

## Efectos potenciales ecológicos y para la salud humana de los hidrocarburos de petróleo y metales en sedimentos hallados en el Oriente ecuatoriano

Por Dominic M. Di Toro

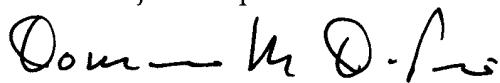
### Resumen biográfico del autor:

El Dr. Dominic M. Di Toro, uno de los consultores principales de HydroQual, es un experto de renombre internacional en el desarrollo de métodos basados en biodisponibilidad para la fijación de criterios de calidad de aguas y sedimentos y en la elaboración de marcos de modelación para aplicar estos métodos. El Dr. Di Toro se ha especializado en la elaboración y aplicación de análisis matemáticos y estadísticos a problemas de calidad de agua y sedimentos en corrientes de agua, lagos, estuarios y litorales. Recientemente, su trabajo se ha centrado en la elaboración de criterios de calidad de agua y sedimentos para la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (USEPA), en modelos de flujo de sedimentos para nutrientes y metales y modelos integrales hidrodinámicos de transporte de sedimento y calidad de agua. Ha publicado más de cien estudios técnicos, así como el libro titulado Modelación de Flujo de Sedimentos, publicado por J. Wiley & Sons. Ha participado como consultor experto, investigador principal y gerente de proyecto en numerosos estudios de calidad de agua para la industria, fundaciones de investigación y entidades gubernamentales.

El Dr. Di Toro ha participado y dirigido numerosos proyectos de control de calidad de agua involucrando modelación matemática. Estos estudios abarcan un análisis del impacto de fuentes no puntuales de desechos, municipales e industriales, sobre la calidad del agua, incluyendo oxígeno disuelto, coliformes, nutrientes y eutroficación, pH, temperatura y sustancias químicas tales como materiales tóxicos. Su investigación ha llevado a la elaboración de modelos de calidad de agua interactivos para análisis de sedimento-columna de agua. La mayoría de estos estudios han requerido la creación de asignaciones de cargas de desechos basadas en fundamentos técnicos.

### Certificación del autor:

El informe adjunto representa fielmente mis conocimientos y opiniones sobre este tema.



Firma del autor:

October 24 2007

Fecha:

**Efectos potenciales ecológicos y para la salud humana de los hidrocarburos de petróleo y metales en sedimentos hallados en el Oriente ecuatoriano**

**Por Joy McGrath**

**Resumen biográfico de la autora:**

La Sra. Joy A. McGrath, Gerente de Proyecto Principal en HydroQual, cuenta con más de 15 años de experiencia en el campo de la ingeniería ambiental. Su experiencia abarca la elaboración de criterios de calidad de sedimentos, evaluaciones de procesos de tratamiento de aguas residuales y modelación de destino de contaminantes. Se especializa en la elaboración de criterios de calidad de agua y sedimentos con énfasis particular en hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y metales. Es coautora de los borradores de documentos de la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (USEPA) sobre Valores de Referencia para Partición de Equilibrio en Sedimentos para mezclas de HAP y mezclas de metales. En la actualidad, está trabajando en la aplicación de este tipo de pautas a lugares contaminados con HAP procedentes del petróleo. La Sra. McGrath tiene más de 5 años de experiencia de trabajo en asuntos relacionados con petróleo para una importante empresa petrolera.

**Certificación de la autora:**

El informe adjunto representa fielmente mis conocimientos y opiniones sobre este tema.

Firma de la autora:



Fecha:

*October 25, 2007.*

## **Efectos potenciales ecológicos y para la salud humana de los hidrocarburos de petróleo y metales en sedimento hallados en el Oriente ecuatoriano**

**Coautor: John Slocomb, Ph.D.**

### **Resumen biográfico del coautor:**

John Slocomb es Consultor Principal en ENTRIX, Inc., y tiene más de 25 años de experiencia en evaluación de riesgos, análisis de impacto ambiental, manejo de recursos naturales y estadística ambiental. Ha gestionado evaluaciones de riesgos ecológicos y para la salud humana en sitios del programa Superfund en los Estados Unidos y ha desempeñado un papel fundamental en su diseño, análisis y en asuntos de comunicaciones públicas. El Dr. Slocomb ha trabajado estrechamente con administradores de recursos naturales en los Estados Unidos para elaborar métodos estadísticos espaciales destinados a evaluar efectos económicos en ambientes complejos y ha llevado a cabo análisis geoquímicas forenses e identificación de fuentes contaminantes empleando métodos estadísticos multivariados. El Dr. Slocomb ha realizado numerosas interventorías y evaluaciones de referenciamiento ambiental y ha elaborado estrategias de gestión de riesgos para la industria del petróleo y el gas en los Estados Unidos, Suramérica e Indonesia. Ha trabajado con dirigentes corporativos a nivel de la alta gerencia en la creación de estrategias de manejo de riesgos para mitigar amenazas a la salud pública derivadas de exposición a descargas de aguas residuales, invasión de activos operativos y dependencia perjudicial. Ha elaborado un proceso sistemático de manejo de riesgos ambientales que se emplea para identificar amenazas ambientales, evaluar riesgos, elaborar acciones de respuestas costo-eficientes, y elaborar e implementar planes de manejo de riesgos. El Dr. Slocomb también ha llevado a cabo numerosas evaluaciones de daños a recursos naturales (NRDA, por sus siglas en inglés) asociados con derrames de sustancias químicas y petróleo y ha empleado análisis de equivalencia de hábitat para determinar la pérdida de servicios ecológicos y la magnitud de proyectos de restauración. Cuenta con amplia experiencia en la aplicación de métodos estadísticos a problemas ambientales y ha empleado simulación Monte Carlo en evaluaciones de riesgo probabilísticas para la ecología y la salud humana, así como en investigaciones que van desde el análisis de la estructura de comunidades piscícolas hasta el control de procesos industriales. También es experto en el diseño de muestreos estadísticos para estudios de vegetación y fauna, investigaciones de marca y recaptura, elaboración de estimativos de parámetros estadísticos a partir de datos de censos y estimativos de tamaños de muestra. El Dr. Slocomb ha prestado apoyo estadístico a ingenieros de proceso, personal de manejo de residuos sólidos, especialistas en recuperación de energía, científicos ambientales, biólogos especializados en flora y fauna, y toxicólogos ambientales. Ha prestado sus servicios en litigios en temas de investigaciones ambientales en grandes lagos, asignación de Cargas Totales Máximas Diarias (TMDL, por sus siglas en inglés), derrames de petróleo y sustancias químicas, y en la toxicidad de efluentes industriales para peces, invertebrados acuáticos y organismos benthicos. Ha diseñado y analizado estadísticamente pruebas de toxicidad de sedimentos para evaluar los efectos de lodos de perforación sobre organismos en los sedimentos. También ha brindado apoyo técnico a las industrias petrolera, minera y química en materia de riesgos ecológicos y para la salud humana asociados con la exposición a HAP, BTEX, DDT, PCB, MTBE y metales. El Dr. Slocomb es miembro de la Asociación Americana de Estadística, la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química, y la Sociedad de Análisis de Riesgos.

### **Certificación del autor:**

El informe adjunto representa fielmente mis conocimientos y opiniones sobre este tema.



Firma del coautor:

Fecha:

01 Oct 2007

# EFFECTOS POTENCIALES ECOLÓGICOS Y PARA LA SALUD HUMANA DE LOS HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO Y METALES HALLADOS EN LOS SEDIMENTOS EN EL ORIENTE ECUATORIANO

**Dominic M. Di Toro<sup>1</sup> y Joy McGrath<sup>1</sup>**  
**HydroQual, Inc. Mahwah, Nueva Jersey**

**John Slocumb<sup>2</sup>**  
**Entrix, Inc. Houston, Texas**

*1 de Octubre del 2007*

**Resumen.** Se alega que la presencia de metales, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos (BTEX) en los sedimentos de las corrientes de agua (ríos y esteros) ubicadas en el Oriente ecuatoriano ha producido efectos adversos ecológicos y para la salud humana. Para verificar la validez de dicho alegato, se compararon las concentraciones de estos constituyentes medidos en 55 muestras de sedimentos recolectadas durante las Inspecciones Judiciales de los sitios realizadas durante el período del 2004 al 2006 tanto en las estaciones de producción como en los sitios de pozo con las pautas de calidad de los sedimentos (*Sediment Quality Guidelines* o SQG, por sus siglas en inglés) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y con los valores de referencia para la partición en equilibrio en sedimentos (*Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks* o ESB, por sus siglas en inglés) establecidos para la protección de organismos en sedimentos, así como también se compararon con los valores de evaluación de suelos (*Soil Screening Levels* o SSL, por sus siglas en inglés) fijados con el propósito de proteger la salud humana. El objetivo consistió en determinar si podía considerarse que alguno de los constituyentes era un constituyente de preocupación potencial (COPC, por sus siglas en inglés), lo cual indicaría la posibilidad de efectos adversos. Los resultados de este análisis conservador de valores de evaluación indican que, al comparar las concentraciones de los metales, BTEX y HAP con los criterios apropiados, las concentraciones de hidrocarburos y metales presentes en los sedimentos no constituyen un riesgo significativo para el medio ambiente ni para la salud humana. Por lo tanto, no se justifica la remediación de dichos sedimentos.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio consiste en determinar si las concentraciones de metales, HAP y BTEX medidas en los sedimentos de los cuerpos de agua en el Oriente ecuatoriano son suficientemente altas para tener efectos potencialmente dañinos sobre organismos acuáticos presentes en los sedimentos y sobre personas que pudieran llegar a tener contacto con los sedimentos. Para cumplir con este objetivo, se compararon las

---

<sup>1</sup> Colaboró en el análisis de HAP, BTEX y metales en relación con la protección de organismos en el sedimento.

<sup>2</sup> Colaboró en el análisis de HAP, BTEX y metales en relación con la protección de la salud humana y en el análisis de metales en relación con la protección de organismos en el sedimento.

concentraciones de estos constituyentes en las muestras de sedimentos con los criterios de evaluación establecidos para proteger la salud humana y la vida acuática. Si se hallara que la concentración medida de un constituyente estuviera por encima del criterio respectivo, se consideraría que dicho constituyente es un constituyente de preocupación potencial (COPC) para la salud humana o la vida acuática. Por el contrario, si se hallara que la concentración estuviera por debajo de su criterio, no se consideraría que el constituyente es un COPC y, por lo tanto, no se consideraría que representa un riesgo potencial ecológico ni tampoco para la salud humana.

Las comparaciones con los criterios se realizaron empleando concentraciones de HAP, BTEX y metales sedimentarios medidos en muestras recolectadas durante las Inspecciones Judiciales de los sitios de pozo y las estaciones de producción en los campos Sacha, Lago Agrio, Shushufindi y Aguarico hasta marzo de 2006. Los datos de sedimentos constaron de 55 muestras, que abarcaban profundidades de entre 0.0 M (superficie) y 1.9 M. Típicamente, se considera que un sedimento de una profundidad entre 0 y 15 cm se encuentra dentro de la zona biológicamente activa dado que la mayoría de los organismos se hallan dentro de estos confines. Sin embargo, en esta evaluación, se emplean todas las profundidades de las muestras para obtener resultados aún más conservadores. A continuación se presenta una lista de sitios donde se recolectaron muestras de sedimentos empleadas en la evaluación presentada en este estudio:

<b>Sacha</b>	<b>Shushufindi</b>	<b>Estaciones de producción</b>
SA 21	SSF 13	SSF Suroeste
SA 85	SSF 67	SSF Sur
		SSF Norte
		LA Norte
		SA Central
		Aguarico
		SA Sur
		SA Norte 2

## **CRITERIOS DE EVALUACIÓN**

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) ha establecido pautas para calidad de sedimentos (SQG) para metales específicos y valores de referencia para la partición en equilibrio en sedimentos (ESB) específicamente para los HAP, cuyos niveles protegen a los organismos que habitan en los sedimentos (USEPA 2000; 2003) (**Tabla 1**). Nótese que los ESB para BTEX presentados en la **Tabla 1** fueron calculados empleando la metodología derivada para HAP (véase la exposición que aparece a continuación). Estos SQG y ESB especifican las concentraciones por encima de las cuales puede presentarse toxicidad crónica.

Ni Ecuador, la Organización Mundial de la Salud (OMS), la USEPA, ni otros países latinoamericanos han establecido pautas o criterios de calidad de sedimentos basados en la salud humana. Sin embargo, la USEPA ha establecido niveles de evaluación de suelos (SSL) que tienen por objeto proteger la salud humana (**Tabla 2**). A fin de determinar si los niveles de metales, HAP y BTEX en los sedimentos pueden considerarse COPC para la salud humana, se emplearon los SSL como criterios (USEPA 1996 a y b), basado en el supuesto conservador de que la exposición humana a sedimentos podría ser comparable con la exposición crónica a suelos. El método generalmente aceptado para evaluar las amenazas al ambiente y la salud pública que resultan de la exposición a hidrocarburos de petróleo consiste en medir constituyentes específicos de hidrocarburos que se sabe son peligrosos como por ejemplo, los HAP y BTEX. Se cuantifican analíticamente los valores de cada uno de estos compuestos y luego se emplean para evaluar los efectos ecológicos o sobre la salud pública.

El presente estudio no evalúa los efectos adversos potenciales sobre receptores acuáticos o seres humanos causados por la exposición a los hidrocarburos totales de petróleo (TPH, por sus siglas in inglés) dado que la USEPA no ha establecido SSL ni SQG para TPH. Las mediciones de TPH solas no pueden utilizarse para evaluar los peligros para el ambiente ni la salud pública debido a la incapacidad de distinguir entre materiales peligrosos y no peligrosos. Este punto se ilustra claramente a través de los numerosos materiales no peligrosos presentes en la naturaleza que contienen altas concentraciones de TPH. Por ejemplo, se encuentran concentraciones elevadas de TPH en muchos materiales naturales, como por ejemplo turba vegetal (3,700 mg/kg), agujas de pino (19,000 mg/kg), estiércol de vaca (12,000 mg/kg) y heno (4,500 mg/kg). También se detectan altas concentraciones en hojas secas (7,100 mg/kg), hierba (14,000 mg/kg), y semillas de arce (7,100 mg/kg) (Método USEPA 418.1 1991/92). Incluso en la vaselina empleada en el hogar que contiene aproximadamente 750,000 mg de TPH/kg. Por ello, incluso pequeñas cantidades de estos materiales orgánicos en los sedimentos pueden resultar en altos niveles de TPH que no reflejan la presencia de hidrocarburos de petróleo.

#### **CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS**

Por lo general, el sedimento se define como la mezcla de material natural orgánico e inorgánico subyacente a las aguas superficiales de corrientes de agua. El sedimento está compuesto por agua, una fase inorgánica conformada por arcillas, arena, grava y otros fragmentos minerales, así como una fase orgánica conformada por materia orgánica natural en varios estados de descomposición (Ingersoll 1995). El agua es el principal componente que rodea las partículas orgánicas e inorgánicas y, con frecuencia, se denomina agua intersticial o de poro, la cual normalmente representa un 20-50% del volumen del sedimento. El siguiente componente de mayor presencia es la fase inorgánica, que representa un 45-80% del volumen del sedimento. El componente de menor presencia es la fase orgánica, que por lo general constituye 1-4% del volumen del sedimento.

Las características físicas del sedimento varían de un lugar a otro a lo largo de las trayectorias de corrientes de agua, dependiendo principalmente de la velocidad del agua

(Wetzel 1983). En los tramos de flujo rápido, se transportan aguas abajo las partículas de sedimento orgánicas e inorgánicas más pequeñas y se depositan en áreas en donde el flujo del agua se disminuye lo suficiente como para permitir que las partículas se asienten en la superficie del sedimento. En tramos de flujo relativamente rápido, el sedimento consta principalmente de partículas inorgánicas y orgánicas más pesadas, como son la arena, grava, cantos rodados, troncos y tallos de plantas grandes que resisten el movimiento del flujo de agua. En tramos de flujo más lento, el sedimento contiene cantidades comparativamente mayores de arcillas, arena y material orgánico de grano fino. Dichos cuerpos de agua de movimiento lento son típicos del Oriente ecuatoriano.

Los materiales inorgánicos originales que ocurren naturalmente en los terrenos aledaños a una corriente de agua determinan, en gran medida, las concentraciones de constituyentes inorgánicos en el sedimento (Allan 1995). Por ejemplo, las concentraciones de metales hallados en el suelo adyacente a las corrientes de agua y las cantidades halladas en el sedimento, con frecuencia, son similares, lo cual indica la conexión natural que existe entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. De manera similar, el contenido orgánico del sedimento indica la presencia natural de materiales originales en los terrenos circundantes. Los materiales en forma de partículas, como son las hojas y los tallos de plantas en diversos estados de descomposición, caen en las corrientes de agua o son arrastrados hacia ellas durante las lluvias y llegan a formar parte del sedimento. Una vez en el sedimento, dicho material continúa descomponiéndose a través de las acciones de bacterias y hongos, que son parte de la flora y la fauna que naturalmente habitan en el sedimento. Una gran parte de la energía que se requiere para sostener a otros organismos en una corriente de agua (por ejemplo, los peces) se deriva de este material orgánico original.

El sedimento forma un hábitat crítico para las bacterias, los hongos, las algas, los insectos y otros organismos que, colectivamente, forman una comunidad de organismos que residen principalmente en los 15 cm superiores del sedimento. Esta área en donde se encuentra la mayoría de los organismos, con frecuencia, se denomina zona biológicamente activa. Entre otros factores, el tamaño de las partículas, la corriente de agua, la temperatura, el oxígeno disuelto y la cantidad de material orgánico viviente y no viviente, determinan la composición y diversidad de esta comunidad.

El sedimento se considera el cimiento de los ecosistemas acuáticos de la misma manera que el suelo constituye el cimiento de los sistemas terrestres. El material orgánico sedimentario proporciona una fuente de alimento crítica para muchos organismos acuáticos; y estos organismos, a su vez, son una fuente de alimento para insectos acuáticos predadores de mayor tamaño y para peces. Finalmente, la salud de toda la cadena trófica acuática, incluyendo los peces y las aves y mamíferos que se alimentan de peces, depende de la calidad del sedimento y la salud de estos organismos.

## **TOXICIDAD POTENCIAL PARA LOS ORGANISMOS EN EL SEDIMENTO**

### **Hidrocarburos**

Se midieron las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos (comúnmente denominados BTEX) y dieciséis hidrocarburos aromáticos policíclicos originales (HAP) en varios sedimentos recolectados en el Oriente durante las Inspecciones Judiciales realizadas en el período de agosto de 2004 a marzo de 2006. En la **Tabla 3** se presenta un listado de las muestras y las concentraciones de BTEX y los 16 HAP. En dicha tabla figura, además, se incluye el porcentaje de carbono orgánico total (TOC, por sus siglas en inglés). Las concentraciones que aparecen en blanco indican que todas las sustancias químicas arrojaron resultados inferiores a los valores reportados de límite de detección.

Para evaluar si los HAP tienen un impacto adverso potencial sobre la comunidad béntica a las concentraciones medidas, se empleó el método de la USEPA para evaluar la toxicidad del sedimento con mezclas de HAP (USEPA, 2003) basado en el Modelo de Lípidos Objetivo (o *Target Lipid Model*) elaborado anteriormente (Di Toro *et al.* 2000; Di Toro y McGrath, 2000). El método requiere que se calcule la toxicidad de la mezcla de HAP en cada muestra de sedimento. Se calcula una unidad tóxica (TU, por sus siglas en inglés) para cada HAP *i* medido en el sedimento,  $TU_{HAPi}$ , dividiendo la concentración de sedimento normalizado a carbono orgánico,  $C_{OC,HAPi}$ , por el valor de referencia de equilibrio en sedimentos (ESB) de la USEPA,  $C_{OC,HAPi,FCVi}$ , de la siguiente manera:

$$TU_{HAPi} = \frac{C_{OC,HAPi}}{C_{OC,HAPi,FCVi}}$$

donde las unidades de las concentraciones en el numerador y el denominador son similares (es decir,  $\mu\text{g/g OC}$ ). Para cada muestra de sedimento, se calcula la toxicidad de la mezcla de HAP sumando las Unidades Tóxicas (TU) de los componentes individuales.

$$TU_{mezcla} = \sum_i TU_{HAPi}$$

En teoría, si la mezcla de Unidades Tóxicas es mayor que o igual a uno, es probable que se presente un efecto adverso como resultado de la exposición a dicho sedimento. Sin embargo, cabe resaltar que un valor de 1.0 para el parámetro de Unidad Tóxica no constituye un valor absoluto. Di Toro *et al.* (2000) reportaron un factor de incertidumbre de dos en el cálculo de las Unidades Tóxicas. Para mezclas con un total de Unidades Tóxicas mayor a 2.0, era probable que se presentaran efectos. De manera similar, para mezclas con un total de Unidades Tóxicas inferior a 0.5, era poco probable que se presentaran efectos. Los efectos para mezclas con un total de Unidades Tóxicas de entre 0.5 y 2.0 eran inciertos.

Se midieron 16 HAP en las muestras de sedimentos del Oriente. Sin embargo, para evaluar los sedimentos, la USEPA define la toxicidad total de los HAP como la suma de Unidades Tóxicas de 34 HAP, lo que incluye los HAP originales y sus alquilatos homólogos. La USEPA proporciona factores promedio de ajuste para convertir las Unidades Tóxicas computadas a partir de subconjuntos de 13 HAP o 23 HAP del total de 34 HAP para obtener el equivalente tóxico de 34 HAP. Esta conversión se realiza cuando



no se dispone de concentraciones de los 34 HAP, como es el caso de las muestras de sedimento en este estudio. Para las muestras de sedimento, se midieron los 13 HAP que conforman el subconjunto de 13 HAP. Debido a que sólo se midieron 16 HAP, en este caso no regía el subconjunto de 23 HAP. Para convertir la toxicidad de los 13 HAP a la toxicidad de HAP totales, se multiplica la suma de Unidades Tóxicas de los 13 HAP por 2.75. Al ajustar la toxicidad de los 13 HAP a su equivalente de 34 HAP, se reduce la incertidumbre asociada con los HAP no medidos.

No puede ignorarse la toxicidad asociada con los BTEX en los sedimentos en el cálculo de la toxicidad total. Los BTEX son hidrocarburos cuya modalidad de acción es similar a la de los HAP (Di Toro *et al.* 2000). Para ser consistentes con la teoría de aditividad empleada en la derivación de los ESB para HAP, se calcula la toxicidad asociada con los BTEX y se añade a la toxicidad de los HAP totales. La toxicidad de los BTEX se calcula empleando la metodología ESB de la USEPA. Para cada componente de BTEX, se calcula la Unidad Tóxica dividiendo la concentración en sedimento normalizada a carbono orgánico por el ESB específico para esa sustancia química. Los ESB se calcularon para los BTEX y oscilaron entre 208 µg/g OC para benceno y 315 µg/g OC para xilenos. En este análisis, se supuso que los BTEX y los HAP tenían niveles de toxicidad similares. Éste es un enfoque conservador ya que los HAP son ligeramente más tóxicos para las comunidades bénticas que los BTEX (Di Toro *et al.* 2000).

En la **Tabla 3** se presenta un resumen de la evaluación de toxicidad para los HAP y BTEX. Para cada muestra de sedimento, se presenta la Unidad Tóxica de BTEX, 16 HAP, 13 HAP y HAP totales. Las Unidades Tóxicas de cada muestra se calcularon sumando las Unidades Tóxicas de los BTEX y las Unidades Tóxicas de los HAP totales. Para sedimentos que no tenían una concentración de TOC correspondiente, se empleó la concentración promedio de TOC de 3.2%. Para los cálculos, todas las medidas calificadas con “J” (valores estimados) se consideraron como valores reales. Se realizó una evaluación inicial suponiendo que los valores reportados por debajo de los límites de detección eran iguales a cero. Para este escenario, el total de Unidades Tóxicas para todas las muestras de sedimento fue inferior a 0.5, lo cual indica que no es probable que se presenten efectos adversos a raíz de la exposición a sedimentos. Las Unidades Tóxicas totales para sedimento de una estación, SSF-SO-JI-SED 3, fue 1.13, cifra que está dentro del área de incertidumbre. En esta situación, es posible que se observen o no los efectos. En la **Figura 1** (parte superior) se presenta una distribución de probabilidad del total de Unidades Tóxicas calculadas para cada muestra de sedimento. Cabe resaltar que la contribución de BTEX al cálculo de las Unidades Tóxicas es muy baja.

Los resultados de la evaluación de toxicidad de los BTEX y HAP se basaron en valores de concentraciones medidas. Sin embargo, la mayoría de los datos resultaron por debajo de los niveles de detección del método. Para estos casos se reportaron los valores límites de detección. En los cálculos de toxicidad, es poco probable que el valor límite de detección para cada compuesto sea la concentración real. A fin de probar la importancia de los compuestos no detectados, se supone que la concentración es igual a la mitad del límite de detección. El total de Unidades Tóxicas de los BTEX y HAP se calculó utilizando la mitad de los valores límite de detección. Los resultados se resumen en la

**Tabla 3** y la **Figura 1** (parte inferior). Este enfoque cambió la predicción de toxicidad para sólo una muestra de sedimento SA-C-JI-SED4. Sin embargo, esto parece ser consecuencia de la baja concentración de TOC en esta muestra. En la evaluación inicial, no se pudo hacer una predicción de toxicidad debido a que todas las concentraciones de HAP y BTEX resultaron estar por debajo de los valores límite de detección. El total de Unidades Tóxicas en esta ubicación fue 0.76, lo que coloca el nivel de toxicidad en el área de incertidumbre. Sin embargo, el nivel de TOC registrado en este sedimento estuvo por debajo de 0.2% y la normalización con carbono orgánico no es válida a una concentración tan baja de TOC (Di Toro *et al.* 1991). Por lo tanto, la evaluación de toxicidad empleando esta metodología sobreestimó la toxicidad en esta muestra. Por consiguiente, incluso empleando el método muy conservador de integrar los valores de detección para la evaluación de toxicidad demuestra que no hay toxicidad debido a BTEX y HAP en estos sedimentos.

### **Metales**

Los metales no tienen un mecanismo de toxicidad común, por lo tanto, no tiene sentido calcular un índice de toxicidad a una mezcla de metales. Se supone que la toxicidad de los metales ocurre como resultado de la reacción del ión metálico libre con puntos específicos de unión fisiológicamente activos en el lugar de acción (USEPA 1999). Por ejemplo, los puntos de unión de metales en los peces parecen ser las membranas superficiales de las branquias. En el caso de los peces y los organismos en el sedimento, se acepta que la concentración total de un metal no constituye una buena medida de exposición que pueda relacionarse directamente con la toxicidad de los organismos en el sedimento. No obstante, la biodisponibilidad de un metal (es decir, la cantidad de metal disponible en el sedimento que pudiera causar toxicidad) típicamente es menor que la concentración total. Dado que las concentraciones máximas de metales totales están por debajo de los valores SQG, es seguro que la porción biodisponible con respecto al total tampoco sea tóxica para los organismos en el sedimento.

La USEPA ha derivado valores ESB para mezclas de metales de cadmio, cobre, plomo, níquel, plata y zinc (USEPA, 2005). Recientemente se reportaron los datos que sustentan este método, así como una extensión del método (Di Toro *et al.* 2005). Para poder emplear esta metodología, es necesario tener medidas de sulfuro volátil ácido (AVS, por sus siglas en inglés) y de la concentración de metales extraídos simultáneamente (SEM, por sus siglas en inglés) con el sulfuro. La biodisponibilidad de estos metales se relaciona con la cantidad de sulfuro volátil ácido (AVS) de manera tal que un mol de AVS se adhiera a un mol de SEM. La excepción es la plata, que requiere que se adhieran dos moles de plata con un mol de AVS. Si la concentración molar total de SEM es menor o igual a la concentración molar total de AVS, no se prevén efectos adversos a partir del SEM. Se pueden presentar efectos cuando existe un exceso de SEM. Debido a que no se midió ni el SEM ni el AVS, esta metodología no puede utilizarse para evaluar la toxicidad de estos metales.

Sin embargo, las concentraciones totales de metales pueden compararse con las pautas basadas en consenso de la USEPA. Se ha publicado una discusión sobre la utilidad de estas pautas y su relación con las pautas mecanísticas disponibles (Wenning e Ingersoll,

2005). Las pautas basadas en consenso no se fundamentan en la causalidad. Por el contrario, fueron elaboradas en base a los sedimentos recolectados en campo que pueden haber estado contaminados con muchos constituyentes, incluyendo metales. La idea es que si el sedimento está contaminado, tendrá altas concentraciones de muchos constituyentes. Las pautas basadas en consenso realmente son parámetros que califican a los sedimentos que están contaminados y que pueden causar efectos tóxicos. Este método resulta razonable en vista de los datos de que se dispone.

Los resultados de las comparaciones revelan que las concentraciones máximas de metales en todas las muestras, con excepción de una, están por debajo de los valores asociados SQG de USEPA y, por lo tanto, los metales no se pueden considerar como COPC para receptores ecológicos (**Tabla 4**). Una muestra única recolectada en un pantano a aproximadamente 100 M al norte de la tubería de desagüe en el costado norte de la estación de producción Shushufindi Suroeste (SSF-SO-JI-SED2) excedió ligeramente el SQG para níquel en 5.4 mg/kg. Con esta única excepción, las concentraciones de todos los metales se encuentran por debajo de los niveles en los cuales podría presentarse toxicidad. Por lo tanto, no se justifica evaluar más a fondo los riesgos que presentan los metales a los organismos que habitan en el sedimento. Es importante resaltar que también deben considerarse las concentraciones de fondo de metales en el sedimento, dado que el valor SQG de algunos metales puede ser equivalente a los valores de fondo de los metales en algunas áreas del mundo o incluso menor que éstos. Los valores de fondo de los metales en los suelos del Oriente ecuatoriano se presentan en la Tabla 5.

#### **RIESGOS POTENCIALES PARA LA SALUD HUMANA**

Para evaluar los posibles riesgos a la salud humana, se compararon las concentraciones máximas medidas de metales sedimentarios, HAP y BTEX con los SSL (**Tabla 5**). Según se comentó anteriormente, no existen criterios de calidad de sedimento para evaluar los peligros para la salud humana, por lo que se utilizaron los SSL para suelo a fin de evaluar si debía considerarse alguno de los constituyentes del sedimento un COPC. El uso de los valores SSL para evaluar los peligros del suelo se basa en factores específicos de exposición, como son la frecuencia de la exposición, duración de la exposición, y las tasas de ingestión directa, así como de inhalación, entre otros. Por ejemplo, la USEPA (1996b) emplea una frecuencia de exposición de 350 días/año y una ingestión de suelo de 200 mg/día para elaborar un valor SSL asociado con ingestión de un constituyente no cancerígeno en suelo residencial. Sin embargo, es probable que la duración de la exposición y la tasa de ingestión o inhalación del sedimento sea significativamente menor que para el suelo residencial, lo que hace que las comparaciones de concentraciones de constituyentes sedimentarios con valores SSL sean muy conservadoras. Una concentración en el suelo (o sedimento) por encima de un SSL significa que se justifica considerar y evaluar más a fondo el sitio. No significa que se hayan presentado efectos para la salud humana ni tampoco que es probable que se presenten.

Los resultados de estas comparaciones revelan que los constituyentes no excedieron los SSL correspondientes (**Tabla 5**). Por lo tanto, es evidente que ningún constituyente es un

COPC y no hay riesgos significativos para la salud humana por exposición a sedimentos en el Oriente ecuatoriano.

## **ACCIÓN DE REMEDIACIÓN BASADA EN RIESGOS**

La USEPA ha elaborado un proceso de toma de decisiones basado en riesgos (1989;1998) para decidir si es necesaria la acción de remediación para proteger la salud humana y el medio ambiente de la exposición a constituyentes dañinos presentes en un lugar. Canadá, Nueva Zelanda y los Países Bajos también han adoptado la toma de decisiones basada en riesgos en sus programas de manejo y limpieza de sitios contaminados. En los Estados Unidos, normalmente se realiza la evaluación de la necesidad de acciones de remediación en un lugar en una serie de pasos cada vez más complejos. El primer paso consiste en la evaluación de los valores de detección para determinar si hay presencia de sustancias químicas potencialmente nocivas y, si es así, se procede a determinar si dichas concentraciones exceden los valores de referencia conservadores que indican amenaza potencial para la salud humana (SSL). Si la presencia de sustancias químicas no excede los valores de detección, ello significa que no hay presencia de COPC. Si no se identifican constituyentes COPC, se elimina la necesidad de tomar medidas adicionales, inclusive acciones de remediación. Dados los resultados presentados en este estudio, no es necesario realizar acciones de remediación adicionales.

## **CONCLUSIONES**

En base a los resultados presentados en este estudio, no es probable que haya efectos adversos ecológicos ni para la salud humana debidos a HAP, BTEX y metales en los sedimentos en el Oriente. Se detectaron hidrocarburos de petróleo (HAP y BTEX) en los sedimentos en cuerpos de agua, pero las concentraciones halladas estaban por debajo de los niveles que podrían producir toxicidad crónica a organismos o resultar en riesgos para la salud humana. Se determinó que la toxicidad aditiva de la mezcla de HAP y BTEX también se hallaba por debajo de niveles que podrían ser tóxicos. De manera similar, no se hallaron metales a concentraciones por encima de las cuales podrían presentarse efectos ecológicos adversos (con la excepción de una única muestra en un pantano). Los metales hallados también se encontraban por debajo de los valores SSL para efectos sobre la salud humana y podrían simplemente indicar valores de metales presentes naturalmente en las tierras que rodean a las corrientes de agua. No hay necesidad de iniciar acciones de remediación para retirar sedimentos contaminados de las corrientes de agua (ríos y esteros) analizadas en el Oriente hasta la fecha, dado que ningún constituyente (HAP, BTEX o metales) representa un riesgo significativo para la salud ni para los receptores ecológicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allan JD. 1995. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. [*Ecología de los arroyos*] Chapman Hall, Londres, 388 pp.
- American Petroleum Institute (API). 1995. Metals Criteria for Land Management of Exploration and Production Wastes: Technical Support Document for API Recommended Guidance Values. [*Criterios para metales en el manejo de tierras destinadas a desechos de exploración y producción; Documento de apoyo técnico para los valores guía recomendados por el API*] Publicación API Nro. 4600, Washington, D.C.
- Di Toro DM, Zarba CS, Hansen DJ, Berry WJ, Swartz RC, Cowan CE, Pavlou SP, Allen HE, Thomas NA, Paquin PR. 1991. Technical basis for establishing sediment quality criteria for nonionic organic chemicals by using equilibrium partitioning. Environmental Toxicology and Chemistry. [*Fundamento técnico para la creación de criterios de calidad de sedimentos para sustancias químicas no-iónicas empleando la partición en equilibrio. Toxicología y Química Ambiental*] 10:1541-1583.
- Di Toro DM, McGrath JA, Hansen DJ. 2000. Technical basis for narcotic chemicals and polycyclic aromatic hydrocarbon criteria. I. Water and tissue. Environmental Toxicology and Chemistry. [*Fundamento técnico para el establecimiento de criterios para sustancias químicas narcóticas e hidrocarburos policíclicos aromáticos. Toxicología y Química Ambiental*] 19:1951-1970.
- Di Toro DM and McGrath JA. 2000. Technical basis for narcotic chemicals and polycyclic aromatic hydrocarbon criteria, II. Mixtures and sediments. Environmental Toxicology and Chemistry. [*Fundamento técnico para el establecimiento de criterios para sustancias químicas narcóticas e hidrocarburos policíclicos aromáticos II. Toxicología y Química Ambiental*] 19:1971-1982.
- Di Toro DM, McGrath J M, Hansen DJ, Berry WJ, Paquin PR, Mathew R., Wu KB, Santore RC. 2005. Predicting Sediment Metal Toxicity Using a Sediment Biotic Ligand Model: Methodology and Initial Application. Environmental Toxicology and Chemistry. [*Predicción de la toxicidad de metales en sedimentos mediante un modelo de ligandos bióticos en el sedimento*] 24:2410-2427.
- Ingersoll CG. 1995. Sediment tests, In (G. M. Rand, ed.) Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Fate, and Risk Assessment [*Aspectos fundamentales de toxicología acuática: Efectos, Destino y Evaluación de Riesgos*], Taylor and Francis, Washington, D. C., 1125 pp.
- U.S. Environmental Protection Agency. [*Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] 1989. Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I Human Health Evaluation Manual, [*Guía para la Evaluación de Riesgo en Superfund, Vol I. Manual para la Evaluación de Impactos a la Salud Humana*] Office of

- Emergency and Remedial Response [*Oficina de Respuestas de Emergencia y Remediación*], OSWER Directive 9285.7-01a, September 29, 1989.
- U.S. Environmental Protection Agency Method 418.1 [*Método 418.1 de la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] Total Recoverable Hydrocarbons by IR, Groundwater Analytical Bulletin, Buzzards Bay, MA, [*Análisis de Hidrocarburos recuperables totales por espectroscopia de infrarrojo. Boletín de la empresa Groundwater Analytical, Buzzards Bay, Massachussets*] Groundwater Analytical Inc., Winter 1991/92.
- U.S. Environmental Protection Agency. [*Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] 1996a. Soil Screening Guidance: Technical Background Document [*Guía para el análisis de suelos: Documento de antecedentes técnicos*]. EPA/540/R95/128, Office of Solid Waste and Emergency Response [*División de Desechos Sólidos y Respuesta a Emergencias*], Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency. [*Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] 1996b. Soil Screening Guidance: User's Guide. [*Guía para el análisis de suelos: Guía para el usuario*] Publicación 9355.4-23, Office of Solid Waste and Emergency Response [*División de Desechos Sólidos y Respuesta a Emergencias*], Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency. [*Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] 1998. Guidelines for Ecological Risk Assessment. Office of Research and Development [*División de Investigación y Desarrollo*], April 1998, EPA/630/R-002F, Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency. [*Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] 1999. Integrated Approach to Assessing Bioavailability and Toxicity of Metals in Surface Water and Sediment. [*Enfoque integral para evaluar la biodisponibilidad y toxicidad de los metales en aguas superficiales y sedimentos*] EPA-822-E-99-001, Office of Water and Research and Development, [*División de Aguas e Investigación y Desarrollo*] Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency. [*Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] 2000. Prediction of Sediment Toxicity Using Consensus-based Freshwater Sediment Quality Guidelines [*Predicción de la toxicidad de sedimentos mediante el uso de pautas de calidad de sedimentos en agua dulce basadas en consenso*], EPA 905/R-00/007.
- U.S. Environmental Protection Agency. [*Agencia de Protección Ambiental Estadounidense*] 2003. Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: PAH Mixtures. [*Procedimientos para obtener valores de referencia de partición en equilibrio en sedimentos (ESB) para la protección de organismos bénticos:*

- mezclas de HAP*] EPA/600/R-02/013. Office of Research and Development. [División de Investigación y Desarrollo] Washington, D.C. USA.
- U.S. Environmental Protection Agency. [Agencia de Protección Ambiental Estadounidense] 2005. Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: Metals Mixtures (Cadmium, Copper, Lead, Nickel, Silver and Zinc. [Procedimientos para obtener valores de referencia de partición en equilibrio en sedimentos (ESB) para la protección de organismos bénticos: mezclas de metales (cadmio, cobre, plomo, níquel, plata y zinc] EPA/600/R-02/011. Office of Research and Development. [División de Investigación y Desarrollo] Washington, D.C. USA.
- Venezuela, Decreto 2635. 1998. Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos. Gaceta Oficial Extraordinaria No. 5245
- Wenning RJ and Ingersoll CG. (Eds.) 2005. Use of Sediment Quality Guidelines and Related Tools for the Assessment of Contaminated Sediments Pensacola, FL [El uso de las pautas de calidad de sedimentos y herramientas afines para la evaluación de sedimentos contaminados Pensacola, Florida]: SETAC Press.
- Wetzel RG. 1983. Limnology [Limnología] (2<sup>nd</sup> Ed.). Sanders College Publishing, Nueva York, 767 pp.



**Tabla 1.** Pautas de calidad de sedimentos (SQGs) y Valores de referencia para la partición en equilibrio en sedimentos (ESBs) para metales, BTEX, y HAP. Se emplearon SQG y ESB en la evaluación de la calidad del sedimento para la protección de organismos que habitan en el sedimento.

CONSTITUYENTE	N° CAS	SQG o ESB	REFERENCIA
<b>Metales (MÉTODO 6010B EPA SW-846)</b>			
Bario, mg/kg	7440393	<i>ND</i>	<i>NA</i>
Cadmio, mg/kg	7440439	4,98	USEPA 2000
Cromo (total), mg/kg	7440473	111	USEPA 2000
Cromo VI, mg/kg	18540299	16	USEPA 2000
Cobre, mg/kg	7440508	149	USEPA 2000
Plomo, mg/kg	7439921	128	USEPA 2000
Mercurio, mg/kg	7439976	1,06	USEPA 2000
Níquel, mg/kg	7440020	48,6	USEPA 2000
Vanadio, mg/kg	7440622	<i>ND</i>	<i>NA</i>
Zinc, mg/kg	7440666	459	USEPA 2000
<b>BTEX (MÉTODO 8260B EPA SW-846)</b>			
Benceno, µg/g OC	71432	208	USEPA 2003 <sup>1</sup>
Tolueno, µg/g OC	108883	260	USEPA 2003 <sup>1</sup>
Etilbenceno, µg/g OC	100414	310	USEPA 2003 <sup>1</sup>
Xileno (total), µg/g OC	1330207	315	USEPA 2003 <sup>1</sup>
<b>HAP (MÉTODO 8270C EPA SW-846)</b>			
Acenafteno, µg/g OC	83329	491	USEPA 2003
Acenaftileno, µg/g OC	208968	452	USEPA 2003
Antraceno, µg/g OC	120127	594	USEPA 2003
Benzo(a)antraceno, µg/g OC	56553	841	USEPA 2003
Benzo(a)pireno, µg/g OC	50328	965	USEPA 2003
Benzo(b)fluoranteno, µg/g OC	205992	979	USEPA 2003
Benzo(g,h,i)perileno, µg/g OC	191242	1095	USEPA 2003
Benzo(k)fluoranteno, µg/g OC	207089	981	USEPA 2003
Criseno, µg/g OC	218019	844	USEPA 2003
Dibenzo(a,h)antraceno, µg/g OC	53703	1123	USEPA 2003
Fluoranteno, µg/g OC	206440	707	USEPA 2003
Fluoreno, µg/g OC	86737	538	USEPA 2003
Indeno(1,2,3-cd)pireno, µg/g OC	193395	1115	USEPA 2003
Naftaleno, µg/g OC	91203	385	USEPA 2003
Fenantreno, µg/g OC	85018	596	USEPA 2003
Pireno, µg/g OC	129000	697	USEPA 2003

*ND* = no se ha determinado para este constituyente; *NA* = no rige en este caso

<sup>1</sup> Se empleó la metodología de USEPA para obtener este criterio

**Tabla 2.** Valores de evaluación del suelo (SSL) de la USEPA para metales, benceno, tolueno, etilbenceno, xileno (BTEX), e hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP) que protegen la salud humana. Se emplearon los SSL para evaluar la calidad del sedimento.

CONSTITUYENTE	N° CAS	VALOR DE EVALUACIÓN DEL SUELO (MG/KG)	REFERENCIA
<b>METALES (MÉTODO 6010B EPA SW-846)</b>			
Bario	7440393	20000*	
Cadmio	7440439	78	USEPA 1996a
Cromo (total)	7440473	390	USEPA 1996a
Cromo VI	18540299	390	USEPA 1996a
Cobre	7440508	3100	USEPA 1996a
Plomo	7439921	400	USEPA 1996a
Mercurio	7439976	10	USEPA 1996a
Níquel	7440020	1600	USEPA 1996a
Vanadio	7440622	550	USEPA 1996a
Zinc	7440666	23000	USEPA 1996a
<b>BTEX (MÉTODO 8260B EPA SW-846)</b>			
Benceno	71432	8	USEPA 1996a
Tolueno	108883	650	USEPA 1996a
Etilbenceno	100414	400	USEPA 1996a
Xileno (total)	1330207	410	USEPA 1996a
<b>HAP (MÉTODO 8270C EPA SW-846)</b>			
Acenafteno	83329	4700	USEPA 1996a
Acenaftileno	208968	4700	USEPA 1996a
Antraceno	120127	23000	USEPA 1996a
Benzo(a)antraceno	56553	9	USEPA 1996a
Benzo(a)pireno	50328	0,9	USEPA 1996a
Benzo(b)fluoranteno	205992	9	USEPA 1996a
Benzo(g,h,i)perileno	191242	2300	USEPA 1996a
Benzo(k)fluoranteno	207089	90	USEPA 1996a
Criseno	218019	880	USEPA 1996a
Dibenzo(a,h)antraceno	53703	0,9	USEPA 1996a
Fluoranteno	206440	3100	USEPA 1996a
Fluoreno	86737	3100	USEPA 1996a
Indeno(1,2,3-cd)pireno	193395	9	USEPA 1996a
Naftaleno	91203	3100	USEPA 1996a
Fenantreno	85018	2300	USEPA 1996a
Pireno	129000	2300	USEPA 1996a

\* La única fuente potencial de Bario asociada con actividades en los campos petroleros es la barita (sulfato de barrio). La USEPA ha determinado que: "Datos sobre seres humanos y animales indican que el sulfato de bario prácticamente no es tóxico para los seres humanos y otras especies de mamíferos" (USEPA, 1993)

**Tabla 3. Resumen de la evaluación de toxicidad**

Ubicación de la estación		Concentraciones para valores límite de detección supuestos de 0 mg/kg						Concentraciones para valores límite de detección supuestos de 1/2 DL						Efectos?	
		Total BTEX (µg/kg) <sup>1</sup>	Total HAP (µg/kg) <sup>2</sup>	TOC (%) <sup>3</sup>	Unidad tóxica BTEX	Unidad tóxica 16PAH <sup>4</sup>	Unidad tóxica 13PAH <sup>5</sup>	Unidad tóxica Total PAH <sup>6</sup>	Total unidades tóxicas PAH + BTEX <sup>7</sup>	Unidad tóxica BTEX	Unidad tóxica 16PAH <sup>4</sup>	Unidad tóxica 13PAH <sup>5</sup>	Total unidades tóxicas PAH <sup>6</sup>		Total unidades tóxicas PAH + BTEX <sup>7</sup>
AG_PS	RB-EAG-A1-DUP1		2765	5,39		0,082	0,081	0,224	0,224	0,001	0,082	0,081	0,224	0,225	poco probable
AG_PS	RB-EAG-A1-SE1		2374	5,35		0,071	0,071	0,194	0,194	0,001	0,071	0,071	0,194	0,195	poco probable
AG_PS	RB-EAG-A1-SE2		60,26	1,68		0,005	0,004	0,010	0,010	0,001	0,005	0,004	0,010	0,011	poco probable
AG_PS	RB-EAG-A1-SE3		71	1,18		0,008	0,008	0,021	0,021	0,002	0,012	0,011	0,031	0,033	poco probable
AG_PS	RB-EAG-A1-SE3-DUP2		46	1,03		0,006	0,006	0,017	0,017	0,002	0,012	0,011	0,031	0,033	poco probable
AG_PS	RB-EAG-A1-SE4			2,65						0,001	0,007	0,006	0,017	0,018	poco probable
LANorte_PS	JI-LAN ESTB-SED1-SS		1168	4,93		0,032	0,030	0,083	0,083	0,001	0,032	0,030	0,083	0,084	poco probable
LANorte_PS	LA-N-JI-SED4		4594	4,48		0,149	0,145	0,398	0,398	0,001	0,149	0,145	0,398	0,399	poco probable
LANorte_PS	LA-N-JI-SED5		1546	5,51		0,033	0,030	0,081	0,081	0,001	0,033	0,030	0,082	0,083	poco probable
SA-021	SA-21-JI-SED1		66	1,31		0,005	0,005	0,014	0,014	0,000	0,013	0,011	0,031	0,031	poco probable
SA-085	SA85-JI-SED1			5,08						0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	poco probable
SACentral_PS	SA-C-JI-SED1			1,22						0,003	0,009	0,007	0,019	0,022	poco probable
SACentral_PS	SA-C-JI-SED2			0,123J						0,029	0,038	0,030	0,083	0,112	poco probable
SACentral_PS	SA-C-JI-SED3			0,07J						0,052	0,131	0,104	0,287	0,339	poco probable
SACentral_PS	SA-C-JI-SED4			<0,039						0,193	0,262	0,207	0,569	0,762 <sup>8</sup>	incierto
SANorte2_PS	JI-SA-NORTE2-SED3			4,67						0,001	0,019	0,017	0,046	0,046	poco probable
SANorte2_PS	JI-SA-NORTE2-SED4			0,28						0,007	0,021	0,019	0,051	0,058	poco probable
SANorte2_PS	JI-SA-NORTE2-SED5	3		0,73	0,002				0,002	0,004	0,008	0,007	0,020	0,024	poco probable
SANorte2_PS	JI-SA-NORTE2-SED-DUP1	7		0,34	0,008				0,008	0,008	0,018	0,016	0,043	0,051	poco probable
SSF-13	RB-SSF-13-A1-SE1-RO-(SS)		1953	3,19		0,091	0,087	0,240	0,240	0,001	0,091	0,087	0,240	0,241	poco probable
SSF-13	RB-SSF-13-A2-SE2-RO-(SS)		106,7	2,99		0,004	0,004	0,011	0,011	0,001	0,004	0,004	0,011	0,012	poco probable
SSF-25	JI-SSF25-A1-SD1-(0.0M)			3,2						0,001	0,007	0,006	0,017	0,018	poco probable
SSF-67	SSF-67-JI-SED1	6		2,62	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,003	0,009	0,011	poco probable
SSFNorte_PS	JI-SSFN-RBC-(SS)-0.0M		790,7	3,2	0,000	0,040	0,039	0,107	0,107	0,002	0,040	0,039	0,107	0,109	poco probable
SSFNorte_PS	JI-SSFN-RBC-(SS)-0.7M		150,7	3,2	0,000	0,006	0,005	0,013	0,013	0,002	0,006	0,005	0,014	0,015	poco probable
SSFNorte_PS	JI-SSFN-RBC-(SS)-1.0M		1695,6	3,2	0,000	0,084	0,082	0,226	0,226	0,002	0,084	0,082	0,226	0,228	poco probable
SSFNorte_PS	JI-SSFN-RBC-(SS)-1.9M		29,98	3,2	0,000	0,002	0,002	0,004	0,004	0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	poco probable
SSFNorte_PS	SSF-NORTE-JI-SED1		73	0,945		0,009	0,009	0,025	0,025	0,005	0,014	0,013	0,035	0,040	poco probable
SSFNorte_PS	SSF-NORTE-JI-SED3	106	717,8	1,83	0,020	0,057	0,053	0,147	0,167	0,020	0,057	0,053	0,147	0,167	poco probable
SSFNorte_PS	SSF-NORTE-JI-SED4		223	1,14		0,022	0,022	0,061	0,061	0,004	0,044	0,038	0,105	0,110	poco probable
SSFNorte_PS	SSF-NORTE-JI-SED5			0,172J						0,022	0,028	0,022	0,062	0,084	poco probable

**Tabla 3. Resumen de la evaluación de toxicidad**

Ubicación de la estación	Concentraciones para valores límite de detección supuestos de 0 mg/kg								Concentraciones para valores límite de detección supuestos de 1/2 DL					Efectos?	
	Total BTEX (µg/kg) <sup>1</sup>	Total HAP (µg/kg) <sup>2</sup>	TOC (%) <sup>3</sup>	Unidad tóxica BTEX	Unidad tóxica 16PAH <sup>4</sup>	Unidad tóxica 13PAH <sup>5</sup>	Unidad tóxica Total PAH <sup>6</sup>	Total unidades tóxicas PAH + BTEX <sup>7</sup>	Unidad tóxica BTEX	Unidad tóxica 16PAH <sup>4</sup>	Unidad tóxica 13PAH <sup>5</sup>	Total unidades tóxicas PAH <sup>6</sup>	Total unidades tóxicas PAH + BTEX <sup>7</sup>		
SSFSur_PS	SSF-S-JI-DUP1-SED	18	28	1,97	0,004	0,002	0,002	0,004	0,008	0,005	0,004	0,003	0,009	0,014	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED1	17	200	2,22	0,003	0,008			0,003	0,004	0,028	0,017	0,046	0,050	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED2	27		13,3	0,001				0,001	0,002	0,002	0,001	0,003	0,005	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED3	2		5,74	0,000				0,000	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED4	4		3,8	0,000				0,000	0,002	0,002	0,002	0,005	0,006	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED5	2		1,08	0,001				0,001	0,003	0,006	0,004	0,012	0,015	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED6			0,79						0,005	0,007	0,006	0,016	0,020	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED7	18	44	5,01	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,006	0,008	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-JI-SED8	14	39	1,23	0,004	0,003	0,003	0,009	0,013	0,007	0,007	0,006	0,016	0,023	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-SED-RIO2	6		2,17	0,001				0,001	0,003	0,009	0,007	0,020	0,022	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-SED-RIO3	7		3,41	0,001				0,001	0,002	0,002	0,002	0,005	0,007	poco probable
SSFSur_PS	SSF-S-SED-RIO4			5,19						0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	poco probable
SSFSuroeste_PS	SSF-SO-JI-SED 1		51,5	3,53		0,002	0,002	0,004	0,004	0,001	0,002	0,002	0,005	0,006	poco probable
SSFSuroeste_PS	SSF-SO-JI-SED 2		9489	13		0,098	0,092	0,252	0,252	0,001	0,098	0,092	0,253	0,254	poco probable
SSFSuroeste_PS	SSF-SO-JI-SED 3	19	9798	3,97	0,002	0,424	0,410	1,127	1,129	0,002	0,426	0,412	1,132	1,134	incierto
	JI-SA-SUR-SED1-0.0M	18		3,54	0,002				0,002	0,002	0,023	0,020	0,056	0,058	poco probable
	JI-SA-SUR-SED1-0.2M	17	1192	4,35	0,002	0,039	0,036	0,100	0,102	0,002	0,039	0,037	0,100	0,102	poco probable
	JI-SA-SUR-SED2-0.0M	9		5,89	0,001				0,001	0,002	0,010	0,008	0,023	0,025	poco probable
	JI-SA-SUR-SED2-0.3M	3	7,125	1,06	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,006	0,001	0,001	0,002	0,008	poco probable
	JI-SA-SUR-SED3-0.0M			6,27						0,002	0,005	0,005	0,012	0,015	poco probable
	JI-SA-SUR-SED3-0.2M		1,96	1,05		0,000	0,000	0,001	0,001	0,006	0,000	0,000	0,001	0,007	poco probable
	JI-SA-SUR-SED4-0.0M	5	114	3,27	0,001	0,006	0,006	0,015	0,016	0,001	0,015	0,014	0,038	0,039	poco probable
	JI-SA-SUR-SED4-0.4M	3	2826	4,16	0,000	0,106	0,102	0,280	0,280	0,002	0,106	0,102	0,280	0,282	poco probable
	JI-SA-SUR-SED-DUP1	5	1409	4,09	0,001	0,050	0,047	0,129	0,130	0,002	0,051	0,047	0,130	0,132	poco probable

<sup>1</sup> Concentración total de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos medidos

<sup>2</sup> Concentración total de HAP medidos

<sup>3</sup> Los valores en negrilla representan concentración promedio de TOC medido en todas las estaciones. Para estas ubicaciones no se suministran datos de TOC.

<sup>4</sup> Unidades tóxicas calculadas a partir de los 16 HAP medidos

<sup>5</sup> Unidades tóxicas calculadas a partir de los 13 HAP principales medidos

<sup>6</sup> Unidades tóxicas calculadas a partir del total de HAP. Dicho calculo se realize tomando las unidades tóxicas de los 13 HAP principales y multiplicándolos por un factor de ajuste de 2,75.

**Tabla 3. Resumen de la evaluación de toxicidad**

Ubicación de la estación	Concentraciones para valores límite de detección supuestos de 0 mg/kg							Concentraciones para valores límite de detección supuestos de 1/2 DL					Efectos?
	Total BTEX (µg/kg) <sup>1</sup>	Total HAP (µg/kg) <sup>2</sup>	TOC (%) <sup>3</sup>	Unidad tóxica BTEX	Unidad tóxica 16PAH <sup>4</sup>	Unidad tóxica 13PAH <sup>5</sup>	Unidad tóxica Total PAH <sup>6</sup>	Total unidades tóxicas PAH + BTEX <sup>7</sup>	Unidad tóxica BTEX	Unidad tóxica 16PAH <sup>4</sup>	Unidad tóxica 13PAH <sup>5</sup>	Total unidades tóxicas PAH <sup>6</sup>	

<sup>7</sup> Unidades tóxicas calculadas a partir de los BTEX y HAP. Una unidad tóxica mayor a 2,0 indica que es probable que se observen efectos. Una unidad tóxica menor a 0.5 indica que es poco probable que se observen efectos.

<sup>8</sup> La concentración de TOC de este sedimento es demasiado baja (< 0,2); el análisis sobreestimaré la toxicidad.

Las áreas sombreadas indican que las unidades tóxicas caen dentro de un área de incertidumbre

**Tabla 4.** Comparación de las concentraciones máximas de metales medidas (mg/kg) en los sedimentos con los valores de fondo en los suelos del Oriente y con las pautas de calidad de sedimentos basadas en toxicidad crónica (SQG, mg/kg). Si las concentraciones no excedían los valores SQG, no se consideró que el constituyente fuera de preocupación potencial (COPC) para los receptores de los sedimentos.

CONSTITUYENTE	PAUTA DE CALIDAD DEL SEDIMENTO (SQG)	VALORES DE FONDO DE METALES EN EL SUELO DEL ORIENTE (MG/KG)	NRO. DETECTADO <sup>1</sup>	CONCENTRACIÓN MÁXIMA <sup>2</sup>	COPC (Sí/No)?
Bario, mg/kg	<i>ND</i>	14,5 - 2660	52	799	<i>NA</i>
Cadmio, mg/kg	4,98	<0,02 - 3,3	34	1,5	<b>NO</b>
Cromo (total), mg/kg *	111	5,5 - 118	23	38	<b>NO</b>
Cromo VI, mg/kg	16	<0,026 - 0,113	1	1,1	<b>NO</b>
Cobre, mg/kg	149	5,5 - 128	52	65	<b>NO</b>
Plomo, mg/kg	128	3 - 74,4	23	18	<b>NO</b>
Mercurio, mg/kg	1,06	< 0,0013 - 0,257	22	0,4	<b>NO</b>
Níquel, mg/kg *	48,6	3 - 61,5	52	54	<b>SÍ</b> <sup>3</sup>
Vanadio, mg/kg	<i>ND</i>	18,9 - 209	23	122	<i>NA</i>
Zinc, mg/kg	459	12,8 - 172	52	143	<b>NO</b>

*ND* = no se ha determinado para este constituyente; *NA* = no rige en este caso

(1) Número de mediciones detectadas por encima del valor de detección analítico.

(2) Concentración máxima detectada.

(3) La concentración máxima excede las pautas SQG en 5.4 mg/kg, lo cual excede levemente los criterios para la designación COPC.

\* SQG < Valores de Fondo

**Tabla 5.** Comparación de las concentraciones máximas de constituyentes medidas en los sedimentos con los valores de evaluación de suelos (SSL) establecidos para protección de la salud humana. Si las concentraciones no excedían los valores SSL, no se consideró que el constituyente fuera de preocupación potencial (COPC) para la salud humana.

CONSTITUYENTE	VALOR DE EVALUACIÓN DEL SUELO (SSL)	NRO. DETECTADO <sup>1</sup>	CONCENTRACIÓN MÁXIMA <sup>2</sup>	COPC (Sí/No)?
Bario, mg/kg	20000 *	52	799	NO
Cadmio, mg/kg	78	34	1,5	NO
Cromo (total), mg/kg	390	23	38	NO
Cromo VI, mg/kg	390	1	1,1	NO
Cobre, mg/kg	3100	52	65	NO
Plomo, mg/kg	400	23	18	NO
Mercurio, mg/kg	10	22	0,4	NO
Níquel, mg/kg	1600	52	54	NO
Vanadio, mg/kg	550	23	122	NO
Cinc, mg/kg	23000	52	143	NO
Benceno, mg/kg	8	4	0,016	NO
Tolueno, mg/kg	400	1	0,061	NO
Etilbenceno, mg/kg	650	21	0,027	NO
Xileno (total), mg/kg	410	5	0,029	NO
Acenafteno, mg/kg	4700	18	0,2	NO
Acenaftileno, mg/kg	4700	18	0,076	NO
Antraceno, mg/kg	23000	10	0,061	NO
Benzo(a)antraceno, mg/kg	9	21	0,15	NO
Benzo(a)pireno, mg/kg	0,9	21	0,55	NO
Benzo(b)fluoranteno, mg/kg	9	27	0,72	NO
Benzo(g,h,i)perileno, mg/kg	2300	22	0,67	NO
Benzo(k)fluoranteno, mg/kg	90	16	0,09	NO
Criseno, mg/kg	880	26	3	NO
Dibenzo(a,h)antraceno, mg/kg	0,9	15	0,19	NO
Fluoranteno, mg/kg	3100	22	0,46	NO
Fluoreno, mg/kg	3100	21	1,1	NO
Indeno(1,2,3-cd)pireno, mg/kg	9	15	0,05	NO
Naftaleno, mg/kg	3100	22	3,1	NO
Fenantreno, mg/kg	2300	23	1,5	NO
Pireno, mg/kg	2300	25	1,1	NO

(1) Número de mediciones detectadas por encima del valor de detección analítico.

(2) Concentración máxima detectada.

\* La única fuente potencial de Bario asociada con actividades en los campos petroleros es la barita (sulfato de bario). La USEPA ha determinado que: "Datos sobre seres humanos y animales indican que el sulfato de bario prácticamente no es tóxico para los seres humanos y otras especies de mamíferos" (USEPA, 1993)

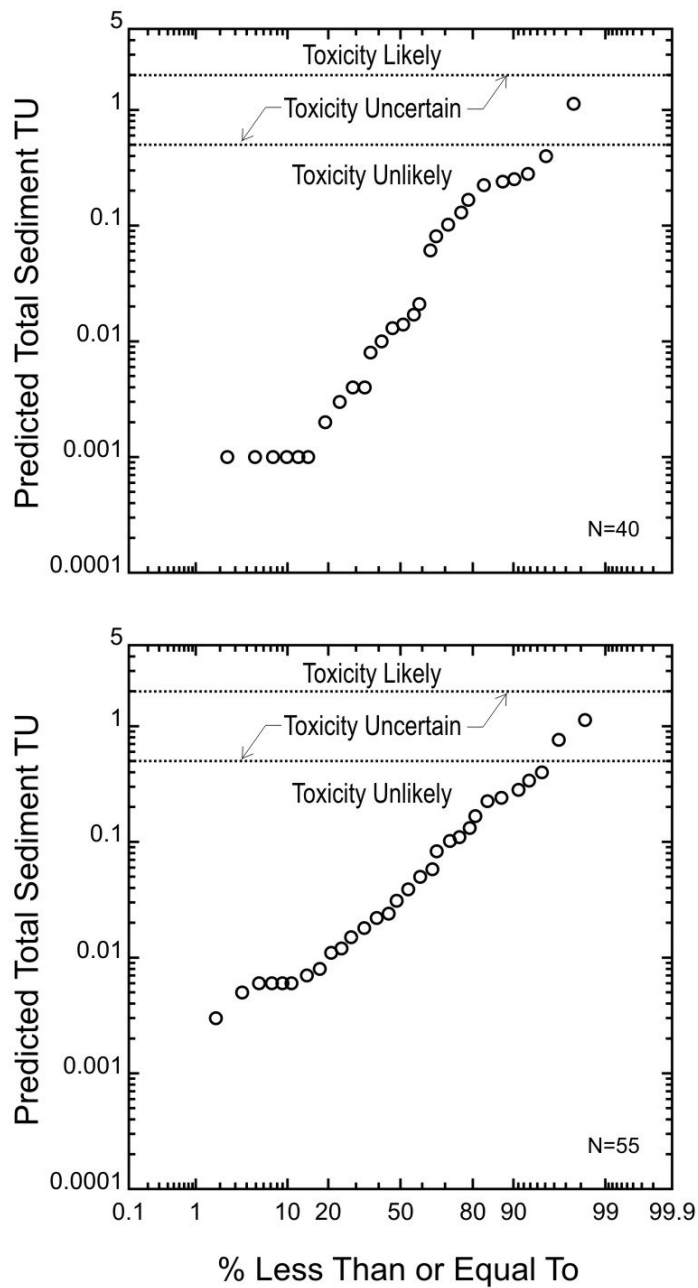


Figure 1. Probability distribution of predicted total sediment TU for measured data only (top panel) and including one-half detection limit values (bottom panel)

Figura 1. Distribución probabilística de las Unidades Tóxicas totales para sedimentos para los datos medidos (panel superior) e incluyendo valores equivalentes a la mitad del límite de detección (panel inferior)