

Estudios acerca de la evolución de derrames de petróleo en suelos de la Patagonia Central

Por **Stella Maris Ríos y Norma Nudelman**

Ambas especialistas coinciden en afirmar que los principales procesos que afectan al petróleo en suelos patagónicos son la volatilización, la solubilización, la sorción, la biodegradación y la fotodegradación. Esta nota profundiza los aspectos principales de los estudios acerca de la evolución de derrames de crudo en el sur argentino.

Desde el punto de vista ambiental, los compuestos orgánicos hidrofóbicos comprenden una importante gama de productos químicos, de naturaleza diversa, pero que tienen en común su alta persistencia en suelos y sedimentos. Dentro de esta categoría se incluyen compuestos presentes en el petróleo y sus derivados, breas y alquitranes; compuestos clorados en solventes comerciales y productos químicos tales como el DDT y bifenilos policlorados. Su alta adherencia y la baja tasa de liberación son un problema importante a resolver.

Como es sabido, el petróleo no posee una composición química definida debido a que las concentraciones de los componentes individuales varían para cada petróleo estudiado. En el ambiente, es una mezcla termodinámicamente inestable, con tendencia a

modificar su composición química y, como consecuencia, ésta resulta ser función del tiempo y las condiciones ambientales de exposición. La composición actual dependerá no solo del origen del petróleo crudo, sino también de la "historia" de su exposición ambiental, o sea, es un sistema multi-componente con características de variabilidad composicional de origen y de exposición que hacen que sus propiedades físicas y químicas no sean constantes ni espacial ni temporalmente. Debido a lo anterior, la aplicación de modelos ambientales para predecir su evolución es complicada, ya que de alguna forma debería contarse con la estimación de las propiedades físicas y químicas que afectan su movilidad y persistencia.

Derrames de petróleo en ambientes terrestres de Chubut y Santa Cruz Norte

Debido a las particulares condiciones geográficas y climáticas, sólo algunos de los procesos de degradación y/o transferencia entre compartimentos (geósfera, hidrósfera, etc.), cobran mayor relevancia. El suelo de la zona presenta en general un escaso contenido de materia orgánica y humedad, está formado desde el punto de vista mineralógico por areniscas limo-arcillosas. La escasa lluvia y las bajas temperaturas hacen que los procesos de biodegradación e hidrólisis no resulten tan efectivos como en otros ambientes. La infiltración y lixiviado de las fracciones de petróleo solubles

en agua pueden ser escasos debido principalmente a que la precipitación pluvial es reducida.

La volatilización es un proceso de transferencia de hidrocarburos que tiene importancia regional debido a la presencia de fuertes vientos. Además, las movibilidades de los componentes del petróleo dependen de la permeabilidad del suelo y de la presencia de hidrocarburos livianos que aseguren una baja viscosidad y por tanto faciliten el transporte, pero ésta es una condición cuya probabilidad de ocurrencia disminuye con el tiempo de exposición ambiental en el caso de un petróleo crudo.¹

En este contexto, merece especial mención el proceso de sorción de hidrocarburos, debido a que ésta no solo afecta la movilidad, sino también las velocidades de volatilización, fotólisis, hidrólisis y biodegradación. Hemos demostrado que en suelos patagónicos, debido a su escaso contenido de materia orgánica y humedad, la sorción de los componentes del petróleo, se produce principalmente por interacción con la matriz mineral y en particular con las arcillas.² Los componentes inorgánicos del suelo aportan distintos tipos de superficies sólidas sobre las cuales puede depositarse el petróleo, siendo cada una de ellas responsable de algún tipo particular de comportamiento adhesivo. Ellas son: las superficies externas de los suelos, las superficies intercapas en las arcillas y las superficies internas (macroporos, mesoporos y microporos). El comportamiento sortivo, depende del tipo de superficie mineral sobre la cual se produce la sorción, así también como de la geometría y tamaño de los poros y de la presencia de agua.

Las arcillas son particularmente efectivas para la sorción, por ejemplo, las smectitas pueden retener grandes cantidades de hidrocarburos aromáticos policíclicos y la hectorita es la que exhibe mayor capacidad seguida por la montmorillonita. La dependencia de la sorción con el tipo de compuesto también se ha puesto de manifiesto en los estudios realizados con diferentes clases de compuestos orgánicos.³ Finalmente, el tiempo de contacto entre el petróleo y el suelo, parece, también tener una importancia particular y las variaciones en la biodisponibilidad pueden interpretarse, en algunos casos, a partir de éste.

Modelos de evolución ambiental

La mayoría de los estudios de relevancia científica proponen modelos de evolución ambiental basados en la sorción de los compuestos orgánicos hidrofóbicos sobre la materia orgánica.^{4,5} Aquellos relacionados con sorción en los minerales del suelo, abarcan compuestos orgánicos puros, como el fenantreno, o pesticidas, como el DDT. O, en el mejor de los casos, a familias de compuestos orgánicos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, ácidos, fenoles, bifenilos policlorados, etcétera.^{6,7}

La generalización de esta información para el caso del petróleo resulta dudosa, aún aunque se pudiera tener acceso al conocimiento de todos los componentes y sus respectivas concentraciones y a las propiedades físicas y químicas que originan el comportamiento sortivo de cada uno de ellos (situación hipotética), por múltiples causas, entre ellas, las interacciones entre sorbentes y sorbatos bajo la existencia de cosolutos. Cada intento de reconstrucción del comportamiento del petróleo (unidad compleja) mediante las propiedades de más o menos componentes o grupos de componentes (partes aisladas) queda librado a cierto grado de especulación, debido a que aquellas propiedades de las partes que son las características que hacen a la identidad de la unidad más compleja pueden llegar a perderse debido a su desmembramiento analítico.

Aún habiendo suficiente información sobre la sorción de hidrocarburos a los componentes minerales del suelo en condiciones de interacción mutua, la historia de la evolución ambiental del petróleo depende de características climáticas propias de la región, lo cual hace imposible su reproducción en experiencias de laboratorio o la extrapolación de resultados correspondientes a otros entornos geográficos. Por lo tanto resulta esencial el estudio de derrames de petróleo en suelos, ocurridos en la región Patagónica Central, a los fines de lograr una descripción cuantitativa de los procesos involucrados, con el objeto de que, una vez estudiada y comprendida su evolución, se puedan diseñar, con fundamento científico, los planes de contingencia y las metodologías de disposición y/o remediación más convenientes.

Teniendo en cuenta este objetivo, se han estudiado derrames de petróleo en la Patagonia Central. Las áreas corresponden, mayoritariamente, a los alrededores de Comodoro Rivadavia provincia de Chubut, aunque algunas son de las cercanías de las ciudades de Cañadón Seco, Caleta Olivia y Pico Truncado, en la provincia de Santa Cruz. Los suelos contaminados pertenecen a derrames de distintas antigüedades, y han estado expuestos a diversos procesos de degradación ambiental. Teniendo en cuenta lo anterior, el término residuo de petróleo se usará para indicar, en este caso, al petróleo crudo alterado por exposición ambiental.

Los derrames fueron producidos por rotura de oleoductos, tareas relacionadas con el abandono de pozos y zonas donde históricamente se han arrojado desechos de la actividad petrolera. Proviene de distintas empresas de explotación de hidrocarburos, con lo cual se ha asegurado una visión más general y por lo tanto más abarcativa del sistema estudiado. En algunos sitios fueron realizadas tareas de bioestimulación, lo cual permitió la comparación con otros derrames que sólo estuvieron afectados por atenuación natural.

Cambios en la composición durante la exposición ambiental

Es razonable suponer que deben haber existido diferencias en la composición química original de los petróleos crudos expuestos, debido a que los residuos provienen de distintas ubicaciones geográficas, empresas de explotación de hidrocarburos y tiempos de ocurrencia. Sin embargo, las tendencias generales que encontramos, con relación a los cambios de composición durante la exposición ambiental son similares y dependen, principalmente, del tiempo de exposición⁸ y de las alteraciones sufridas, respecto a la atenuación natural. Esto avala la hipótesis de que las diferencias en composición, que originalmente deberían haber tenido los crudos expuestos, parecen no ser decisivas al momento de evaluar las transformaciones ocurridas, y que las condiciones ambientales de exposición, son las que condicionarían el comportamiento general de los mismos.

Caracterización mediante índices de *weathering*

Una de las formas tradicionales de cuantificar los cambios en la composición ha sido el seguimiento de índices de *weathering* en base a cromatografía gaseosa (GC), a pesar del hecho de que este método, según las técnicas usualmente utilizadas, solo detecta los componentes volátiles y semivolátiles del petróleo y sus residuos. Una importante cantidad de compuestos detectables por GC son, a la vez, susceptibles a la biodegradación, con lo cual las alteraciones globales de los otros componentes y los productos de transformación no volátiles no estarían igualmente caracterizados. Por otro lado, si bien algunos índices cambian en función de si los residuos fueron bioestimulados o no, hay otros que no lo hacen, con lo cual cabría preguntarse si resulta válido evaluar, por ejemplo, los resultados de una estimulación asistida utilizando solamente los índices que mayor sensibilidad acusan a la misma.

En este sentido el empleo de otras técnicas analíticas, como la Espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear Protónica (1H NMR), permite realizar un análisis estructural de petróleos, sus subproductos y residuos, basados en la clasificación de átomos de hidrógeno según sus entornos físicos y químicos. Este punto de vista, por ser más general, permitiría hacer una evaluación más adecuada de las transformaciones del conjunto de componentes originales del crudo y de los productos de su transformación ambiental. Es una técnica que se puede aplicar a fracciones de alto peso molecular y/o muestras de hidrocarburos no fraccionados y, además, la interpretación cualitativa del análisis espectral permite, simultáneamente, la identificación de grupos funcionales, lo que resulta relevante para el entendimiento de los procesos de transformación involucrados.

Evolución en la Patagonia Central

En base a información relevada mediante distintas técnicas analíticas,⁹ se puede inferir que los más importantes cambios en la composición ocurren desde el inicio del derrame hasta un

período de tiempo que puede variar entre los siete a diez años de exposición ambiental, según los índices utilizados y para residuos con atenuación natural, únicamente. A partir de ese momento, las modificaciones en la composición química parecen ocurrir mucho más lentamente, lo cual sugiere una probable estabilización de los mismos. La fracción polar de un residuo joven se caracteriza por la presencia de grupos funcionales mayoritariamente relacionados con hidrógenos intercambiables por 1H NMR (alcoholes y ácidos) en las cadenas alifáticas y por la presencia de grupos funcionales en las estructuras aromáticas (fenoles, éteres, etc.). Si bien se reconoce que la biomasa bacteriana podría aportar algunos de estos componentes, también los productos intermedios de la biodegradación y la fotodegradación estarían en condiciones de hacerlo, con lo cual cabría tener presente que la toxicidad de los mismos podría variar respecto a la original.

La bioestimulación parece acelerar considerablemente, la estabilización de los residuos. Cabe, sin embargo, hacer una reflexión con relación a la misma. Uno de los principales factores que complica los estudios ambientales, es el hecho de que resulta sumamente difícil, y en muchos casos imposible, poder aislar un proceso en particular. Las tareas relacionadas con el acondicionamiento de los lugares de derrame para la fertilización asistida y/o la inoculación de bacterias, trae aparejado el movimiento del terreno y la puesta en contacto con soluciones acuosas (regado). Dichas tareas promueven la ocurrencia conjunta de los procesos de volatilización, sorción-desorción y solubilización de algunas fracciones con la posterior posibilidad de infiltración. Además la fotodegradación, que es importante en las condiciones ambientales locales, también se ve favorecida al verse facilitada la exposición al sol y el contacto con una fase acuosa. El conjunto de todos estos procesos, frecuentemente complementados entre sí, contribuiría a acelerar la estabilización de los residuos.

Modelo en base a consideraciones de solubilidad

El comportamiento de los componentes del petróleo en fase acuosa es de

suma importancia debido a que en dicha fase se produce el transporte y la mayor parte de los procesos de transformación. Por lo tanto, la selección de técnicas de tratamiento y prácticas de gerenciamiento, deberían incluir el conocimiento de estas relaciones para las condiciones ambientales particulares de la Patagonia Central.

Un efecto importante: la salinidad

Un factor que frecuentemente complica la relación de suelos contaminados con hidrocarburos es la salinidad. La misma tiene dos orígenes, el propio suelo (generalmente son sódicos-salinos) y la contaminación conjunta por aguas de producción.

Una forma de evaluar su efecto es mediante la estimación de los coeficientes de distribución ya que los mismos cuantifican la relación entre el petróleo sorbido en la fase mineral y el petróleo soluble en una fase líquida. Cuanto mayor sea este coeficiente menor será la fracción soluble y por lo tanto, como en dicha fase, suceden la mayoría de los procesos de interés degradativo-dispersivo, menor será la factibilidad de su ocurrencia. Los coeficientes de distribución, K_d , en general aumentan con la salinidad de la fase líquida. Dicha salinidad resulta estar relacionada con la salinidad del suelo y con la salinidad del agua que entra en contacto con el residuo (ej. precipitación pluvial).¹⁰ Esta dependencia, así también como la incidencia de la antigüedad del residuo sobre la predicción de los valores de K_d , y demás consideraciones anteriores, las hemos involucrado en un modelo empírico de reciente creación, diseñado en base a información regional.¹¹

La solubilidad de los residuos de petróleo, en general, puede ser ponderada por comparación con la solubilidad en agua de compuestos orgánicos puros. Un modelo que trate de representar la evolución ambiental de derrames de petróleo en suelos, por lo tanto, debería realizar algunas consideraciones en relación a dichas características.¹² De acuerdo a las investigaciones realizadas, resulta conveniente dividir en tres etapas distintas la evolución, las cuales representarían distintos entornos en cuanto a las características de hidrosolubilidad del petróleo. Ellas son: a)

hidrofóbica, b) hidrofílica y c) poco hidrofílica.

El ambiente hidrofóbico corresponde al inicio del derrame, cuando el residuo contiene una alta proporción de componentes alifáticos y la baja viscosidad del crudo favorece su movilidad. Mientras que el hidrofílico corresponde a residuos de dos a siete años de tiempo de exposición, cuando existe una alta proporción de componentes polares, como resultado de los procesos degradativos y se han volatilizado aquellos componentes con altas presiones de vapor. Finalmente el ambiente poco hidrofílico se verifica para tiempos posteriores, cuando los componentes polares se han perdido y la composición del residuo, en cuanto a grupos mayoritarios, se mantendría aproximadamente constante.

Ambiente hidrofóbico

Más del 76% de los componentes, de los petróleos crudos estudiados en la Cuenca del golfo San Jorge, son compuestos no-polares y corresponden a las fracciones alifáticas y aromáticas, respectivamente. Por lo tanto si se considera a un componente de la mezcla en particular, este se encontraría básicamente inmerso en un entorno no-polar. Al entrar en contacto con el suelo, interactúa con las superficies minerales, las que en general presentan un reducido contenido de agua debido a las características climáticas locales. Por lo tanto, la sorción y la distribución inicial se produce entre una fase sólida (minerales) y una fase líquida no polar (ambiente hidrofóbico). En estas condiciones, el suelo seco aumenta la velocidad de sorción y el agua, por lo tanto, ejercería un efecto inhibitorio sobre la misma. La presencia de arcillas es otro factor importante que condiciona la extensión del fenómeno de sorción y el tipo de interacciones entre componentes (figura 1). La figura muestra que, cuando el contenido de arcillas es bajo, las interacciones son similares. Pero, cuando el contenido de arcillas es alto, existen importantes diferencias entre el comportamiento del

petróleo y el de sus fracciones. El alto grado de sorción de la fracción polar está de acuerdo con la presencia de atracciones electrostáticas y de van der Waals entre los compuestos orgánicos y la superficie mineral. El hecho de que la sorción aumente con el contenido de arcillas podría, en principio, atribuirse al aumento del área superficial ocasionado por las mismas, pero debido a que se observa un comportamiento diferencial de las distintas fracciones, el resultado sugiere la existencia de interacciones fuertes y específicas entre

los componentes polares del sorbato y las arcillas en la interfase; lo que es coincidente con el modelo que propusimos antes.

Ambiente hidrofílico

Luego de producidos los primeros contactos entre el petróleo y los minerales del suelo, la movilidad disminuye debido a la pérdida de los componentes más volátiles. La exposición en el ambiente, además, produce

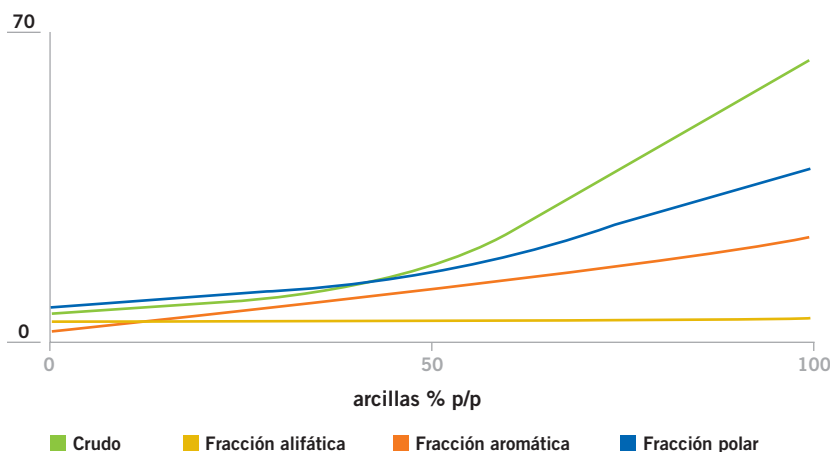


Figura 1. Comportamiento sortivo del petróleo en función del contenido de arcillas del suelo

una serie de cambios composicionales que derivan en la afectación consecuente de su comportamiento sortivo. Esta situación corresponde al análisis de las muestras que presentan de dos a siete años de exposición.

La relación entre los componentes alifáticos y aromáticos respecto a los polares es baja si se los compara con los petróleos crudos y los residuos más antiguos, lo cual indica un aumento de los componentes polares y una disminución de los componentes alifáticos.¹³ Los resultados obtenidos por las técnicas de GC y por espectroscopía de ¹H RMN, son muy valiosos al aportar datos estructurales que confirman con mayor detalle, la presunción anterior.

En general, las constantes de distribución en fase acuosa de estos residuos dependen principalmente del contenido iónico de la misma. A medida que la fase líquida se hace menos polar que el agua las constantes de distribución disminuyen o sea aumenta el grado de solubilidad en dicha fase, lo cual indica que si bien estos residuos presentan características hidrofílicas, si se los compara con los petróleos crudos y residuos más antiguos, resultan ser igualmente una mezcla de características globales hidrofóbicas. En estas condiciones, su movilización se produciría, en general, como una fase separada.

Ambiente poco hidrofílico

Luego de, aproximadamente, siete a diez años de exposición ambiental, los residuos presentarían, en general, características poco hidrofílicas. La relación entre los componentes alifáticos y aromáticos respecto a los polares es alta

comparada con los residuos más nuevos pero, en general, es baja en relación a los petróleos crudos, lo cual indicaría una disminución de los componentes polares. Además, las constantes de distribución son altas y similares, comparadas con los residuos más nuevos, lo cual indica un aumento del grado de sorción en los minerales del suelo, que no parece incrementarse, sustancialmente a tiempos posteriores.

Nuevamente, los resultados obtenidos por espectroscopía de ¹H RMN aportan información valiosa que confirma las consideraciones anteriores.

Fotodegradación: un proceso poco estudiado

Si bien es conocida la importancia de las reacciones fotoquímicas como mecanismo de degradación de las fracciones aromáticas de petróleos, en ambientes acuáticos, no han sido igualmente evaluadas las reacciones de degradación fotoinducidas en suelos. Posiblemente debido a que las velocidades de transformación son sensiblemente inferiores en suelo que en medios acuáticos.

Mediante ensayos de fotodegradación en los cuales se utilizó al sol como fuente de luz, se pudo determinar que los residuos de petróleo presentan una potencialidad fotodegradativa residual, a pesar del transcurso del tiempo de exposición ambiental. Los catalizadores utilizados fueron dióxido de titanio, peróxido de hidrógeno y el reactivo de Fenton los cuales generarían la especie oxidativa primaria que es el radical hidroxilo (OH[•]).¹⁴

La fotodegradación catalizada de

residuos de petróleos en suelos podría traer aparejado un aumento, no comprobado experimentalmente en este caso, de la toxicidad del residuo remanente ya que, en lo que se refiere a la fotodegradación de petróleo crudo en agua de mar, se sabe que la toxicidad de la fracción soluble aumenta con el tiempo de irradiación. Sin embargo existe también evidencia experimental en ambientes marinos en relación a que la presencia de reacciones fotoinducidas ejercería un efecto sinérgico de la biodegradación del petróleo, al convertir componentes no polares en polares. De esta forma una alteración de los coeficientes de distribución de los residuos podría mejorar su biodisponibilidad favoreciendo la biodegradación de fracciones resistentes.

Riesgo ambiental

Desde hace bastante tiempo, es conocido que la determinación de hidrocarburos totales (TPH) en suelo, no resultaría ser la mejor técnica analítica para el seguimiento de la degradación.¹⁵ Otras metodologías, basadas en la definición y seguimiento de componentes individuales como algunos hidrocarburos alifáticos y/o aromáticos policíclicos en el residuo o en sus lixiviados, parecerían más adecuadas.^{16,17} En este sentido el método RBCA (Risk Based Corrective Action) trata de avanzar relacionando al punto final de una remediación con un criterio de riesgo asociado a la presencia de ciertos componentes peligrosos, cuya toxicidad individual es bien conocida y está convenientemente documentada.¹⁸

Sin embargo, como se ha dicho anteriormente, el petróleo y sus residuos se comportan como un todo, por lo tanto puede cuestionarse la validez de separar algunos componentes en particular. Además las condiciones generales de exposición hacen que aún en el caso de tener la misma composición química, un cambio en la salinidad del suelo, por ejemplo, puede ocasionar modificaciones en su comportamiento.

Por lo tanto, la evaluación del riesgo y como consecuencia la determinación del punto final de un tratamiento deberían estar basadas en consideraciones acerca de la toxicidad que más se acerquen a las condiciones imperantes en la situación real, es decir, la situación de campo.

En este sentido, la utilización de tests de toxicidad sobre especies regionales, basados en la medición de algún efecto cuantificable, podría servir a tales fines. En el caso particular de la toxicidad de hidrocarburos en suelos patagónicos, las especies vegetales y animales posiblemente afectadas, a pesar de ser escasas, son de fundamental importancia para el mantenimiento del equilibrio ecológico regional. Por otro lado se debe considerar la presencia de las fracciones solubles en agua de los hidrocarburos derramados o de sus productos de degradación, las cuales podrían resultar tóxicas al ser asimiladas durante los procesos osmóticos radiculares en plantas desarrolladas o durante la germinación de semillas.

La implementación de tests de toxicidad en etapa de germinación, basados en especies regionales como las semillas de *Grindella chilensis* (nombre vulgar: botón de oro) resultan de utilidad. Esta planta perenne está ampliamente distribuida en toda la Patagonia argentina y frecuentemente se la puede encontrar inclusive con un buen desarrollo en suelos contaminados con residuos de petróleo degradados.¹⁹ Además, se ha utilizando en tareas de repoblamiento vegetal. La evaluación del progreso de un tratamiento podría ser evaluado en función de índices como CE50% (concentración de efecto que inhibe en un 50% la germinación de la especie) ya que según La Grega y colaboradores:²⁰ "la inclusión de las pruebas de toxicidad entre las tareas de gestión de residuos puede suponer una ventaja en el proceso de toma de decisiones y en el logro de soluciones eficaces y económicas a largo plazo".

¿Fotodegradación y/o biodegradación?

Finalmente cabe hacer una reflexión en relación a la fotodegradación y a su posible utilidad como método alternativo o complementario de tratamiento. Tanto en el caso de la biodegradación como en el de la fotodegradación o como en el caso de cualquier metodología de remediación *in situ*,²¹ es necesaria una evaluación más integral y rigurosa de sus eficiencias, que tenga en cuenta no solamente cuan rápido desaparecen ciertos componentes del residuo, sino que además evalúe en qué se transforman y fundamentalmente cuál es el destino final de los productos formados. En este sentido, considerar la toxicidad de los residuos remanentes, con o sin tratamiento y/o a distintos tiempos y/o a distintas profundidades, podría ser importante en la definición de formas alternativas de tratamiento y punto final de la remediación. Los tests de ecotoxicidad sobre los suelos contaminados y las fracciones solubles de los mismos, podrían utilizarse como herramienta válida para la definición y cuantificación de riesgo ya que presentan la ventaja, respecto de los tests convencionales, de estar basados en algunas de las especies con potencialidad efectiva de afectación.

Conclusiones

Los principales procesos que afectan al petróleo en suelos patagónicos son la volatilización, solubilización, sorción, biodegradación y fotodegradación. Debido al escaso contenido de materia orgánica y humedad del suelo, la sorción de los componentes del petróleo,

se produce principalmente por interacción con la matriz mineral y en particular con las arcillas. Las tendencias generales encontradas, con relación a los cambios de composición durante la exposición ambiental dependen, principalmente, del tiempo de exposición y de las alteraciones sufridas, respecto a la atenuación natural.

Los cambios más importantes ocurren desde el inicio del derrame hasta un período que puede variar entre los siete a diez años de exposición, como lo demuestra la detallada información estructural obtenida por espectroscopia de RMN, los residuos jóvenes contienen una gran cantidad de compuestos polares. La salinidad del suelo es un factor importante y en general los coeficientes de distribución, K_d , aumentan con la salinidad de la fase líquida, la cual resulta estar relacionada con la salinidad del suelo y con la salinidad del agua que entra en contacto con el residuo.

Debido a que el comportamiento del petróleo en fase acuosa es de suma importancia desde el punto de vista ambiental, se ha propuesto un modelo de evolución basado en las características de hidrosolubilidad del mismo. Además, los residuos presentan una potencialidad fotodegradativa, aún remanente después de un elevado tiempo de exposición, lo cual sugeriría que ésta podría ser una forma alternativa de tratamiento. Sin embargo, se señala la necesidad de una evaluación rigurosa de los productos formados durante las remediaciones y, fundamentalmente, del destino final de los mismos, así como también del seguimiento de la toxicidad durante los tratamientos, para una evaluación global del riesgo ambiental.

Stella Maris Ríos es licenciada en Química egresada de la UBA con posgrado en Ingeniería de reservorios de la explotación de hidrocarburos (Facultad de Ingeniería UBA) y especialización en Ciencias químicas y ambiente (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA). Se desempeñó como ingeniera de reservorios en YPF, yacimiento Comodoro Rivadavia, durante once años (1980-1991). Actualmente es profesora regular en la Facultad de Ciencias Naturales de la UNPSJB, sede Comodoro Rivadavia. Durante su actividad académica en la UNPSJB, desde 1991 a la fecha, ha participado en la dirección de proyectos de investigación y tesis de grado, desempeñándose, además, como coordinadora de la carrera de Técnico universitario en Protección y saneamiento ambiental y directora del Departamento de Química. Las investigaciones llevadas a cabo en el tema abarcan publicaciones en revistas científico-tecnológicas y exposiciones en congresos de relevancia internacional, además de las realizadas localmente.

Norma Sbarbati Nudelman es profesora titular plenaria en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, miembro de la carrera de Investigador científico del Conicet, en la categoría de investigador superior, y miembro titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas y Naturales. Ha realizado estudios posdoctorales en el MIT (Cambridge, MA), en la Universidad de California (Santa Cruz, CA) y en la Universidad de East Anglia (Norwich, Inglaterra). Ha sido profesora visitante en universidades de Europa, América y Asia y conferencista plenaria en congresos internacionales en países de los mismos continentes. Es miembro titular del Committee on Chemical Research Applied to the World Needs (CHEMRAWN) de la IUPAC, miembro asociado del Committee on Chemistry Education de la IUPAC y miembro de la Comisión Directiva de la Asociación Química Argentina. Además, es directora de la carrera de Especialización en ciencias químicas y ambiente de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, y miembro del Comité de Maestría en Ciencias ambientales de la misma facultad. Es editora del libro química sustentable, UNL, 2004 y miembro del Editorial Board of Environmental Technology. Es autora de dos libros y de cuatro capítulos de libros, de más de 170 trabajos de investigación originales en publicaciones científicas de difusión internacional, aproximadamente de trescientas comunicaciones en congresos nacionales e internacionales y directora de dieciocho tesis de doctorado ya aprobadas, además de dirigir cuatro en la actualidad.

Bibliografía

- ¹ Ríos, S. M., "Evaluaciones de impacto ambiental en ambientes afectados por la explotación petrolera", en *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 35, febrero de 1998.
- ² Nudelman, N.; Ríos, S. M.; Katusich, O., "Interactions between Crude Oil and Patagonian Soil as a Function of Clay-Water Content and Time", en *Environmental Technology*, 21, 437, 2000.
- ³ Ríos, S. M.; Nudelman, N.; "Multilayer Sorption Model for the Interactions between Crude Oil and Clay in Patagonian Soils", en *Journal of Dispersion Science and Technology*, 26, 1, 1, 2005.
- ⁴ Lebouef, E. J.; Weber, W. J., Jr., "A Distributed Reactivity Model for Sorption by Soils and Sediments. 8. Sorbent Organic Domains: Discovery of Humic Acid Glass Transition and an Argument for a Polymer-Based Model", en *Environmental Science and Technology*, 31, 1697, 1997.
- ⁵ Nam, K.; Chung, N.; Alexandre, M., "Relationship between Organic Matter Content of Soil and the Sequestration of Phenanthrene", en *Environmental Science and Technology*, 32, 3785, 1998.
- ⁶ Boyd, S. A.; Sheng, G.; Peppen, B. J.; Johnston, T., "Mechanisms for the Adsorption of Substituted Nitrobenzenes by Smectites Clays", en *Environmental Science and Technology*, 35, 4227, 2001.
- ⁷ Hundal, L. S.; Thompson, M. L.; Laird, D. A.; Carmo A. M., "Sorption of Phenanthrene by Reference Smectites", en *Environmental Science and Technology*, 35, 3456, 2001.
- ⁸ Nudelman, N.; Ríos, S. M.; Katusich, O., "Fate of the Oil Residual Patagonian Soils. Effects of the Environmental Exposure Time", en *Soil and Sediment Contamination*, abril/mayo de 2002.
- ⁹ Ríos, S. M.; Nudelman, N., "Natural Attenuation of Oil Spills in Patagonian Soils. Characterization by ¹H NMR Spectroscopy", en *Environmental Science and Technology*, enviado, noviembre de 2004.
- ¹⁰ Ríos, S. M.; Nudelman, N.; Katusich, O., "Effects of Solution and Soil Chemistry on the Distribution of Oil Residuals in Patagonian Soils", en *Latin American Applied Research Journal*, 34, 149, 2004.
- ¹¹ Ríos, S. M.; Nudelman, N., *Environmental Science & Technology*, enviado, 2004.
- ¹² Nudelman, N.; Ríos, S. M.; Katusich, O., "Organic Cosolvent Effect on the Estimation of the Equilibrium Aqueous Concentrations of the Oil Residuals in Patagonian Soils", en *Environmental Technology*, 23, 9, 961, 2002.
- ¹³ Nudelman, N.; Ríos, S. M., "Interaction of Oil Residues in Patagonian Soil", en *Interfacial Applications in Environmental Engineering*, Estados Unidos, Marcel Dekker Publication, pp. 139-164, 2002.
- ¹⁴ Ríos, S. M.; Nudelman, N.; Katusich, O., "Estudios cinéticos de fotodegradación de residuos de petróleo en suelos", en *Anales de la Sociedad Química Argentina*, 88, 83, 2001.
- ¹⁵ USA EPA, *Test Methods for Evaluation Solid Waste*, SW-846, 3ra. ed., Washington, DC.
- ¹⁶ Stout, S. A.; Uhler, A. D.; McCarty K. J., "A Strategy and Methodology for Defensibly Correlating Spilled Oil to Source Candidates", en *Environmental Forensics*, 2, 87, 2001.
- ¹⁷ Braddock, J. F.; Lindstrom, J. E.; Prince, R. C., "Weathering of a Subarctic Oil Spill over 25 years: the Caribou-Poker Creeks Research Watershed Experiment", en *Cold Regions Science and Technology*, 36, 11, 2003.
- ¹⁸ ASTM PS-104 Standard Provisional Guidance for RBCA.
- ¹⁹ Ríos, S. M., "Contaminación de suelos por la explotación petrolera. Fitotoxicidad en etapa de germinación", en *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 49, marzo de 2000.
- ²⁰ LaGrega, M. D.; Buckingham, P. L.; Evans, J. C., *Gestión de residuos tóxicos*, Madrid, Mc. Graw Hill, 1996.
- ²¹ Khan, F. I.; Husain, T.; Hejazi, R., "An Overview and Analysis of Site Remediation Technologie", en *Journal of Environmental Management*, 71, 95, 2004.