

EVALUACIÓN ECOTOXICOLÓGICA DE LA INFLUENCIA DE LOS VERTIMIENTOS DEL CAMPO DE PRODUCCIÓN LA CIRA-INFANTAS (GCO) SOBRE DOS CUERPOS RECEPTORES

M. SERRANO, R. RESTREPO* y G. VILLA‡

‡ Ecopetrol - Gerencia Centro Oriente, El Centro, Santander, Colombia
Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia
E-mail: rrestrep@ecopetrol.com.co

Se utilizó una metodología para determinar la toxicidad aguda y carga tóxica de los seis efluentes del campo de producción La Cira-Infantas, perteneciente a la Gerencia Centro Oriente (Ecopetrol – GCO). Además, se valoró la calidad del agua de los cuerpos receptores (caño La Cira y caño Reposo), por medio de pruebas de toxicidad con tres organismos autóctonos de la región: el alga *Scenedesmus subspicatus*, la macrófita *Lemna aequinoctialis* y el cladocero *Moinodaphnia macleayi*. Como organismo de referencia, por su amplia utilización internacional, se empleó *Daphnia pulex*. Se buscó determinar el potencial tóxico de los efluentes (BaCl_2 y NaCl) por medio de bioensayos adicionales, pues la concentración de estos iones (Ba^{+2} y Cl^-) sobrepasan los límites permisibles. Los organismos presentaron sensibilidad al tóxico de referencia ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), cumpliendo con las exigencias dadas por los protocolos internacionales para ser utilizados como bioindicadores en estudios ecotoxicológicos. La respuesta de los bioindicadores a los efluentes dependió de cada organismo. Sin embargo, las estaciones 2 y 3 presentaron mayor toxicidad y, a su vez, son las que vierten las mayores cargas tóxicas a los cuerpos receptores.

Application of a methodology to determine acute toxicity and toxic charge of the six effluents of Ecopetrol's production field La Cira-Infantas, as well as to assess water quality of receptor streams (La Cira and Reposo), through toxicity test with three native organisms from the region: an algae (*Scenedesmus subspicatus*), a macrophyte (*Lemna aequinoctialis*) a cladoceran (*Moinodaphnia macleayi*) and *Daphnia pulex* as the reference organism. The toxic potential of the effluents, by conducting additional bioassays with BaCl_2 and NaCl , was also determined since high concentrations of (Ba^{+2} and Cl^-) are present in the effluents. All tested organisms showed sensitivity to the reference toxicant ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), and met international criteria for their use as bioindicators in ecotoxicology studies. The response of the bioindicators to the effluents depended on each organism; however effluents 2 and 3, the more highly contaminated, presented the highest toxicities.

Palabras clave: ecotoxicología, toxicidad aguda, concentración letal 50 (CL_{50}), concentración efectiva 50 (CE_{50}), bioensayos, cuerpos receptores, contaminación, aguas de producción.

* A quien debe ser enviada la correspondencia

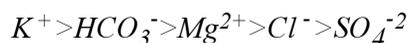
INTRODUCCIÓN

Para valorar la toxicidad y el efecto de sustancias químicas o efluentes industriales sobre la biota de un cuerpo receptor, se implementa una técnica con pruebas de toxicidad llamada “batería de bioensayos”, se utilizan organismos bioindicadores de diferente nivel trófico (Stratton and Giles, 1990; Sherry *et al.*, 1994; Pedersen and Petersen, 1996 y Leal *et al.*, 1997), y se obtiene una visión más real de los efectos adversos de estos efluentes o sustancias químicas sobre los organismos y a su vez sobre los ecosistemas.

Estas pruebas de toxicidad o bioensayos pueden determinar el efecto agudo de contaminantes (compuestos químicos y efluentes industriales) por medio de la CL_{50} (concentración letal que elimina al 50% de la población) y CE_{50} (concentración efectiva que inhibe el crecimiento al 50% de la población) sobre un organismo determinado (APHA, 1995), estableciendo así, las limitaciones para que un efluente sea vertido sin causar daño sobre la fauna y flora del cuerpo de agua receptor (Bertoletti, 1990).

En la producción de petróleo, los problemas de contaminación son causados por las aguas producidas con el combustible fósil (petróleo), las cuales aumentan en cantidad a medida que se explota el pozo (Hansen y Davies, 1994). La toxicidad aguda de estas aguas de producción depende de su composición y, a su vez, de la formación geológica del terreno (Pillard, 1996), por ello, pueden presentar un alto contenido iónico (Cl^-) y alta concentración de metales (Bario) para este caso, los cuales sobrepasan los límites permisibles de vertido establecidos por el Ministerio de Salud (Decreto 1594/84), causando un impacto en el medio donde son descargados.

Estos iones (Cl^- y Ba^{+2}) pueden causar efectos adversos a los organismos acuáticos. O’Neil (1994) enfatiza la toxicidad asociada al ion cloruro (Cl^-) con la especie *Ceriodaphnia dubia*. Un trabajo adicional fue desarrollado para evaluar la relación entre la toxicidad individual y sinérgica de los iones más frecuentes en aguas de producción, y se utilizó a *C. dubia*, *Daphnia magna* y *Pimephales promelas*, para determinar el siguiente orden de toxicidad:



Aunque se dispone de poca información, se puede

afirmar que las formas solubles del Bario pueden afectar ciertas formas de vida acuática (WHO, 1990). Otros estudios indican que las formas solubles de Bario presentan baja toxicidad sobre organismos de agua dulce. Sin embargo, Wang (1986 y 1988) indica que el Ba^{+2} puede causar efectos en el crecimiento y reproducción del fitoplancton, plantas acuáticas, invertebrados y peces.

El objetivo de este estudio pretende estimar el impacto ejercido por los seis efluentes del campo de producción La Cira-Infantas sobre dos cuerpos receptores (caños La Cira y Reposo), utilizando una batería de bioensayos por medio de organismos bioindicadores tropicales de diferente nivel trófico y con importancia ecológica, desde productores primarios: *Scenedesmus subspicatus* y *Lemna aequinoctialis*, hasta consumidores como *Moinodaphnia macleayi*, comparado este último con un organismo reconocido internacionalmente: *Daphnia pulex*.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Área de estudio

El área de estudio (campo de producción La Cira-Infantas) pertenece a la Gerencia Centro Oriente, jurisdicción del municipio de Barrancabermeja, departamento de Santander. Con un área de 42 km² aproximadamente se encuentra localizado entre las cordilleras Central y Oriental, dentro de las siguientes coordenadas Gauss: Norte 1°220.000 - 1°340.000 y Este 1°010.000 - 1°090.000, con una altitud que varía entre 80 y 500 msnm (Ecopetrol - ICP, 1993). Presenta una temperatura media de 301 K y una pluviosidad de 2.000 a 3.000 mm al año (HIMAT, 1997).

La realización del estudio comprendió dos fases: campo y experimental. La fase de campo se realizó entre julio de 1996 y abril de 1997 en el campo de producción La Cira-Infantas, mientras que la fase experimental se realizó en el Instituto Colombiano del Petróleo (Ecopetrol - ICP)

Fase de campo

Los muestreos de campo comprendieron tres épocas climáticas: lluvias (julio 18/96), sequía (enero 29/97) y transición sequía-lluvias (abril 26/97), sobre dos cuerpos de aguas superficiales: caño La Cira (LC) y caño Reposo (CR), receptores de los seis efluentes del campo de producción La Cira-Infantas. Cuatro de los

efluentes pertenecen a estaciones de recolección y dos son de plantas deshidratadoras (La Cira y El Centro). Sobre el caño La Cira inciden los vertimientos de las estaciones 2 y 3 y las plantas deshidratadoras. Sobre caño Reposo inciden los vertimientos de las estaciones 4 y 5 Figura 1.

Los cuerpos receptores se muestrearon una vez

cada época, mientras que los vertimientos sólo en una época ya que son puntuales y continuos. Tres puntos de muestreo para cada caño, antes de los vertimientos (LC-01 y CR-01), entre los vertimientos (LC-02 y CR-02) y después de los vertimientos (LC-03 y CR-03); en total se colectaron seis muestras por época para cada caño y seis muestras de vertimientos en una sola época.

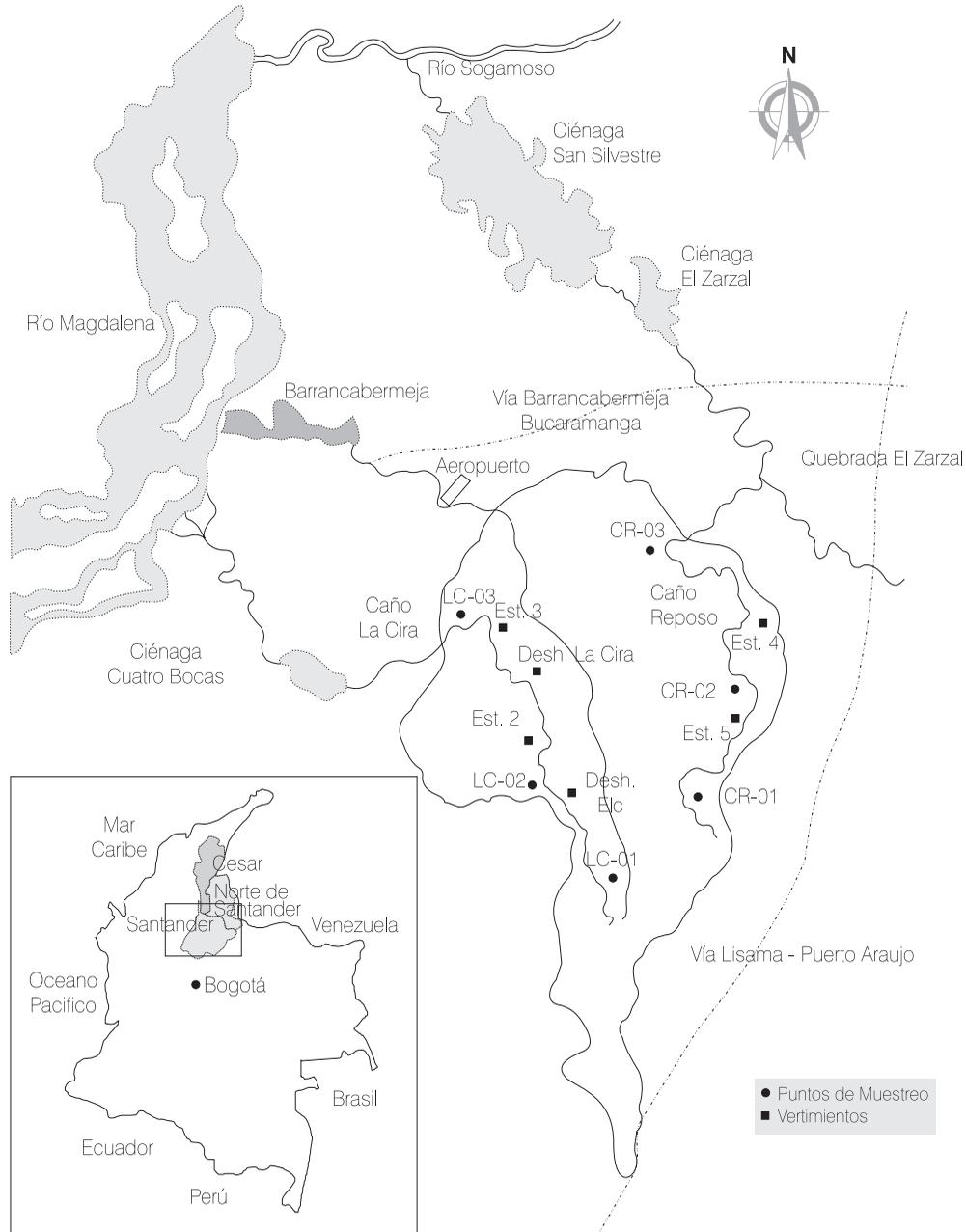


Figura 1. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo en el campo de producción La Cira-Infantas.

Fase experimental

La fase experimental se realizó en el Laboratorio de Bioensayos del ICP, el cual cuenta con la infraestructura y tecnología necesaria para la ejecución de pruebas de toxicidad bajo las normas ICONTEC GTC-31.

La metodología empleada en la evaluación del impacto biológico ejercido por los efluentes del campo La Cira-Infantas se muestra en la Figura 2. La toma de los parámetros fisicoquímicos "in situ" de las muestras se basó según la APHA (1995), además se complementaron con los de dureza, Ba^{+2} y Cl^{-} , en el Laboratorio de Aguas y Suelos del Instituto. Para cada una de las muestras colectadas, se realizó un bioensayo preliminar con concentraciones logarítmicas de 100% a 1%, determinando el intervalo de concentraciones del ensayo definitivo. De igual forma, este proceso se llevó a cabo para los bioensayos de referencia y los adicionales. El ensayo definitivo busca establecer la CL_{50-48h} para los organismos consumidores y CE_{50} para los productores (CE_{50-96h} para *S. subspicatus* y CE_{50-7d} para *L. aequinoctialis*) bajo las mismas condiciones ambien-

tales y físicas de los cultivos Tabla 1.

En cada uno de los organismos utilizados en este estudio, se realizó un mismo ensayo con un tóxico de referencia ($K_2Cr_2O_7$), (ISO, 1989; ASTM, 1990), el cual pretende verificar la sensibilidad de éstos. Para determinar el rango de sensibilidad de los organismos se siguió el modelo de USEPA (1985), de control de calidad citado por Zagatto *et al.* (1988). El cálculo de la CL_{50-48h} y CE_{50-7d} de cada prueba realizada fue por medio del método Probit (ISO, 1989a y ASTM, 1991), y la CE_{50-96h} fue por la rata de crecimiento que determina el porcentaje de inhibición de crecimiento (ISO, 1989b).

Para la estimación del impacto acuático se valoró el grado de toxicidad de los efluentes por medio de la clasificación de García *et al.* (1994), utilizando unidades tóxicas (UT) basadas en los resultados de los bioensayos; y la de Tebo (1986) según la carga tóxica (CT) que depende de las UT, más los caudales de los efluentes. Para la prevención de efectos tóxicos agudos se utilizó la fórmula manejada por Bertolotti (1990):

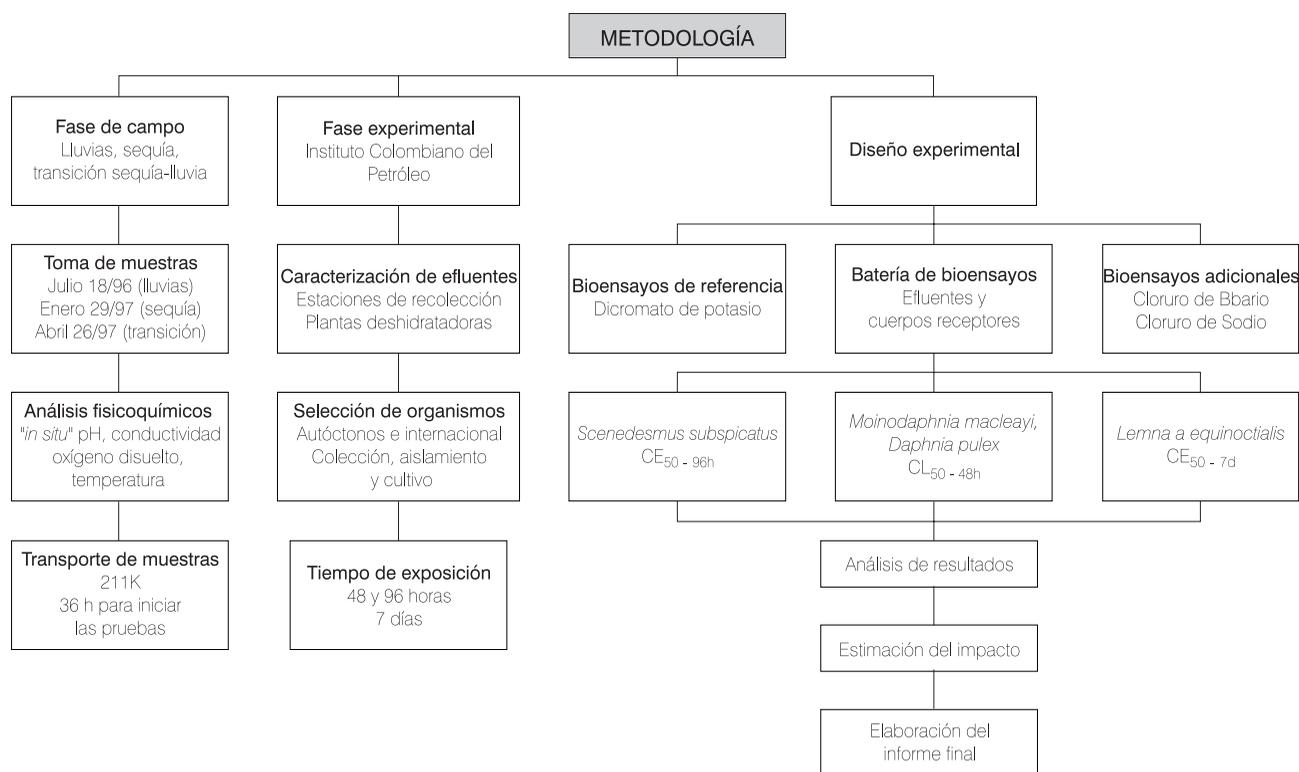


Figura 2. Metodología seguida para la evaluación del impacto ejercido por los vertimientos del campo La Cira-Infantas.

Tabla 1. Condiciones de bioensayos en los bioindicadores.

Condiciones	Especies			
	S. subspicatus	L. aequinotialis	D. pulex	M. macleayi
Bioensayo	estático	estático	estático	estático
Temperatura	298 ± 2 K	298 ± 2 K	297 ± 2 K	297 ± 2 K
Luminosidad	2.300 lx	1.600 lx	1.000 lx	1.000 lx
Fotoperíodo	continuo	continuo	12/12	12/12
pH	7,5 - 8,0	6,5 - 7,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
Dureza (g/m ³)	-----	90 - 110	60 - 70	60 - 70
Condiciones	Uniespecífico	Uniespecífico	Uniespecífico	Uniespecífico
Medio	ISO (1989b)	Hoagland	-----	-----
Recipientes	Erlenmeyers	Beakers	Tubos ensayo	Tubos ensayo
Capacidad	250 cm ³	250 cm ³	30 cm ³	30 cm ³
Contenido	125 cm ³	200 cm ³	20 cm ³	20 cm ³
Réplicas	4	3	4	4
Concentración Inicial	2x10 ⁴ cl/cm ³	5 plantulas de 1 hoja	5 organismos	5 organismos
Mantenimiento	diario	semanal	diario	diario
Análisis estadístico	% inhibición	Probit	Probit	Probit
Variable respuesta	CE _{50 - 96h}	CE _{50 - 7d}	CL _{50 - 48h}	CL _{50 - 48h}
Tiempo exposición	96 horas	7 días	48 horas	48 horas

$$AF(Q_{ef} + Q_r) > CT$$

AF = factor de aplicación para evitar efectos agudos (0,3) o crónicos (0,1)

Q_{ef} = caudal del efluente

Q_r = caudal del cuerpo receptor

CT = carga tóxica.

RESULTADOS

Resultados fisicoquímicos

Los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua para cada punto de muestreo tomados "in situ" y los de dureza calculados en el laboratorio, se muestran en la Tabla 2. Estos resultados difieren en las épocas de muestreo y en los puntos muestreados, según el curso de las aguas. En las tres épocas de muestreo, la temperatura del agua fue cálida, con temperaturas entre 298,9 K (mínima) en sequía y 304 K (máxima) en la época de

lluvias, con un promedio de 301,6 K en caño La Cira y 301,4 K en caño Reposo. Los valores del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, tienden a disminuir a lo largo del recorrido de las aguas y a medida que aumentan los efluentes vertidos. Caso contrario sucede con la conductividad pues los valores aumentan considerablemente. En cambio, los resultados de pH muestran una similitud por época, con una ligera acidulación de las aguas en las épocas de lluvia y transición, mientras que en la época de sequía el pH tiende a ser neutro.

Los valores de dureza de los cuerpos receptores indican que estas aguas se clasifican dentro de aguas blandas (EPS, 1990), teniendo en cuenta el dato del punto control (LC-01 y CR-01), antes de los vertimientos para cada caño, pero en el trayecto del área muestreada para ambas cuencas estas aguas pasan de blandas (34 g/m³ de CaCO₃) hasta muy duras (290 g/m³ de CaCO₃) en sequía.

Los resultados fisicoquímicos de los efluentes, Ta-

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos "in situ" de los caños para las épocas de muestreo (lluvias, sequía y transición).

Parámetro	Oxígeno disuelto			Dureza			pH			Temperatura			Conductividad			Hora		
	% saturación			g/m ³ CaCO ₃						K			μS/cm					
	lluvia	sequía	transc	lluvia	sequía	transc	lluvia	sequía	transc	lluvia	sequía	transc	lluvia	sequía	transc	lluvia	sequía	transc
LC-01	60	30	62	29	62	15	6,33	7,0	6,0	302,5	300,7	299,7	79,7	184	41,0	11:15	9:05	9:00
LC-02	63	29	75	80	290	40	6,46	7,1	6,2	304,2	301,1	302,2	632,0	2.200	219,0	14:00	9:30	12:30
LC-03	34	30	46	60	210	31	6,37	7,3	6,0	302,4	302,2	302	680,0	3.970	220,0	9:30	10:10	15:00
CR-01	80	28	85	18	34	10	6,48	6,6	6,0	302	299,1	303,1	61,0	125	30,0	13:05	8:20	13:00
CR-02	28	44	51	22	242	14	6,20	7,1	5,9	301	303,5	300,5	151,0	2.280	59,3	9:30	12:45	10:30
CR-03	20	30	40	22	282	23	6,16	7,2	6,1	301,4	303,4	300,2	138,0	3690	95,0	8:30	13:45	9:30

transc: Transición sequía-lluvia

Tabla 3, muestran una diferencia considerable con los resultados de las aguas de los caños, excepto en el pH, el cual tiende a ser ligeramente alcalino, con valores entre 6,29 (deshidratadora La Cira) y 7,51 (estación 4), muy semejante al pH de los caños. La dureza de estas aguas de formación, están clasificadas desde muy blandas (9 g/m³ CaCO₃) en la deshidratadora La Cira, hasta muy duras (> 322 g/m³ CaCO₃) en las restantes.

El porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%) es bajo en todos los efluentes comparados con el de la deshidratadora La Cira 80%, mientras que con los datos de conductividad sucede lo contrario, un mínimo valor

de 0,20 mS/cm en la deshidratadora La Cira y > 2,38 mS/cm en las demás estaciones. Todos los valores fisicoquímicos registrados en la deshidratadora La Cira son los valores mínimos de los efluentes excepto en el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto.

Las concentraciones de los iones Ba⁺² y Cl⁻ en todas las estaciones y en las dos plantas deshidratadoras La Cira y ELC (Tabla 3), sobrepasan los límites permisibles que el Ministerio de Salud exige en el decreto 1594/84. La concentración de Bario en los efluentes no debe sobrepasar de 5 g/m³ Ba⁺² (para vertimientos) y la concentración de cloruros, los 250 g/m³ Cl⁻. Estos apor-

Tabla 3. Valores fisicoquímicos de los efluentes.

Parámetros	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 5	La Cira	ELC
Oxígeno disuelto (%)	39,00	56,00	12,00	27,00	80,00	30,00
pH	7,26	7,49	7,51	7,36	6,29	7,42
Temperatura (K)	300,20	301,10	299,30	300,60	301,50	300,70
Conductividad (mS/cm)	10,46	12,70	5,73	12,66	0,20	2,38
Dureza total (g/m ³ CaCO ₃)	1.520,00	1.600,00	750,00	1540,00	9,00	322,00
Caudal (m ³ /d)	733,54	1.191,47	211,68	412,13	104,55	184,90
Cloruros (g/m ³)	7.209,00	6.658,00	5.005,00	6.734,00	4.250,00	9.250,00
Bario (g/m ³)	64,90	98,60	70,50	64,20	12,00	56,60
Hora	13:45	14:35	11:00	13:25	14:20	8:30

tes se confirman en la Tabla 4, donde la concentración de estos iones en los cuerpos receptores aumentan en el transcurso de las aguas y los efluentes vertidos.

Tabla 4. Concentración iónica de Ba⁺² y Cl⁻ en los caños La Cira y Reposo.

Puntos	Bario (g/m ³)		Cloruros (g/m ³)	
	Sequia	Lluvias	Sequia	Lluvias
LC-01	< 0,005	0,0035	5,1	4,7
LC-02	1,9	---	698,1	---
LC-03	13,1	0,870	1.321,9	101,3
CR-01	< 0,5	0,033	< 5,0	3,3
CR-02	5,3	---	716,7	---
CR-03	15,6	0,338	1.235,4	25,7

Resultados toxicológicos

Los organismos utilizados cumplieron con las exigencias dadas por los protocolos internacionales (ISO, 1989a y b; ASTM, 1991), para el mantenimiento y respuesta a tóxicos como los llamados “bioindicadores”. La identificación se basó en claves taxonómicas y micrografías (microscopio electrónico de Barrido). Sin embargo, la micrografía no fue necesaria para la identificación de (*Lemna aequinoctialis*).

Bioensayos de referencia

Todos los organismos presentaron sensibilidad frente al tóxico de referencia (K₂Cr₂O₇). En total, se realizaron 16 pruebas para cada especie de microcrustáceo y siete pruebas para *S. subspicatus*, aplicando el modelo de sensibilidad de la USEPA (1985) citado por Zagatto et al. (1988). Sobre *L. aequinoctialis*, sólo se realizaron cuatro pruebas pues para esta especie el modelo no fue aplicado, porque el objetivo era presentar el protocolo de toxicidad para esta macrófita. Sin embargo, el rango de sensibilidad estuvo entre 38 g/m³ - 52 g/m³ K₂Cr₂O₇ (Tabla 5), el cual está dentro de los valores establecidos por Cowgill (1991), con CE_{50-7d} para *Lemna minor* y *Lemna gibba* 40 y 49 g/m³ K₂Cr₂O₇ respectivamente.

Los valores de sensibilidad indican que la variación

Tabla 5. Valores de toxicidad para dicromato de potasio

Especie	\bar{X}	S	CV	Prueba
	g/m ³		%	
<i>Daphnia pulex</i>	0,028	0,0047	17	CL ₅₀ - 48h
<i>Moinodaphnia macleayi</i>	0,027	0,006	22	CL ₅₀ - 48h
<i>Lemna aequinoctialis</i>	38-52			CE ₅₀ - 7d
<i>Scenedesmus subspicatus</i>	1,44	0,36	25	CE ₅₀ - 96h

S = Desviación estándar
 CV = Coeficiente de variación
 X = CL₅₀ ó CE₅₀

en los resultados con los cladóceros es muy poca, con una CL₅₀ - 48h de 0,028 g/m³ K₂Cr₂O₇ para *D. pulex* y 0,027 g/m³ K₂Cr₂O₇ para *M. macleayi* (Tabla 5), mientras que para *S. subspicatus* el intervalo es un poco amplio con una CE₅₀ - 96h de 1,44 g/m³ K₂Cr₂O₇, aunque no muy alejada a la reportada por la ISO (1989b) CE₅₀ - 72h 0,84 g/m³ K₂Cr₂O₇. Esto indica que los organismos son sensibles al tóxico de referencia utilizado.

Bioensayos con las muestras de los caños La Cira y Reposo

Los resultados obtenidos con las aguas de los caños presentaron toxicidad para *S. subspicatus* manifestada en la inhibición del crecimiento (CE₅₀ - 96h) (Tabla 6)

Tabla 6. Resultados de CE₅₀ para *Scenedesmus subspicatus* con el agua de los caños La Cira y Reposo.

Puntos	<i>Scenedesmus Subspicatus</i>			
	CE ₅₀ (% inhibición)			
	Lluvia		Sequia	Trans.
Sin ^a	Filtra ^b			
LC-01	49	68	71	59
LC-02	58	75	56	27
LC-03	42	47	53	52
CR-01	61	85	72	88
CR-02	63	81	56	73
CR-03	70	78	27	91

a = Muestras sin filtrar; b = Muestras filtradas

Tabla 7. Resultados CE₅₀ de los organismos productores.

Efluentes	<i>S. subspicatus</i> CE ₅₀ - 96h	<i>M. macleayi</i> / <i>D. pulex</i> CE ₅₀ - 48h	<i>L. aequinoctialis</i> CE ₅₀ - 7d
Estación 2	21,3	24,25 / 28	10
Estación 3	23,0	26 / 21,5	10
Estación 4	54,5	61,21 / 100	25
Estación 5	22,2	53 / 34	10
Desh. El Centro	32,0	85,6 / 91	100
Desh. La Cira	37,4	91,7 / 100	50

para los demás organismos la toxicidad fue nula. En la época de lluvias (primer muestreo) se realizaron bioensayos con las muestras filtradas (0,22 mm) y sin filtrar. Las pruebas con las muestras filtradas se realizaron por la turbiedad presentada, verificando este parámetro como un factor determinante en el crecimiento del alga. Aunque las muestras de sequía y transición presentaron una turbiedad alta, estas muestras no se filtraron, puesto que se pierde la integridad de la misma.

Bioensayos con los efluentes del campo La Cira-Infantas

El organismo que presentó mayor sensibilidad a los efluentes fue *L. aequinoctialis* seguido de *S. subspicatus* y, por último, los cladóceros (Tabla 7), aunque estos fueron los de mayor sensibilidad frente al tóxico de referencia. El efluente más tóxico para *M. macleayi* fue la Estación 2, para *D. pulex*, la Estación 3 y el de menor toxicidad la deshidratadora La Cira, para ambos organismos. Estos resultados confirman que cada organismo responde de manera diferente ante un tóxico o efluente, por ello la importancia en la utilización de la “batería de bioensayos”.

Bioensayos adicionales

En las especies productoras, el Cloruro de Bario (BaCl₂) resultó más tóxico para *S. subspicatus*, mientras que el Cloruro de Sodio (NaCl) lo fue para *L. aequinoctialis* (Tabla 8). Entre los cladóceros, *D. pulex* presentó mayor sensibilidad en ambos compuestos que *M. macleayi*.

Estimación del impacto

Al tener en cuenta la clasificación de García (1994),

las unidades tóxicas (UT) de los efluentes se muestran en la Tabla 9, presentando una calificación de muy tóxica los efluentes de las estaciones 2, 3 y 5 sobre los organismos productores, mientras que para *M. macleayi* sólo la estación 2 es muy tóxica. La deshidratadora ELC ejerce una toxicidad leve sobre *L. aequinoctialis* mientras que para *M. macleayi* ambas deshidratadoras son levemente tóxicas.

Los resultados de carga tóxica (CT) dependen del caudal del efluente y de su toxicidad, aunque la toxicidad de algunos efluentes resultó elevada para los organismos utilizados, sólo el efluente de la Estación 3 presentó una carga tóxica considerable (Tabla 10), porque, según la clasificación de Tebo (1986), citado por Bertolletti (1990), los demás efluentes presentan una carga tóxica entre reducida y moderada.

Como solamente se tenía reporte en noviembre/96 y abril/97 no fue posible obtener los datos del caudal promedio de diez años consecutivos de los cuerpos re-

Tabla 8. Resultados toxicológicos de los bioensayos adicionales.

Especie	BaCl ₂	NaCl
	g/m ³	g/m ³
<i>Scenedesmus subspicatus</i>	2,21	1.000
<i>Moinodaphnia macleayi</i>	40	1.300
<i>Daphnia pulex</i>	25	900
<i>Lemna aequinoctialis</i>	75	780

Tabla 9. Clasificación de la toxicidad de los efluentes con base en UT.

Puntos	<i>S. subspicatus</i>	<i>L. aequinoctialis</i>	<i>M. macleayi</i>
Estación 2	Muy tóxica	Muy tóxica	Muy tóxica
Estación 3	Muy tóxica	Muy tóxica	Tóxica
Estación 4	Moderadamente tóxica	Tóxica	Moderadamente tóxica
Estación 5	Muy tóxica	Muy tóxica	Moderadamente tóxica
Desh. ELC	Tóxica	Levemente tóxica	Levemente Tóxica
Desh. La Cira	Tóxica	Tóxica	Levemente Tóxica

Tabla 10. Clasificación de las cargas tóxicas de los efluentes.

Puntos	Log(Carga Tóxica)		
	<i>S. subspicatus</i>	<i>M. macleayi</i>	<i>L. aequinoctialis</i>
Estación 2	Moderada	Moderada	Moderada
Estación 3	Moderada	Moderada	Considerable
Estación 4	Reducida	Reducida	Reducida
Estación 5	Moderada	Reducida	Moderada
Desh. ELC	Reducida	Reducida	Reducida
Desh. La Cira	Reducida	Reducida	Reducida

ceptores, por ello se estableció el caudal mínimo que debería tener el cuerpo receptor, según la fórmula de Bertolotti (1990), para que no cause ningún impacto a la CT del efluente vertido.

Para el caño La Cira, la mayor CT que debe soportar se presenta en el vertimiento de la Estación 3 (Tabla 11), siendo éste el último efluente que recibe el cuerpo receptor. Sin embargo, el caudal que debería tener en este punto (máximo 445.870 m³/seg), a pesar de llevar el aporte de tres efluentes más, no supera el registrado en noviembre/96 (3'462.700 m³/seg), pero sí el registrado en abril/97 (100.800 m³/seg) ejerciendo un impacto en el ecosistema receptor. De igual forma sucede en caño Reposo, vierte el mayor aporte de CT la estación 5 (Tabla 11), y determina un caudal máximo de 154.230 m³/seg, inferior al caudal registrado en noviembre/96 (3'948.000 m³/seg) y superior en abril/97 (34.300 m³/seg).

DISCUSIÓN

La calidad del agua de los caños La Cira y Reposo presenta características de aguas blandas, cálidas, ligeramente ácidas y poco mineralizadas. La diferencia entre los datos de los parámetros en los puntos de muestreo para las tres épocas, radica en varios aspectos: la hora en la toma de la muestra, el volumen y composición de las aguas residuales vertidas y del metabolismo de los cuerpos receptores. La toxicidad de estas aguas dependió del parámetro de turbiedad e influyó en el crecimiento de *S. subspicatus*, mientras que para *L. aequinoctialis* y *M. macleayi* no hubo ningún tipo de toxicidad.

La sensibilidad presentada por los organismos utilizados con el tóxico de referencia fue aceptable, cumplieron con las exigencias dadas por los protocolos internacionales para ser utilizados en estudios ecotoxicológicos como "bioindicadores", aunque en los bioensayos con los efluentes la sensibilidad de los organis-

Tabla 11. Resultados de la estimación del impacto causados por los efluentes

Punto	Unidades tóxicas			Q _{ef} m ³ /d	Carga tóxica			Qr*		
	S. s.	L. a.	M. m..		S. s.	L. a..	M. m.	S. s. (m ³ /d)	L. a. (m ³ /d)	M. m. (m ³ /d)
Est. 2	4,69	10	4,12	733,54	3,536	3,865	3,480	10734,13	23718	9340,5
Est. 3	4,34	10	3,85	1191,47	3,711	4,076	3,661	16045,2	38522	14099,2
Est. 4	1,83	4	1,63	211,68	2,588	2,927	2,537	1079,56	2610,72	938,32
Est. 5	4,5	10	1,89	412,13	3,268	3,615	2,891	5769,81	13325	2184,54
ELC	3,12	1	1,17	104,55	2,513	2,019	2,087	982,78	243,95	303,12
La Cira	2,67	2	1,09	184,90	2,693	2,567	2,304	1460,7	1047,8	486,8

Qr = Caudal del cuerpo receptor mínimo estimado para evitar impacto.	S. s. = Scenedesmus subspicatus
CE ₅₀ = Concentración efectiva media 50%.	L. a. = Lemna aequinoctialis
Q _{ef} = Caudal del efluente.	M. m. = Moinodaphnia macleayi.
CT* = Carga tóxica con los valores transformados a logaritmos.	 Efluentes de Caño La Cira
	 Efluentes de Caño Reposo

mos no estuvo de acuerdo con la respuesta frente al tóxico de referencia. Por ello la importancia en el empleo de la “batería de bioensayos”, pues cada uno de los bioindicadores presenta una respuesta diferente e independiente para un mismo efluente o tóxico, siendo aún estos de la misma familia. Además se confirma que los datos fisicoquímicos no suministran la información suficiente en cuanto a la toxicidad biológica de un vertimiento, sin embargo, no se descarta el análisis de estos parámetros para cualquier estudio ecotoxicológico.

La influencia de los vertimientos sobre los cambios en los parámetros fisicoquímicos de los caños, se evidencia en la conductividad y dureza tomando en cuenta los puntos control (LC-01 y CR-01), antes de la caída de los vertidos, porque estos valores aumentan o disminuyen a lo largo del recorrido de las aguas. Esto se confirma con los valores de pH, siendo semejante entre los valores de los efluentes y los caños. Además, la disminución del oxígeno disuelto está relacionado con la dinámica de la cuenca y con la suma de los efluentes vertidos, pero este último en menor proporción, verificándose en sequía, donde los valores de oxígeno no sufren cambios bruscos en el transcurso de las aguas para ambos caños, a pesar de que la reoxigenación del agua es nula, en esta época, por el aumento del caudal.

La época crítica para ambos caños es sequía, y difi-

culta la “homeostasis” de los ecosistemas, debido al estiaje y a la acelerada evaporación por las altas temperaturas. El caño alcanza a tener un caudal de 0,0 m³/s, sumado el material alóctono aportado en lluvias y que permanece hasta sequía y a su vez la continua CT de los efluentes.

La toxicidad de estos últimos podría estar relacionada con la concentración de Bario y Cloruros, sin embargo, no influyen en los cuerpos receptores pues estas aguas sólo presentaron toxicidad para el alga, debido a la turbiedad presentada en ellas. Los vertimientos de mayor toxicidad (estación 2 y 3) y a su vez los que aportan la mayor CT, no representan un riesgo significativo para ejercer un impacto al cuerpo receptor, excepto el efluente de la estación 3 evaluado con *L. aequinoctialis*, el cual presenta una CT considerable.

La dinámica de caño Reposo presenta una mejor o mayor homeostasia que la del caño La Cira, la cual evita un deterioro del ecosistema y realiza una rápida recuperación. Esta mayor capacidad se debe a que caño Reposo recibe sólo dos vertimientos mientras que caño La Cira recibe cuatro vertimientos, dos de los cuales son los más tóxicos. Sin embargo, ambos caños son capaces de autorregularse, hecho que se corrobora por la toxicidad nula de estos mismos sobre los bioindicadores, a pesar de la constante carga tóxica vertida sobre ellos.

CONCLUSIONES

- Se confirma la importancia de los análisis ecotoxicológicos en la evaluación de la toxicidad de un vertimiento por medio de una “batería de bioensayos”, para valorar el impacto sobre los ecosistemas, y a su vez, sobre organismos de diferente nivel trófico sensibles a contaminación, para observar el efecto causado por efluentes o tóxicos a lo largo de la cadena trófica.
- Los organismos utilizados cumplieron con las exigencias dadas por los protocolos internacionales (sensibilidad al tóxico de referencia, fácil identificación y manipulación, gran adaptabilidad, alta reproductibilidad y economía), para poder ser utilizados en estudios ecotoxicológicos como organismos bioindicadores, pues presentan características de organismos estenoicos, los cuales son los indicados para este tipo de estudio.
- La sensibilidad de *S. subspicatus* se ve afectada en el crecimiento con las muestras de todos los puntos de los caños, por la alta concentración de partículas en suspensión representado en la turbiedad, que confirma que todos los organismos responden de manera diferente a las mismas muestras.
- El potencial tóxico de los efluentes del campo de producción La Cira-Infantas no pudo ser establecido por medio de los bioensayos adicionales, pues en ellos se encuentran otras sustancias que podrían ejercer sinergismos o antagonismos aumentando o disminuyendo la toxicidad de los efluentes.
- Las condiciones climáticas cumplen un papel fundamental en la estabilidad de un ecosistema, y es la época de sequía la más crítica, el cual se refleja con los cambios bruscos de los parámetros físicoquímicos en los caños La Cira y Reposo. Sin embargo, la calidad del agua de los caños es favorable para el crecimiento de los organismos utilizados excepto *S. subspicatus*.

REFERENCIAS

- APHA - American Public Health Association, 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington: Ed Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesceri; Arnold E. Greenberg. 19Ed.
- ASTM - American Society for Testing and Materials, 1991. *Standard Guide for Conducting Static Toxicity Tests with Lemna gibba G3*, Designation E1415-91.1-10.
- ASTM, 1990. *Standard Guide for Conducting Static 96-h Toxicity Tests with Microalgae*, Designation: E 1218-90.1-12.
- Bertoletti, E., 1990. “Estimativa da Carga Tóxica de Efluentes Industriais”, *Ambiente*, 4 (1): 54 - 61.
- Cowgill, U. M., Milazzo, D. P. and Landenberger, B. D., 1991. “The Sensitivity of *Lemna gibba* G-3 and Four Clones of *Lemna minor* to Eight Common Chemicals Using a 7-day Test”, *Res. J. Water Pollut. Control Fed.*, 63: 991 - 998.
- Ecopetrol - ICP, 1993. “Estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental”, *Proyecto: “Reforma del sistema de recolección de crudo y gas campos La Cira Infantas”*, Distrito de Producción, División de Energía y Ambiente, Asuntos Ambientales.
- EPS - Environmental Protection Series, 1990. *Biological Test Method: Reference Method for Determining Acute Lethality of Effluents to Daphnia magna*, Canada, EPS 1/RM/14, 18.
- García, E., Monteiro V. y Monteiro M.R., 1994. *Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales*, Anexo 1. Estudio de Caso río Paraíba do Sul, Brasil, CEPIS/OPS.
- Hansen, B. R. and Davies, S. R. H., 1994. “Review of the Potential Technologies for the Removal of Dissolved Components from Produced Water”, *Trans I. Chem., E.* 72A: 176 - 188.
- HIMAT, 1997. *Información anual y resumen multianual. Datos climáticos característicos*, Estación aeropuerto Barrancabermeja. Archivo técnico.
- ICONTEC, 1996. “Guía para la realización de ensayos de toxicidad (bioensayos) en organismos acuáticos”, *GTC-31, Gestión ambiental*, Agua.
- ISO - International Organization for Standardization, 1989a. “Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea)”, *ISO 6341, Water Quality*, Part. 5. Biological methods, Section 5.1
- ISO, 1989b. “Fresh water algal growth inhibition test with *Scenedesmus subspicatus* and *Selenastrum capricornutum*”, *ISO 8692, Water Quality*.
- Leal, H. E., Rocha, H. A. and Lema, J. M., 1997. “Acute toxicity of hardboard mill effluents to different bioindicators”, *Environ Toxicol Water Qual.*, 12: 39 - 42.

- Ministerio de Salud. *Decreto 1594 de 1984*.
- O'Neil, P. E., 1994. "A Review of Water Quality, Biological Risk and Discharge Monitoring Studies Relative to the Surface Disposal or Produced Waters from the Development Coal-seam", *Gas Research Institute GRI*, contract No. 5091 - 253 - 2100.
- Pedersen, F. and Petersen, G. I., 1996. "Variability of Species Sensitivity to Complex Mixtures", *Wat. Sci. Tech.* 33 (6): 109 - 119.
- Pillard, D., 1996. "Predicting the Toxicity of Common Ions Found in Produced Waters", *Gas TIPS*: 17 - 21.
- Sherry, J. P., Scott, B. F., Nagy, E. and Dutka, B. J., 1994. "Investigation of the Sublethal Effects of Some Petroleum Refinery Effluents", *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 3: 129 - 137.
- Stratton, G. and Giles J., 1990. "Importance of Bioassay Volume in Toxicity Tests Using Algae and Aquatic Invertebrates", *Environmental Contamination and Toxicology*, 44: 420 - 427.
- Tebo, L. B., 1986. "Effluent monitoring: historical perspective", in: H.L. Bergman, R. A. Kimerle and A.W. Maki (Eds.), *Environmental Hazard Assesment of Effluents*, Pergamon Press. N.Y.: 13 - 31.
- Wang, W., 1986. "The Effect of River Water on Phytotoxicity of Ba, Cd and Cr", *Environ. Pollut. (Ser. B)*, 11: 193 - 204.
- Wang, W., 1988. "Site-specific barium toxicity to common duckweed, *Lemna minor*", *Aquat. Toxicol.*, 12: 203 - 212.
- WHO - World Health Organization., 1990. *Barium Environmental Health Criteria*. No. 107, Finlandia (ed.), Geneva, 148.
- Zagatto, P. A., Bertoletti, E. and Gherardi-Goldstein, E., 1988. "Toxicidade de Efluentes Industriais da Bacia do Rio Piracicaba", *Ambiente*, 2 (1): 39 - 42.