua (CSTR por sus siglas en inglés) (Mogenssen *et al.*, 2003).



5. Factores que afectan la biodegradación

La biodegradación de compuestos xenobióticos se puede ver afectada por una gran cantidad de factores ambientales como pH, temperatura, salinidad, potencial redox, biomasa microbiana, biodisponibilidad, suplemento nutricional y disponibilidad de oxígeno. En condiciones de laboratorio estos factores deben optimizarse a manera de obtener un tratamiento microbiano efectivo, sin embargo en condiciones naturales, ninguno de estos factores ambientales pueden manipularse para alcanzar mejores tasas de degradación.

5.1 Disponibilidad de nutrientes

La disponibilidad de nutrientes es uno de los factores más importantes para obtener buenos resultados en la degradación, en este factor se deben considerar los ratios de los principales nutrientes con el carbono, los cuales varían de acuerdo al compuesto (Bernstein y Ronen, 2012). La disponibilidad de nutrientes puede ofrecer un cometabolismo, con lo cual se puede obtener más eficiencia al momento de remover el contaminante.

5.2 Aceptores de electrones

Las tasas de biodegradación están influenciadas por el tipo de aceptores de electrones disponibles en el ambiente, debido a que la degradación de compuestos xenobióticos es totalmente dependiente del aceptor final. Por ejemplo, la degradación de benceno es constantemente alta cuando se tiene oxígeno como aceptor final, mientras que en condiciones nitrato-reductoras el compuesto se encuentra más recalcitrante. Bajo condiciones reductoras de hierro, sulfato, y condiciones metanogénicas, la degradación del benceno es posible, pero para casos más específicos (Schreiber *et al.*, 2004).

5.3 Potencial Redox y pH

El potencial redox juega un importante rol en la especificidad de los mecanismos empleados durante la degradación de determinados contaminantes, pero también tiene una influencia en la tasa de degradación de estos. Por otro lado el pH por su cuenta tiene un notable efecto en la mineralización de los compuestos. Se han encontrado que el pH óptimo para una eficiente degradación se encuentra cercano a



la neutralidad, mientras que cuando se manejan potenciales redox muy reducidos existe una alta transformación (Price *et al.*, 2001).

5.4 Temperatura

La mayor parte de los microorganismos aislados y estudiados llevan a cabo la degradación de compuestos xenobióticos de una manera óptima bajo condiciones mesofílicas, su habilidad para degradar disminuye cuando la temperatura es mayor que 37 °C o menor que 25 °C, sin embargo la remoción eficaz de algunos de estos compuestos en sedimentos se encuentra a una temperatura entre 5 °C y 50 °C, estas condiciones varían de acuerdo al tipo de compuesto, condiciones ambientales y principalmente, el microorganismo participante (Singleton, 1993).

6. Cometabolismo

En las comunidades microbianas participantes en la remoción de contaminantes ocurren diversos procesos que mejoran el metabolismo microbiano, dentro de estos se encuentran la producción de factores de crecimiento, remoción de sustancias tóxicas y cometabolismo. El cometabolismo es un proceso que ha sido identificado por sus efectos benéficos en el metabolismo de compuestos xenobióticos. Durante el cometabolismo los microorganismos crecen en un sustrato en particular y además oxidan un segundo sustrato que no puede ser asimilado como fuente de carbono o de energía. Después de haber sido oxidado, el segundo sustrato puede ser empleado por otro microorganismo de la comunidad (Singleton, 1994).

Daltn y Stirling (1982) definen cometabolismo como la transformación de un sustrato no empleado en la presencia obligada de un sustrato empleado o algún otro compuesto transformable. Este proceso es un fenómeno fisiológico basado en el uso de varias rutas metabólicas a nivel celular. En el metabolismo de compuestos xenobióticos el mecanismo no es preciso para el segundo sustrato o el primero, esto depende de ambos sustratos y de los microorganismos que se ven envueltos en el proceso. Sin embargo, previos estudios indican que la principal función del sustrato añadido y el cuál será usado es brindar energía, cofactores o metabolitos para las diferentes etapas durante la transformación del contaminante.



El cometabolismo de xenobióticos de manera natural ocurre de una manera lenta debido a que las comunidades que actúan sobre dicho compuesto son generalmente pequeñas y la biomasa no tiende a aumentar cuando se introducen otros químicos (Janke y Fritsche, 1985).

En un sistema en donde se tiene disponible un sustrato y un cosustrato la tasa de consumo del cosustrato se ve relacionada con un consumo de sustrato, esta tasa de consumo de cosustrato tiende a disminuir cuando el sustrato primario empieza a disminuir o cuando hay una alta acumulación de productos tóxicos (Criddle, 1993).

7. Microbiología en la degradación de compuestos xenobióticos

Los microorganismos juegan el papel más importante en la degradación de compuestos recalcitrantes debido a que tienen la capacidad de crecer empleándolos como única fuente de carbono (Fewson, 1988). Las bacterias han desarrollado mecanismos para obtener energía a partir de compuestos xenobióticos, ya sea bajo condiciones aerobias o anóxicas usando aceptores finales como nitrato, sulfato y iones de hierro. Ya sea de manera aerobia o anaerobia, las enzimas de los microorganismos que participan en la

degradación son altamente eficientes para romper la estructura de los contaminantes, contribuyendo con el ciclo de carbono (Sinha *et al.*, 2009).

Anteriormente han sido aislados cultivos puros de bacterias capaces de degradar compuestos xenobióticos bajo condiciones aerobias o anaerobias. Entre las principales bacterias aerobias se encuentran *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Sphingobium*, *Pandoraea*, *Rhodococcus*, *Gordonia*, *Bacillus*, *Morazella* and *Micrococcus* (Varsha *et al.*, 2011), mientras que bajo condiciones anaerobias se han identificado bacterias como *Clostridia*, *Desulfobacterium*, *Desulfovibrio*, *Methanococcus*, *Methanosarcina*, *Dehalococcoides*, *Flavobacterium* and *Klebsiella* (Zhang y Bennett, 2005).

8. Bibliografía seleccionada



1. Agrawal Nikki & Shahi Sushil Kumar, "An Environmental Cleanup Strategy-Microbial Transformation of Xenobiotic Compounds", *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4, 4, 2015, 429-461.
2. Lovley Derek R. (2003), "Cleaning up with genomics: applying molecular biology to bioremediation", *Nature Reviews Microbiology*, 1, 1, 2003, 35-44.
3. Dalton H., Stirling D. I. & Quayle J. R. "Co-metabolism [and discussion]", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 297, 1088, 1982, 481-496.
4. Singleton Ian, "Microbial metabolism of xenobiotics: fundamental and applied research" *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 59, 1, 1994, 9-23.
5. Zhang Chunlong & Bennett George N. "Biodegradation of xenobiotics by anaerobic bacteria" *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67, 5, 2005, 600-618.
6. Furukawa Kensuke, "Biochemical and genetic bases of microbial degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs)", *The Journal of general and applied microbiology*, 46, 6, 2000, 283-296.
7. Pieper Dietmar H., "Aerobic degradation of polychlorinated biphenyls", *Applied microbiology and biotechnology*, 62, 2, 2005, 170-191.
8. Estelmann Sebastia., Blank Iлона, Feldmann Annika & Boll Matthias, "Two distinct old yellow enzymes are involved in naphthyl ring reduction during anaerobic naphthalene degradation", *Molecular microbiology*, 95, 2, 2015, 162-172.
9. Li Sandhan, Zhao Huabing, Li Yaxiao, Niu Shumin & Cai Baoli, "Complete genome sequence of the naphthalene-degrading *Pseudomonas putida* strain ND6". *Journal of bacteriology*, 194, 18, 2012 5154-5155.
10. Watkinson A. J., Murby E. J. & Costanzo S. D., "Removal of antibiotics in conventional and advanced wastewater treatment: implications for environmental discharge and wastewater recycling", *Water research*, 41, 18, 2007, 4164-4176.