

INCREMENTO DE LA SOLUBILIZACIÓN DE PERCLOROETILENO CON UN TENSOACTIVO NO IÓNICO

Cuauhtémoc U. Moreno-Medina, Luz de M. Bretón-Deval, Elvira Ríos-Leal,
Josefina Barrera-Cortés, Noemí Rinderknecht-Seijas y Héctor M. Poggi-Varaldo

RESUMEN

El percloroetileno (PCE) es el contaminante organoclorado más reportado en aguas subterráneas, donde forma una fase densa en el fondo del acuífero. Debido a su baja solubilidad es difícil de eliminar, constituyendo fuente de liberación prolongada del contaminante. Por ello surge la necesidad de lograr una mayor solubilidad de PCE en agua para su posterior extracción y tratamiento *ad situ*. Una forma de aumentar la disponibilidad del contaminante en acuíferos para su remediación sobre el sitio de las aguas subterráneas contaminadas es mediante la adición de tensoactivos. El Tween 80 es un tensoactivo no iónico que por sus características fisicoquímicas y baja capacidad micelar crítica constituye un buen candidato para hacer más soluble al PCE. El objetivo de este trabajo

fo fue determinar el efecto de la adición de Tween 80 (en la gama 0-800mg·l⁻¹) sobre la solubilidad de PCE en un agua similar a la alimentación de biorreactores para remediación *ad situ*. La máxima concentración de PCE solubilizada alcanzada fue 1532mg·l⁻¹, adicionando 800mg·l⁻¹ de Tween 80 y siendo 120mg·l⁻¹ la solubilidad máxima de PCE en agua sin adición de tensoactivo. Los resultados muestran un aumento de 12 veces en la solubilización de PCE, mientras que éste y otros indicadores como K_m y la razón de solubilidad molar confirman que el efecto del Tween 80 sobre la solubilidad del PCE fue significativamente superior al de otros tensoactivos reportados en la literatura, tales como el aniónico dodecilsulfato sódico (DSS) y el biotensoactivo UH.

Introducción

El percloroetileno (PCE) es un compuesto clorado alifático ampliamente utilizado para la limpieza en seco, así como en varias aplicaciones industriales tales como la producción de aerosoles, adhesivos, lubricantes y plásticos. Seres humanos y animales pueden estar expuestos al PCE y a sus metabolitos a través del agua potable, inhalación de ambientes contaminados o por exposición ocupacional. Estudios clínicos demuestran que el PCE produce alteraciones de la respuesta inmune y endocrina, adenomas renales, leucemia mononuclear y tu-

moreos hepáticos, además de daño oxidativo en el DNA y peroxidación lipídica (Torra-son, 2003; US-EPA, 2000). El PCE es el contaminante clorado más reportado en aguas subterráneas, donde forma una fase densa en el fondo del acuífero, siendo difícil de eliminar debido a su baja solubilidad, y constituyendo una fuente de liberación prolongada del contaminante (Shin *et al.*, 2008).

La remediación de acuíferos contaminados con PCE ha sido llevada a cabo por medios abióticos utilizando filtros y barreras subterráneas de Fe metálico (Shao y Butler, 2007; Poggi-Varaldo *et al.*,

2009), y en forma exploratoria por medio de la adición de cianocobalaminas (Nijenhuis, *et al.*, 2005). Sin embargo, muchas veces la transformación del contaminante de forma abiótica ocurre lentamente, resultando más ventajoso unir los tratamientos abióticos a tratamiento biológicos (Hussein, 2008). El PCE es reducido de forma anaerobia gracias a microorganismos que pueden usar este compuesto como aceptor final de electrones (halorrespiración), dando como resultado compuestos menos clorados como tricloroetileno, dicloroetileno y cloruro de vinilo (Wang y Wu, 2004).

Los biorreactores de lecho fluidizado, tanto anaerobios como con aceptores simultáneos de electrones, han demostrado ser una técnica atractiva y efectiva para la remediación *ad situ* de aguas contaminadas con concentraciones de hasta 80mg·l⁻¹ de PCE (Estrada-Vázquez *et al.*, 2001, 2003; López-Navarrete *et al.*, 2002; López-Navarrete, 2003; Zárate-Segura *et al.*, 2004; Herrera-López *et al.*, 2007; Moreno-Medina *et al.*, 2011). Sin embargo, surge la necesidad de incrementar la solubilización de PCE en el agua contaminada para extraer mayores cantidades de PCE y de esta forma ace-

PALABRAS CLAVE / Percloroetileno / Remediación / Solubilidad / Tensoactivos / Tween 80 /

Recibido: 01/08/2010. Modificado: 02/02/2011. Aceptado: 04/02/2011.

Cuauhtémoc U. Moreno-Medina.

Biólogo, Universidad Autónoma Metropolitana, México. M. en C. en Oceanografía Costera, Universidad Autónoma de Baja California. Candidato a Doctor en Biotecnología, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), México.

Luz de M. Bretón-Deval. Bióloga, Universidad de Guadalajara,

México. Candidata a M. en C. en Biotecnología, CINVESTAV-IPN, México.

Elvira Ríos-Leal. Química Farmacobióloga. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Fundadora y Coordinadora de Central Analítica, CINVESTAV-IPN

Josefina Barrera-Cortés. Ingeniero Química, UNAM, México. Doctora, Université de Paris-Nord, Francia. In-

vestigadora, CINVESTAV-IPN, México.

Noemí Rinderknecht-Seijas.

Ingeniera Bioquímica, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN, México. M. en C. en Seguridad Ocupacional e Higiene, IPN, México. Profesora, ESIQIE, IPN, México.

Héctor M. Poggi-Varaldo. Ingeniero Químico, Universidad de la República Oriental del Uruguay. Maestro en Ingeniería

Ambiental, UNAM, México. Doctor en Ciencias, CINVESTAV-IPN. Profesor, CINVESTAV-IPN, México. Dirección: Grupo de Biotecnología Ambiental y Energías Renovables, Departamento de Biotecnología y Bioingeniería. CINVESTAV-IPN. Apartado Postal 14-740, México D.F., 07000 México. e-mail: hectorpoggi2001@gmail.com

PERCHLOROETHYLENE SOLUBILIZATION WITH A NON-IONIC TENSIOACTIVE

Cuauhtémoc U. Moreno-Medina, Luz de M. Bretón-Deval, Elvira Ríos-Leal, Josefina Barrera-Cortés, Noemí Rinderknecht-Seijas and Héctor M. Poggi-Varaldo

SUMMARY

Perchloroethylene (PCE) is one of the most commonly reported chlorinated organic contaminants in groundwater, where it forms a dense phase at the bottom of the aquifer and due to its low solubility is very difficult to remove. Thus, it results in an extended-release source of contamination to the aquifer. There is the need of enhanced solubility of PCE for further extraction and treatment in pump-and-treat approaches. One way to increase the availability of the pollutant in aquifers for remediation ad situ is by surfactant addition. Tween 80 is a nonionic surfactant with low critical micellar capacity and low toxicity to microorganisms, and represents a good candidate for enhanced PCE solubilization. The aim of this study was to determine the effect of the ad-

dition of Tween 80 on the solubility of PCE in a representative water. The maximum concentration of soluble PCE was 1532mg-l⁻¹ at the highest dose of Tween 80 used in this work (800mg-l⁻¹). In contrast the maximum solubility of PCE in water without addition of surfactant was 120mg-l⁻¹. Results show a high PCE solubilization ratio of 12 with Tween 80, compared to ratios of 1.53 and 2.26 for sodium dodecyl sulfate (SDS) and the biosurfactant UH, determined at 800mg-l⁻¹ of each surfactant. High values of other indices, such as K_m and the molar solubility ratio, also confirmed the superiority of Tween 80 with respect to SDS and UH, for this application. Tween 80 appears a good candidate for solubilizing high concentrations of PCE in groundwater.

INCREMENTO DA SOLUBILIDADE DE PERCLOROETILENO COM UM TENSOATIVO NÃO IÔNICO

Cuauhtémoc U. Moreno-Medina, Luz de M. Bretón-Deval, Elvira Ríos-Leal, Josefina Barrera-Cortés, Noemí Rinderknecht-Seijas e Héctor M. Poggi-Varaldo

RESUMO

O percloroetileno (PCE) é o contaminante organoclorado mais reportado em águas subterrâneas, onde forma uma fase densa no fundo do aquífero. Devido a sua baixa solubilidade é difícil de eliminar, constituindo fonte de liberação prolongada do contaminante. Por isto surge a necessidade de conseguir uma maior solubilidade de PCE em água para sua posterior extração e tratamento ad situ. Uma forma de aumentar a disponibilidade do contaminante em aquíferos para sua remoção sobre o local das águas subterrâneas contaminadas é mediante a adição de tensoativos. O Tween 80 é um tensoativo não iônico que por suas características físicoquímicas e baixa capacidade micelar crítica constitui um bom candidato para fazer mais solúvel ao PCE. O objetivo deste trabalho foi de-

terminar o efeito da adição de Tween 80 (na gama 0-800mg-l⁻¹) sobre a solubilidade de PCE em uma água similar à alimentação de biorreatores para remediação in situ. A máxima concentração de PCE solubilizada alcançada foi 1532mg-l⁻¹, adicionando 800mg-l⁻¹ de Tween 80 e sendo 120mg-l⁻¹ a solubilidade máxima de PCE em água sem adição de tensoativo. Os resultados mostram um aumento de 12 vezes na solubilização de PCE, enquanto que esse e outros indicadores como K_m e a razão de solubilidade molar confirmam que o efeito del Tween 80 sobre a solubilidade do PCE foi significativamente superior ao de outros tensoativos relatados na literatura, tais como o aniônico dodecil sulfato sódico (DSS) e o biotensoativo UH.

lerar la remediación del acuífero.

Una forma de aumentar la disponibilidad del contaminante en acuíferos y suelos para su remediación *ad situ* es mediante la adición de tensoactivos (Fountain *et al.*, 1991; Poggi-Varaldo *et al.*, 2002; Poggi-Varaldo y Rinderknecht-Seijas, 2003). Estas moléculas anfipáticas son efectivas para solubilizar componentes hidrofóbicos, reduciendo la tensión interfacial (Hadibarata y Tachibana, 2009). Los tensoactivos pueden ser clasificados de acuerdo a la naturaleza de la porción hidrofílica de la molécula en aniónicos, catiónicos, no iónicos y zwitterionic;

estos últimos tienen cargas tanto positiva como negativa en la misma cabeza hidrofílica (Lee *et al.*, 2005). A pesar de que existe un gran número de tensoactivos en el mercado, es deseable que el tensoactivo aplicado a la remediación del acuífero no sea volátil, pueda ser reciclado, no sea tóxico ni costoso, además de que disminuya de forma considerable la tensión superficial del sistema y que posea una baja capacidad micelar crítica (CMC) (Lee *et al.*, 2001). Los tensoactivos no iónicos representan una buena opción para solubilizar contaminantes hidrofóbicos. Entre otras ventajas, los primeros presentan valores de

CMC menores que los tensoactivos iónicos, y además son menos tóxicos a los microorganismos que sus pares catiónicos y aniónicos (Shcherbakova *et al.*, 1999).

El Tween 80 es un tensoactivo no iónico que debido a sus características físicoquímicas y su baja CMC (Tabla I) representa un buen candidato para hacer más soluble al PCE, por lo que el objetivo de este trabajo fue determinar la solubilidad de PCE en agua representativa de la alimentación a biorreactores de lecho fluidizado utilizados para la biorremediación *ad situ*, adicionada con Tween 80 a diferentes concentraciones en la gama de 0 a 800mg-l⁻¹.

Materiales y Métodos

Estudio de solubilidad

Para realizar el ensayo de solubilidad se utilizaron botellas serológicas de 122ml, a cada una de las cuales se le adicionó agua sintética y tensoactivo Tween 80 (Sigma-Aldrich) a concentraciones de 0, 100, 200, 300, 400, 600, y 800mg-l⁻¹ además de 1ml de PCE (Sigma-Aldrich +99%). El volumen restante se complementó en su totalidad con agua sintética para evitar la existencia de espacio gaseoso en las botellas y por ende minimizar cualquier evaporización del PCE. Por último, las botellas fueron selladas

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL TENSOACTIVO TWEEN 80

Nombre comercial	Tween 80
Nombre químico	Monooleato de polioxietileno sorbitán
Peso molecular (g·mol ⁻¹)	1309,67
Densidad (mg·l ⁻¹)	1,064
CMC (mg·l ⁻¹)	15
HIB	5
Tipo	No-iónico
Estado de agregación a temperatura ambiente	Líquido

CMC: capacidad micelar crítica, HIB: balance lipofílico hidrofílico, por sus siglas en inglés. Valores tomados de Harendra y Vipulanandan (2008) y Lee *et al.* (2001, 2005).

con septas de teflón y anillos de aluminio. Las botellas se agitaron durante 2h a 300rpm con ayuda de un agitador magnético colocado en el fondo de cada botella, para fomentar la solubilización micelar. Al finalizar, las muestras se analizaron por medio de cromatografía de gases. Todos los experimentos se realizaron por duplicado.

La composición del agua sintética fue similar a la alimentación a biorreactores de lecho fluidizado utilizados para experimentos de biorremediación *ad situ* (Zárate-Segura *et al.*, 2004) y consistió de (mg·l⁻¹): metanol 841; K₂HPO₄ 3500; KH₂PO₄ 2700; MgSO₄·7H₂O 5; FeCl₂ 5; CaCl₂ 5; CoCl₂ 0,1; y (NH₄)₃PO₄ 84. Se suplementó con NaHCO₃ comercial (400mg·l⁻¹) para proveer alcalinidad y amortiguación del medio a un pH cercano a la neutralidad.

Se preparó un stock del tensoactivo colocando 1ml de Tween 80 en 1 litro de agua destilada. El volumen del stock está relacionado con la concentración de Tween 80 a disolver en las botellas serológicas, de 0, 100, 200, 300, 400, 600 y 800mg·l⁻¹.

Los resultados de solubilización de PCE fueron evaluados en términos de parámetros e indicadores con-

venientes. El parámetro K_m (Ec. 1) representa la relación entre concentración de PCE que se encuentra en las micelas del tensoactivo y la concentración de PCE que se disuelve con tensoactivo adicionado a su capacidad micelar crítica (CMC).

$$K_m(x) = \frac{Y - Y_0}{Y_0} \quad (1)$$

donde Y: concentración molar de PCE solubilizado a una concentración dada de tensoactivo, e Y₀: concentración molar de PCE solubilizado cuando la concentración de

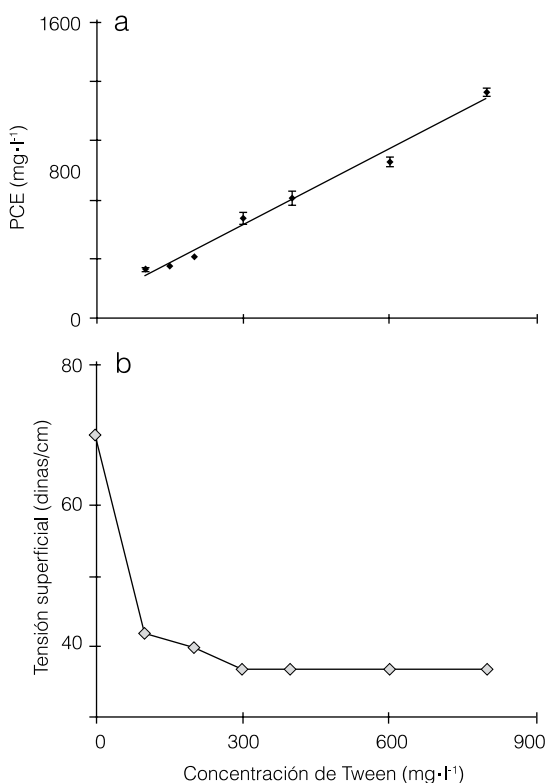


Figura 1. Efecto de la concentración del tensoactivo Tween 80 sobre la solubilidad del PCE y la tensión superficial de la matriz acuosa. a: solubilidad del PCE, b: tensión superficial.

tensoactivo es igual a su CMC.

La razón de solubilización molar (RSM) representa la capacidad de solubilización del tensoactivo expresada como la razón de la concentración neta de PCE soluble por arriba de la solubilidad de PCE a la CMC del tensoactivo, dividida por la concentración neta de tensoactivo por arriba de su CMC; tanto el numerador como el denominador están en mol·l⁻¹. Se consideró que la CMC no fue significativamente reducida por efecto de las sales del agua sintética, ya que la reducción de la CMC por acción de las sales disueltas en el medio acuoso es significativo solo para los tensoactivos polares (Li *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2009).

$$RSM = \frac{Y - Y_0}{X - X_0} \quad (2)$$

donde Y e Y₀ fueron definidos arriba, X: concentración molar dada de tensoactivo, y X₀: CMC molar del tensoactivo.

La tasa de solubilización (TS) se define como la relación de concentración de PCE soluble (alcanzada a una concentración de Tween 80 determinada) entre la concentración de PCE de saturación en agua sintética sin Tween, como sigue:

$$TS = \frac{[PCE]_{([Tensoactivo]=C)}}{[PCE]_{([Tensoactivo]=0)}} \quad (3)$$

donde C: concentración determinada de tensoactivo (en este trabajo fue 800mg·l⁻¹).

Tensión superficial

Se determinó la tensión superficial del agua sintética con concentraciones de 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800mg·l⁻¹ de Tween 80.

Se utilizó un tensiómetro Lauda TDIC por la técnica del anillo de Du Noüy. Dicha técnica consiste en sumergir el anillo en el líquido a

analizar para después retirarlo de manera lenta hasta medir el momento donde se alcanza la máxima fuerza utilizada para retirar el anillo del líquido.

Análisis

La concentración de PCE en los diversos tratamientos fue determinada por cromatografía de gas con la técnica de volatilización al espacio gaseoso. Se usó un cromatógrafo de gas Perkin-Elmer Autosystem equipado con detector de ionización de flama y columna capilar de 0,25mm×30m AF-TM1 de acero inoxidable. Las temperaturas de la columna, detector y puerto de inyección fueron 40, 280, y 250°C respectivamente. El gas de arrastre fue N₂ a 5lbf/pulg² manométrica.

Resultados y Discusión

La adición del tensoactivo Tween 80 incrementó la solubilidad del percloroetileno (Figura 1a). Se alcanzó una máxima concentración de PCE solubilizado de 1532mg·l⁻¹ con la máxima dosis adicionada de Tween 80 (800mg·l⁻¹). Por comparación, la solubilidad de saturación de PCE en agua sin adición de tensoactivos es del orden de 120mg·l⁻¹ (118mg·l⁻¹ en este trabajo, y 150mg·l⁻¹ según Horvath, 1982). Los presentes

resultados muestran una tasa de solubilización de 12,77, i.e., un aumento de casi 13 veces por sobre la concentración de saturación de PCE en nuestra matriz sin tensoactivo.

El K_m aumentó mostrando una tendencia lineal con la adición de Tween 80. El máximo obtenido fue 9,63 y representa los 8,3mM de PCE presente en las micelas de Tween 80. La razón de solubilización molar (RSM) exhibió un valor muy alto (~14, Tabla II).

En la búsqueda por aumentar la solubilidad del PCE en aguas contaminadas para su posterior tratamiento, Harendra y Vipulanandan (2008) usaron 10000mg·l⁻¹ de los tensoactivos

UH (un biotensoactivo) y DSS (dodecilsulfato sódico, tensoactivo aniónico), logrando solubilizar 1148mg·l⁻¹ y 1107mg·l⁻¹ de PCE, respectivamente.

En la Figura 2 se muestran las concentraciones de PCE solubilizadas a diversas concentraciones de los tensoactivos Tween 80, DSS y UH, y las regresiones lineales correspondientes son:

$$[PCE] = 1708,8 [Tween\ 80] + 118,5; \quad R^2 = 0,9871 \quad (4)$$

$$[PCE] = 89,6 [DSS] + 230,6; \quad R^2 = 0,9879 \quad (5)$$

$$[PCE] = 85,2 [UH] + 298,0; \quad R^2 = 0,9944 \quad (6)$$

donde las concentraciones de PCE están en mg·l⁻¹ y las de los tensoactivos en g·l⁻¹. Se puede observar que se requiere menor concentración de Tween 80 para lograr solubilizar concentraciones de PCE superiores a las obtenidas por los tensoactivos DSS y UH, que requirieron usar altas concentraciones de los mismos.

Esto último fue confirmado por los valores de las tasas de solubilización obtenidas para DSS y UH: 2,52 y 3,05 respectivamente (Tabla II). Por otro lado, la tasa de solubilización de PCE obtenida con Tween 80 fue ~12, es decir, hasta 5 veces mayor que las correspondientes a DSS y UH. Las tasas de solubilización fueron determinadas a 800mg·l⁻¹ de tensoactivo Tween 80. Las K_m de DSS (1,53) y UH (2,26) fueron significativamente menores que la correspondiente a Tween 80 (Tabla II), hasta por un factor entre 4 y 5.

En general, Tween 80 fue más efectivo que los otros tensoactivos (DSS y UH), probablemente debido a más su baja CMC (15mg·l⁻¹ comparado con 2380 y 700mg·l⁻¹ para DSS y UH, respectivamente). Los resultados son congruentes con lo reportado por Gadelle *et al.* (1995), quienes establecieron que la solubilidad de los compuestos hidrofóbicos aumenta cuando aumenta la longitud de

las cadenas hidrofóbicas de los tensoactivos. En nuestro caso, el número de átomos de carbono en la cadena hidrofóbica de Tween 80 es 20, mucho mayor que para el DSS (12 átomos de C), mientras que el número de átomos de C en las cadenas hidrofóbicas de biotensoactivos cae en el intervalo de 6 a 16 (Islas *et al.*, 2010).

Las RSM de los tensoactivos fueron obtenidas como pendientes de las regresiones impuestas a las líneas en la Figura 2b:

$$[PCE] = 13,78x [Tween\ 80] - 0,0001; \quad R^2 = 0,9830 \quad (7)$$

$$[PCE] = 0,162x [DSS] - 9E-05; \quad R^2 = 0,9804 \quad (8)$$

$$[PCE] = 0,157x [UH] + 0,0003; \quad R^2 = 0,9953 \quad (9)$$

donde las concentraciones de PCE y tensoactivos están expresadas en mol·l⁻¹.

Se aprecia la superioridad de Tween 80 por su significativamente mayor RSM respecto a los otros dos tensoactivos (valores de las pendientes en Ecs. 7 a 9; Tabla II).

Mol a mol, el Tween 80 tiene una capacidad solubilizadora de PCE ~86 veces mayor que los otros dos tensoactivos.

La tensión superficial de las mezclas agua problema-PCE disminuyó al aumentar la concentración de PCE, desde un valor de 60din·cm⁻¹ para el agua sola hasta 37din·cm⁻¹ a una concentración del orden de 300mg·l⁻¹ de Tween (Figura 1b). Si bien el efecto depresor de

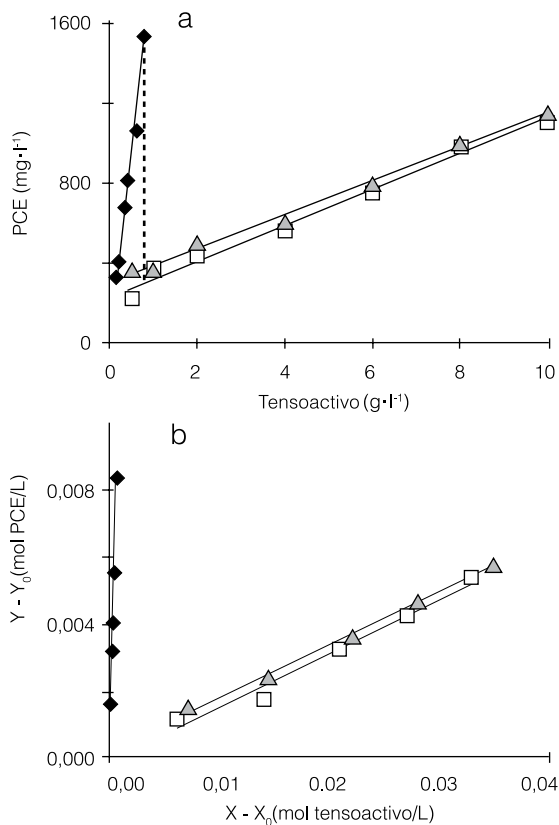


Figura 2. Efectos de la concentración de tensoactivo sobre solubilización de PCE. a: concentración de PCE vs concentración de tensoactivo, b: relación de solubilidad molar. Resultados de DSS y UH adaptados de Harendra y Vipulanandan (2008). Tween 80: rombos negros, DSS: cuadrados blancos; UH: triángulos grises.

Tween 80 sobre la tensión superficial es un comportamiento esperable, resultó menor que el de los otros tensoactivos, especialmente el biotensoactivo UH (Tabla II). Sin embargo, la menor caída de tensión superficial

causada por el Tween 80 no se correlacionó con su mayor capacidad para solubilizar el PCE, probablemente debido a que el factor más influyente sobre la solubilización de PCE sea la longitud ó número de átomos de C de la cadena hidrofóbica del Tween 80, como se discutió más arriba.

Conclusión

Los resultados permiten concluir que:

- El Tween 80 solubiliza una concentración de PCE superior a la solubilizada por los tensoactivos UH y DSS y a concentraciones menores de tensoactivo.

- La superioridad de Tween 80 respecto a tensoactivos selectos reportados en la literatura (DSS y UH) fue confirmada por los altos valores de varios parámetros indicadores de la efectividad de solubilización de PCE (K_m, RSM, y tasa de solubilización) obtenidos con Tween 80).

- El Tween 80 aparece como un candidato prometedor para ser utilizado en tratamiento *ad*

TABLA II
SOLUBILIZACIÓN DE PCE OBTENIDA CON TENSOACTIVOS TWEEN 80, DSS, Y UH

Valor/Característica	Tween 80	DSS ^a	UH ^b
CMC ^c (mg·l ⁻¹)	15	2300	700
Tensión Superficial (dinas/cm) @ 800mg·l ⁻¹ de tensoactivo	37 ± 0,8	35	28
PCE solubilizado (mg·l ⁻¹)	1532 ^a ---	302 ^a 1107 ^c	366 ^a 1148 ^c
K _m ^d (mol PCE/mol PCE)	9,63 ± 0,41	1,53 ± 0,07	2,26 ± 0,10
RSM ^e (mol PCE/mol tensoactivo)	13,79 ± 1,05	0,162 ± 0,014	0,157 ± 0,006
Tasa de solubilización (-)	12,77 ± 0,55	2,52 ± 0,14	3,05 ± 0,16

DSS: dodecil sulfato sódico, UH: biotensoactivo UH, CMC: capacidad micelar crítica.

^a la concentración de tensoactivo fue 800mg·l⁻¹

^b la concentración de tensoactivo fue 10000mg·l⁻¹

^c PCE presente en las micelas del tensoactivo y que va al PCE en solución

^d relación de solubilidad molar.

Los resultados de DSS y UH están adaptados y calculados a partir de lo reportado por Harendra y Vipulanandan (2008).

situ, pues incrementaría la concentración de PCE en el agua del acuífero conduciendo a la aceleración de la extracción del contaminante y a la disminución del tiempo de remediación del cuerpo impactado en esquemas de bombeo-y-tratamiento (*pump and treat* por su expresión conocida en inglés).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CINVESTAV del IPN por apoyo financiero parcial a la investigación, al CONACYT por becas de posgrado a LMB-D y CUM-M, y COFAA por beca a NR-S. También se reconoce la asistencia técnica de Rafael Hernández-Vera, GBAER DBB, y de Cirino Rojas, Central Analítica DBB, CINVESTAV del IPN.

REFERENCIAS

- Estrada-Vázquez C, Macarie H, Kato MT, Rodríguez-Vázquez R, Poggi-Varaldo HM (2001) Oxygen exposure resistance in suspended anaerobic sludge. *Interciencia* 26: 547-553.
- Estrada-Vázquez C, Macarie H, Kato MT, Rodríguez-Vázquez R, Esparza-García F, Poggi-Varaldo HM (2003) The effect of the supplementation with a primary carbon source on the resistance to oxygen exposure of methanogenic sludge. *Water Sci. Technol.* 48: 119-124.
- Fountain J, Klimek A, Beikirch M, Middleton T (1991) The use of surfactants for in situ extraction of organic pollutants from a contaminated aquifer. *J. Haz. Mat.* 28: 295-311.
- Gadelle F, Koros WJ, Schechter RS (1995) Solubilization isotherms of aromatic solutes in surfactant aggregates. *J. Coll. Interf. Sci.* 170: 57-64.
- Hadibarata T, Tachibana S (2009) Characterization of phenanthrene degradation by strain *Polyporus* sp S133. *J. Env. Sci.-China* 22: 142-149.
- Harendra S, Vipulanandan C (2008) Degradation of high concentrations of PCE solubilized in SDS and biosurfactant with Fe/Ni bimetallic particles. *Coll. Surf. A* 322: 6-13.
- Herrera-López D, García-Mena J, Poggi-Varaldo HM (2007) The addition of zero-valent iron to batch bioreactors with simultaneous electron acceptors on removal of high concentrations of perchloroethylene. En Gavasakar A, Silver C (Eds.) *In Situ and on Site Remediation-2007*. Battelle. Columbus, OH, EEUU. pp. H-14.
- Horvath A (1982) *Halogenated Hydrocarbons, Solubility-Miscibility with Water*. Dekker. Nueva York, NY, EEUU. 920 pp.
- Hussein J (2008) *Microcosms and Field Bioremediation Studies of Perchloroethene (PCE) Contaminated and Groundwater*. Tesis. Kansas State University. EEUU. 221 pp.
- Islas D, Moreno S, Rodríguez J (2010) Biosurfactant properties, applications and production. A review. *Rev. Int. Cont. Amb.* 26: 65-84.
- Lee DH, Cody RD, Hoyle BI (2001) Comparison of six surfactants in removing toluene and trichlorobenzene from a sandy soil under laboratory conditions. *Can. Geotech. J.* 38: 1329-1334.
- Lee DH, Kim E, Chang C (2005) Effect of Tween surfactant components for remediation of toluene contaminated groundwater. *Geosci. J.* 9: 261-267.
- Li Y, He X, Cao X, Zhao G, Tian X, Cui X (2007) Molecular behavior and synergistic effects between sodium dodecylbenzene sulfonate and Triton X-100 at oil/water interface. *J. Coll. Interface Sci.* 307: 215-220.
- López-Navarrete Z (2003) *Remoción de Compuestos Clorados Alifáticos de Aguas Contaminadas Utilizando Reactor de Ambiente Combinado Metanogénico-Desnitrificante* (2003) Tesis. CINVESTAV-IPN. México. 125 pp.
- López-Navarrete Z, Ríos-Leal E, Esparza-García F, Thalasso F, Buitrón G, Poggi-Varaldo HM (2002) Removal of chlorophenols and chlorinated aliphatics in simultaneous methanogenic-denitrification systems. En Thomas O, Degource-Dumas JR, Le-Cloirec P, Englande A (Eds.) *Proc. 5th. IWA International Conference of the Chemical Industry Group*. EMN. Nimes, Francia. pp. 157-166.
- Moreno-Medina C, Bretón-Deval L, Ríos-Leal E, Galíndez-Mayer J, Ortega-Clemente A, Fava F, Rinderknecht-Seijas N, Poggi-Varaldo HM (2011) Effect of sudden increase of PCE concentration on performance of fluidized bed bioreactors operated in simultaneous electron acceptor modes. *J. Biotechnol.* 150: 48-49.
- Nijenhuis I, Andert J, Beck K, Kastner M, Diekert G, Richnow H (2005) Stable isotope fraction of tetrachloroethene during reductive dechlorination by *Sulfurospirillum multivorans* and *Desulfotobacterium* sp. strain PCE-S and abiotic reactions with cyanocobalamin. *Appl. Env. Microbiol.* 71:3413-3419.
- Poggi-Varaldo HM, Rinderknecht-Seijas N (2003) A differential availability enhancement factor for the evaluation of pollutant availability in soil treatments. *Acta Biotechnol.* 23: 271-280.
- Poggi-Varaldo HM, Rinderknecht-Seijas N, Caffarel-Méndez S (2002) Irreversibilidad en el comportamiento adsorbtivo-desorbtivo de contaminantes en suelos y sedimentos: evaluación cuantitativa por medio de un coeficiente de histéresis diferencial. *Interciencia* 27: 180-185.
- Poggi-Varaldo HM, Moreno-Medina C, Galíndez-Mayer J, Ponce-Noyola MT, Esparza-García FJ, Ríos-Leal E, Juárez-Ramírez C, Rinderknecht-Seijas NF (2009) A review of zero-valent metals and biological treatment for the removal of chlorinated aliphatic compounds. *New Biotechnol.* 25: S255-S256.
- Santos FK, Neto ELB, Moura MC, Dantas TNC, Neto AAD (2009) Molecular behavior of ionic and nonionic surfactants in saline medium. *Coll. Surf. A* 333: 156-162.
- Shao H, Butler E (2007) The influence of iron and sulfur mineral fractions on carbon tetrachloride transformation in model anaerobic soils and sediments. *Chemosphere* 68: 1807-1813.
- Shcherbakova VA, Laurinavichius KS, Akimenko VK (1999) Toxic effect of surfactants and probable products of their biodegradation on methanogenesis in an anaerobic microbial community. *Chemosphere* 39: 1861-1870.
- Shin M, Choi H, Kim D, Baek K (2008) Effect of surfactant on reductive dechlorination of trichloroethylene by zero-valent iron. *Desalination* 223: 299-307.
- Toraason M, Butler M, Ruder A, Forrester C, Taylor L, Ashley D, Mathias P, Marlow K, Cheever K, Krieg E, Howard W (2003) Effect of perchloroethylene, smoking, and race on oxidative DNA damage in female dry cleaners. *Mutat. Res.-Gen. Tox. En.* 539: 9-18.
- US-EPA (2000) National Primary Drinking Water Standards. *Office of Water (4606M)*; EPA 816-F-03-016; www.epa.gov/safewater.
- Wang J, Wu C (2004) Biodegradation of chlorinated solvents in bioreactor landfills. *Pract. Period. Haz. Toxic Radioact. Waste Manag.* 8: 84-88.
- Zárate-Segura P, Ríos-Leal E, Esparza-García F, García-Mena J, Sanz JL, Poggi-Varaldo HM (2004) Remoción de percloroetileno en dos tipos de sistemas anaerobios continuos. *Interciencia* 29: 562-567.