

First environmental monitoring of offshore gas drilling discharges in the Deltana Platform, Venezuela

Primer estudio ambiental de descargas asociadas con perforaciones de gas costa afuera en la Plataforma Deltana, Venezuela

E García^{1,2*}, A Cróquer², C Bastidas^{1,2}, D Bone^{1,2}, R Ramos²

¹ Departamento de Biología de Organismos, Universidad Simón Bolívar, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela.

² Centro de Estudios Ecotoxicológicos en Sistemas Marinos, Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, Venezuela.

* Corresponding author. E-mail: emgarcia@usb.ve

ABSTRACT. The benthic macrofauna of two Deltana Platform offshore gas wells was assessed for the first time in Venezuela and correlated with changes in sediment chemistry after exploratory perforation. A gradient analysis was performed at four distance intervals from the perforation site to 1000 m away. At the Ballena well, samples were collected 15 days, 13 months, 19 months, and 30 months after the perforation at 190 m depth. At the Cocuina well, sampling occurred immediately before, and 15 days and 12 months after the perforation at 350 m depth. Principal component analysis and multidimensional scaling were used to assess spatial and temporal patterns of environmental and biotic variables. The temporal pattern was clear, as differences between samples decreased with time after perforation. The results suggest that drilling muds initially changed the chemistry of sediments, but that these changes apparently disappeared approximately two years after perforation and were homogenous at a spatial scale of up to 1 km from the perforation site. A larger spatial scale and more frequent monitoring would be necessary to further understand the potential mechanisms underlying the dispersion and transportation of drilling fluids and muds. This study provides baseline data and the first description of the relevant spatial and temporal scales for monitoring the potential effects of chemicals associated with the exploration of offshore gas in Venezuela.

Key words: drilling fluids, drilling muds, gas exploration, sediment chemistry, soft-bottom communities.

RESUMEN. La macrofauna bentónica de dos pozos de gas costa afuera se evaluó por primera vez en Venezuela y se correlacionó con cambios en la química del sedimento después de las perforaciones exploratorias. Para ello, se realizó un análisis de gradiente a cuatro intervalos de distancia desde el sitio de perforación hasta 1000 m del mismo. En el pozo Ballena, las muestras se recolectaron a los 15 días, 13 meses, 19 meses y 30 meses después de la perforación a 190 m de profundidad. En el pozo Cocuina, el muestreo se realizó justo antes y 15 días y 12 meses después de la perforación a 350 m de profundidad. Los patrones espaciales y temporales de las variables ambientales y bióticas se evaluaron a través del análisis de componentes principales y de escalado multidimensional. Se obtuvo un patrón temporal claro dado que las diferencias entre muestras disminuyeron con el tiempo después de la perforación. Los resultados sugieren que los rípios de perforación cambiaron inicialmente la química de los sedimentos, pero estos cambios tendieron a desaparecer aproximadamente dos años después de la perforación y fueron homogéneos a 1 km alrededor del sitio de perforación. Para un mejor entendimiento de los mecanismos de dispersión y transporte de los fluidos de perforación y rípios serían necesarios una mayor escala espacial y monitoreos más frecuentes. Este estudio provee datos de línea base y constituye una primera descripción de las escalas temporales y espaciales relevantes para evaluar los efectos potenciales de desechos químicos asociados a la industria de exploración de gas costa afuera en Venezuela.

Palabras clave: fluidos de perforación, rípios, exploración de gas, química del sedimento, comunidades de fondos blandos.

INTRODUCTION

The Orinoco basin (Venezuela) is one of the world's largest deposits of heavy crude oil and natural gas (<http://statoilhydro.com/en/ouoperations>). Offshore gas exploration on the Venezuelan shelf represents a particularly profitable and growing industry since proven reserves were about 150 billion cubic feet in 2008 (<http://www.avhi.org>). This has attracted many transnational oil companies, which together with the government-owned Petróleos de Venezuela

INTRODUCCIÓN

La cuenca del Orinoco (Venezuela) es una de las más grandes reservas de crudo y gas natural (<http://statoilhydro.com/en/ouoperations>). La exploración de gas costa afuera en la plataforma venezolana representa una creciente industria muy rentable dado que las reservas probadas para 2008 alcanzaron 150 mil millones de pies cúbicos (<http://www.avhi.org>). Esto ha atraído muchas petroleras transnacionales, las cuales junto a la compañía estatal Petróleos de

(PDVSA) have begun exploring for gas along the Venezuelan continental shelf.

The rapid expansion of the gas industry in Venezuela may potentially produce detrimental effects on marine communities (e.g., Gray *et al.* 1999), especially in deep-water ecosystems (Breuer *et al.* 2004). During perforation, synthetic or water-based drilling fluids are used to facilitate perforation with mechanical drills, and their discharge often increases pollutants in sediments close to platforms and/or changes the sedimentation rates and granulometry (Olsgard and Gray 1995). Drilling fluids mix with perforation material to form drilling muds that are released into the water column according to international regulations (USEPA 2003, OSPAR 2004), and are dispersed along several kilometers together with their wastes (e.g., hydrocarbons, cadmium [Cd], barium [Ba], barite [BaSO₄], mercury [Hg]). Depending on the concentration, the xenobiotics in the drilling muds have lethal and sublethal effects on soft-bottom organisms and consequently on benthic communities (Holdway 2002, Neff 2005, Terlizzi *et al.* 2008).

Benthic communities can be used to monitor the effects of gas and oil drilling activities since many organisms are sessile or have limited mobility and respond quickly to mechanical (i.e., drilling and sediment burial) and chemical disturbances (Gray *et al.* 1990, Currie and Isaacs 2005). Thus, comparisons of the chemical and biological composition of soft-bottom communities over time and along a radial spatial gradient from perforation sites (e.g., Gray *et al.* 1990, 1999) are necessary for developing programs to monitor the offshore oil and gas exploitation in Venezuela. As impacts of oil and gas drilling have been mostly evaluated in the North Sea (e.g., Olsgard and Gray 1995), the Mediterranean (e.g., Terlizzi *et al.* 2008), and the Gulf of Mexico (e.g., Wilson-Ormond *et al.* 2000), this study will allow initiating a baseline database in Venezuela and will contribute to that of the Atlantic fringe of South America (Pozebon *et al.* 2005, 2009; Santos *et al.* 2009).

Gradient analysis is a useful approach for inferring potential impacts of drilling activities in oceans with offshore oil and gas exploitation (Ellis and Schneider 1996), though a more appropriate design for separating the effects of drilling from the natural variability of benthic communities in space and time is the before-after-control-impact (BACI) approach (Underwood 1993, Currie and Isaacs 2005). Nonetheless, in this study a gradient analysis was used because of the lack of baseline data for non-impacted sites in the vicinity of perforation sites.

To evaluate the potential impacts of gas exploration and exploitation in a country experiencing a rapid expansion of these activities, this paper aimed: (1) to assess changes in the chemistry and the benthic community of deep-water sediments at two offshore wells in the Deltana Platform, Venezuela, where exploratory drillings are taking place; and (2) to test whether the changes in soft-bottom communities were associated with changes in the sediment chemistry.

Venezuela (PDVSA) han comenzado recientemente la exploración de gas en la plataforma venezolana.

La expansión rápida de la industria de gas en Venezuela podría producir, potencialmente, efectos negativos sobre las comunidades marinas (e.g., Gray *et al.* 1999), especialmente en ecosistemas de aguas profundas (Breuer *et al.* 2004). Durante la perforación, se usan fluidos sintéticos o base agua para facilitar la perforación con taladros mecánicos, y su descarga comúnmente incrementa los niveles de contaminación en sedimentos cercanos a las plataformas y/o cambia la granulometría o las tasas de sedimentación (Olsgard y Gray 1995). Los fluidos se mezclan con el material perforado formando el ripio, el cual es liberado a la columna de agua de acuerdo con las regulaciones internacionales (USEPA 2003, OSPAR 2004) y dispersado por varios kilómetros conjuntamente con sus desechos (e.g., hidrocarburos, cadmio [Cd], bario [Ba], barita [BaSO₄] y mercurio [Hg]). Dependiendo de la concentración de los xenobioticos en los ripios, se pueden producir efectos letales y subletales en los organismos de fondos blandos y, consecuentemente, en las comunidades bentónicas (Holdway 2002, Neff 2005, Terlizzi *et al.* 2008).

Las comunidades bentónicas pueden ser usadas para monitorizar los efectos de la perforación de gas y petróleo debido a que muchos de sus organismos son sésiles o tienen movilidad limitada y responden rápidamente a los disturbios mecánicos (i.e., perforación y enterramiento por sedimento) y químicos (Gray *et al.* 1990, Currie y Isaacs 2005). Por tanto, las comparaciones a través del tiempo de la composición biológica y química de las comunidades de fondos blandos, así como en un gradiente espacial desde el sitio de perforación (e.g., Gray *et al.* 1990, 1999), son necesarias para desarrollar programas de monitorización de la explotación costa afuera de petróleo y gas en Venezuela. Dado que la mayoría de las evaluaciones de impacto de las perforaciones de petróleo y gas han sido en el Mar del Norte (e.g., Olsgard y Gray 1995), Mediterráneo (e.g., Terlizzi *et al.* 2008) y Golfo de México (e.g., Wilson-Ormond *et al.* 2000), este estudio permitiría iniciar la base de datos para Venezuela y contribuir con la de la fachada Atlántica en Suramérica (Pozebon *et al.* 2005, 2009; Santos *et al.* 2009).

El análisis de gradiente es útil para inferir impactos potenciales de las actividades de perforación en diferentes océanos con intensiva explotación costa afuera de gas e hidrocarburos (Ellis y Schneider 1996), aunque el diseño más apropiado para separar los efectos de perforaciones de la variabilidad natural de las comunidades bentónicas en espacio y tiempo es el enfoque de antes-después-control-impacto (BACI por sus siglas en inglés; Underwood 1993, Currie y Isaacs 2005). Sin embargo, en este estudio se usó un análisis de gradiente por la ausencia de línea de base para sitios no impactados cercanos a los sitios de perforación.

Para la evaluación de impactos potenciales de la exploración y explotación de gas en un país con una rápida expansión de dichas actividades, en este trabajo se planteó:

MATERIAL AND METHODS

Study area

Off the eastern coast of Venezuela, the Deltana Platform extends for ca. 17,185 km², comprising 5618 km² of coastal, 5121 km² of neritic, and 6446 km² of oceanic environments (Martín and Bone 2007). The deep oceanic area of the Deltana Platform (100–400 m) is divided into five blocks, each with proven gas reserves in the order of four billion cubic feet. The study sites of Ballena (350 m deep) and Cocuina (190 m deep) are, together with Orca, the most important offshore gas wells in block 4 (fig. 1a, b), assigned to Statoil in 2003 (<http://statoilhydro.com/en/ouoperations/>). This is one of the blocks licensed by the Venezuelan government to transnationals for offshore gas exploration and exploitation.

Sampling design

Spatial and temporal changes in the granulometry and chemistry of sediments and in the abundance of benthic

- (1) evaluar los cambios en la química y en la comunidad bentónica de sedimentos de agua profunda en dos pozos costa afuera en la Plataforma Deltana, donde las exploraciones de perforación de gas de Venezuela se están llevando a cabo; y
- (2) determinar si los cambios en las comunidades bentónicas se asocian con cambios en la química del sedimento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Plataforma Deltana está localizada en la costa este de Venezuela y se extiende unos 17,185 km², de los cuales 5618 km² son ambientes costeros, 5121 km² neríticos y 6446 km² oceánicos (Martín y Bone 2007). La zona oceánica profunda de la Plataforma Deltana (100–400 m) está dividida en cinco bloques, cada uno con reservas probadas de gas en el orden de cuatro mil millones de pies cúbicos. Los sitios de estudio Ballena (profundidad 350 m) y Cocuina (profundidad 190 m) son, junto con Orca, los pozos más importantes del bloque 4 (fig. 1a, b), asignados a Statoil en 2003

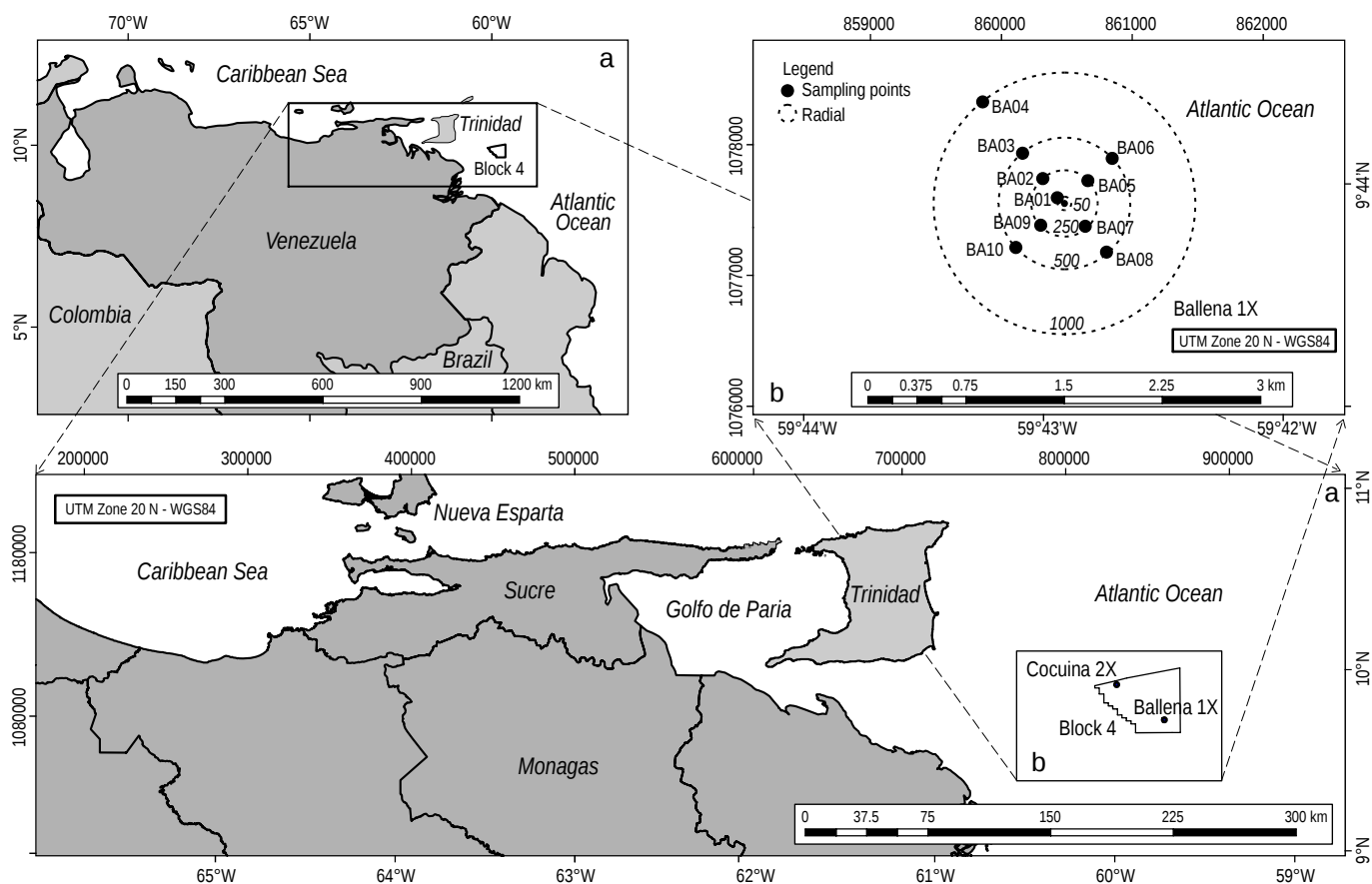


Figure 1. (a) Geographic location of the Ballena and Cocuina wells in the Deltana Platform, on the eastern coast of Venezuela. (b) Sampling sites (indicated by circles) in relation to the oil well. Only the sampling sites at Ballena are shown as at Cocuina the sampling scheme was the same.

Figura 1. (a) Localización geográfica de los pozos Ballena y Cocuina en la Plataforma Deltana, en la costa este de Venezuela. (b) Sitios de muestreo (indicados con círculos negros) en relación al pozo. Solamente se muestran los sitios de Ballena debido a que en Cocuina el diseño fue igual.

macrofauna at the Ballena and Cocuina wells were assessed using a gradient analysis. At each well, sediment samples were collected with a 0.20-m² box corer at 10 sampling sites distributed as shown in figure 1. At each site, two to three launches were made to collect independent replicates for the chemical analyses and for the macrobenthos. To be able to compare the chemical and biological samples, replicates were grouped according to four distance intervals from the site of perforation, following a radial pattern: (1) near, 0–150 m; (2) intermediate, 150–250 m; (3) intermediate-far, 250–650 m; and (4) far, 650–1000 m. At Ballena, samples were collected 15 days (T1, August 2005), 13 months (T2), 19 months (T3), and 30 months (T4) after the perforation. At Cocuina, samples were collected before (T0, July 2006), and 15 days (T1, January 2007) and 12 months (T2) after the perforation.

Environmental variables were estimated according to the US Environmental Protection Agency (USEPA 2003) and the Oslo-Paris Convention (OSPAR 2004). Samples were analyzed for heavy metals, total polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), total recoverable petroleum hydrocarbons (TRPHs), total oil and grease (TOG), granulometry, and total organic carbon (TOC), as well as six replicates for aliphatic hydrocarbons (AHs). Granulometry was determined by standard gravimetry (Folk and Ward 1957) and TOC by oxidation in the presence of chromic acid (Jackson 1970). Samples for the macrofauna were preserved in 10% formalin and washed through a 0.5-mm-mesh sieve. All organisms were sorted into major taxonomic groups.

Statistical analyses

Statistical analyses were focused on detecting: (1) the spatial and temporal patterns of sediment granulometry and chemistry, and the abundance of macrofauna, and (2) correlations between the abundance of organisms and changes in sediment chemistry (Clarke and Warwick 2001). For the former, principal component analysis (PCA) was used with normalized data; each replicate was subtracted by the mean value and divided by the standard deviation. Draftsman plots were used to eliminate highly correlated ($\rho > 0.9$) redundant variables from the analysis and to decide the proper transformations if needed. A PCA was performed for each site considering all times and distance intervals, and then for each time when a temporal pattern was observed. An analysis of similarities (SIMPER) based on Euclidean distances was used to estimate the dissimilarity between samples and the contribution of each environmental variable to this dissimilarity.

In order to detect spatial and temporal patterns in the abundance of organisms at Ballena and Cocuina, non-metric multidimensional scaling (NMDS) was used, based on the Bray-Curtis dissimilarity and on $\log(x + 1)$ -transformed data. A SIMPER based on the Bray-Curtis index was used to determine the taxon that better explained differences between

(<http://statoilhydro.com/en/ouroperations/>). Éste es uno de los bloques otorgados por el gobierno venezolano a compañías petroleras trasnacionales para la exploración y explotación de gas costa afuera.

Diseño de muestreo

Los cambios temporales y espaciales en la granulometría y química de los sedimentos y en la abundancia de la macrofauna bentónica en los pozos Ballena y Cocuina fueron evaluados con un análisis de gradiente. En cada pozo, las muestras de sedimentos se recolectaron con un nucleador de caja de 0.20 m² en diez sitios, como se muestra en la figura 1. En cada sitio se realizaron de dos a tres lances con el fin de obtener réplicas independientes para los análisis químicos y del macrobentos. Para poder comparar las muestras químicas y biológicas, las réplicas se agruparon de acuerdo con cuatro intervalos de distancia desde el sitio de perforación: (1) cerca, 0–150 m; (2) intermedio, 150–250 m; (3) intermedio-lejos, 250–650 m y (4) lejos, 650–1000 m; siguiendo un patrón radial. En Ballena, las muestras se recolectaron a los 15 días (T1, agosto de 2005), 13 meses (T2), 19 meses (T3) y 30 meses (T4) después de la perforación. En Cocuina, las muestras se recolectaron antes (T0, julio de 2006) y 15 días (T1, enero de 2007) y 12 meses (T2) después de la perforación.

Las variables ambientales se estimaron de acuerdo con la US Environmental Protection Agency (USEPA 2003) y la Convención de Oslo-París (OSPAR 2004). En cada una de las muestras se determinaron metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs, por sus siglas en inglés), hidrocarburos totales recuperables (TRPHs), aceites y grasas totales (TOG), granulometría y carbono orgánico total (TOC), así como seis réplicas para las estimaciones de hidrocarburos alifáticos (AHs). La granulometría se determinó por gravimetría estándar (Folk y Ward 1957) y el TOC por oxidación en presencia de ácido crómico (Jackson 1970). Las muestras de macrobentos se preservaron en formalina al 10% y luego se lavaron a través de un tamiz con malla de 0.5 mm para retener la macrofauna. Todos los organismos se identificaron y agruparon en grupos taxonómicos mayores.

Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se enfocaron en detectar: (1) los patrones espaciales y temporales en la granulometría y química del sedimento y en la abundancia de la macrofauna, y (2) correlaciones entre la abundancia de los organismos y cambios en la química del sedimento (Clarke y Warwick 2001). Para el primer enfoque se usaron análisis de componentes principales (ACP) con las variables normalizadas; a cada replica se le restó la media y se dividió entre la desviación estándar. Se utilizaron gráficos *draftsman* para eliminar variables altamente correlacionadas ($\rho > 0.9$) que fuesen redundantes en el análisis y para decidir las transformaciones

particular samples. The correlation between the abundance of organisms and sediment chemistry was tested with BEST (BioEnv), a routine that finds the best combination of environmental variables that explain macrobenthos abundance patterns (Clarke and Warwick 2001). This analysis was performed considering all times and distance intervals, and individually for each time if a clear temporal pattern was observed. All analyses were performed with PRIMER 6.

RESULTS

Changes in sediment texture and chemistry

Sediments at Ballena were consistently dominated by silt (90–95%, table 1) and had similar chemical characteristics regardless of their distance from the perforation site (fig. 2); however, there was a temporal pattern in the chemical composition of sediments as samples were grouped according to their sampling time (fig. 2). Although barely correlated with each other (fig. 2), TRPHs, TOG, PAHs, and AHs best explained temporal changes in the sediment chemistry at Ballena (fig. 3a–d). Several metals (Al, Hg, Zn, and Cd) and TRPHs were positively correlated with silts and TOC (fig. 2). The largest differences between sampling times were found between T3 and T4 (table 2), and they were mostly explained by a higher concentration of AHs at T3 than at T4 (fig. 3d) and a lower concentration of TOG at T3 than at T4 (fig. 3b); T1 and T2 mainly differed in PAHs concentrations, which were higher at T2 (fig. 3c).

At Cocuina, samples from different times also clearly grouped (fig. 4), with the largest differences found between T0 and T1 (table 2); TRPHs, TOG, Al, and AHs best explained temporal changes in sediment chemistry (table 2, fig. 5 a–d). Sediments at T0 had the lowest levels of AHs (fig. 5d), which increased at T1 along with Al (fig. 5c). TOG and TRPHs decreased from T0 to T1, but both were still present at T2 (fig. 5a, b). TRPHs and TOG were positively correlated with each other, but negatively associated with AHs and Al (fig. 4). In addition, heavy metals such as Zn, Cr, and Al were positively correlated with the content of silts and TOC in the sediments (fig. 4).

Changes in benthic macrofauna

At both wells, the benthic community was composed of polychaetes, bivalves, gastropods, peracarids, nemertini, barnacles, anemones, foraminifers, echinoderms, sipunculids, oligochaetes, and nematodes. Polychaetes were the dominant group (55–60% of organisms) across all distances and throughout all sampling periods. Bivalves (24–26%) and sipunculids (8–10%) followed in abundance. The abundance of organisms was spatially similar (NMDS not shown); however, temporal patterns were clear for both wells. At Ballena, there was a dramatic decrease in the abundance of the benthic community at T2 (exemplified in fig. 6), followed by a slow

más apropiadas en caso de ser necesarias. Se hizo un ACP para cada sitio considerando todos los tiempos e intervalos de distancia, y luego se hizo para cada tiempo si se observase algún patrón temporal. Se usó un análisis de similitudes (SIMPER) basado en distancias euclídeas para estimar las distancias entre muestras como una medida de disimilitud y la contribución de cada variable ambiental a esta disimilitud.

Para detectar los patrones temporales y espaciales de la abundancia de organismos en Ballena y Cocuina se usó un escalado multidimensional no métrico (NMDS, por sus siglas en inglés), basada en disimilitudes de Bray-Curtis y en datos transformados logarítmicamente ($x + 1$). Se utilizó un SIMPER basado en el índice de Bray-Curtis para evaluar cuáles taxones explicaban mejor las diferencias entre muestras particulares. La correlación entre la abundancia de organismos y la química del sedimento se puso a prueba con BEST (BioEnv), una rutina que encuentra la mejor combinación de variables que explica los patrones de abundancia del macrobentos (Clarke y Warwick 2001). Este análisis se realizó considerando todos los tiempos e intervalos de distancia, e individualmente para cada tiempo cuando se observó un patrón temporal claro. Todos los análisis se hicieron con PRIMER 6.

RESULTADOS

Cambios en la textura y química del sedimento

Los sedimentos en Ballena estuvieron dominados por limo (90–95%, tabla 1) y presentaron características químicas similares independientemente de su distancia al sitio de perforación (fig. 2). Sin embargo, se observó un patrón temporal con respecto a la composición química del sedimento debido a que se agruparon las muestras de cada periodo (fig. 2). Aunque apenas se correlacionaron entre sí (fig. 2), TRPHs, TOG, PAHs y AHs fueron las variables que mejor explicaron los cambios temporales en la química del sedimento en Ballena (fig. 3a–d). Los TRPHs y varios metales (Al, Hg, Zn y Cd) se correlacionaron positivamente con las fracciones finas y con el contenido de TOC (fig. 2). La mayor diferencia entre los tiempos de muestreo se encontró entre T3 y T4 (tabla 2), explicada principalmente por la concentración de AHs mayor en T3 que en T4 (fig. 3d) y una concentración de TOG más baja en T3 que en T4 (fig. 3b); T1 y T2 difirieron principalmente en las concentraciones de PAHs, siendo mayores en T2 (fig. 3c).

En Cocuina las muestras también se agruparon claramente según su tiempo de muestreo (fig. 4), con las mayores diferencias entre T0 y T1 (tabla 2); TRPHs, TOG, Al y AHs fueron las variables que mejor explicaron los cambios temporales en la química del sedimento (tabla 2, fig. 5a–d). Los sedimentos en T0 tuvieron los niveles más bajos de AHs (fig. 5d), los cuales incrementaron en T1 junto con los de Al (fig. 5c). Los niveles de TOG y TRPHs disminuyeron entre T0 y T1, pero ambas variables tuvieron concentraciones aún

Table 1. Mean, standard deviation (SD), and minimum and maximum values of the environmental variables measured throughout the study period at both wells (Ballena and Cocuina).
Tabla 1. Promedio, desviación estándar (SD) y valores mínimo y máximo de las variables ambientales para ambos pozos (Cocuina y Ballena) durante todo el periodo de estudio.

Environmental variables	Ballena				Cocuina			
	Mean	SD	Minimum	Maximum	Mean	SD	Minimum	Maximum
Silt (%)	92.86	7.87	70.97	99.51	93.09	11.30	50.32	99.76
Total organic carbon (%)	1.70	0.53	0.65	2.73	1.19	0.55	0.32	2.60
Total oil and grease (ppm)	12743.34	9092.79	1991.00	55867.09	5691.36	5156.57	326.02	23729.91
Total recoverable petroleum hydrocarbons (ppm)	4540.86	2132.04	1136.67	10946.41	2994.91	2420.05	179.61	11642.86
Ba (ppm)	90.48	107.80	35.46	648.34	0.30	0.24	0.02	1.16
Cr (ppm)	40.96	18.67	6.33	66.12	68.46	26.28	29.42	154.00
Zn (ppm)	99.68	53.97	37.22	339.98	48.22	9.30	34.30	64.87
Cd (ppm)	7.88	26.66	0.00	138.42	96.65	43.28	33.24	190.50
Cu (ppm)	5.31	13.42	0.00	60.89	5.81	9.34	0.00	31.08
Pb (ppm)	5.53	10.31	0.00	33.82	5.36	4.92	0.00	18.11
Al (ppm)	37655.60	6220.31	23596.70	50813.51	9.97	14.87	0.00	43.75
Hg (ppm)	0.04	0.10	0.00	0.47	36679.06	8747.00	23311.55	51301.24
Σ Polycyclic aromatic hydrocarbons (ppm)	0.03	0.05	0.00	0.20	0.02	0.03	0.00	0.09
Aliphatic hydrocarbons (ppb)	4300.76	5883.80	102.90	21230.89	5168.54	4215.51	253.43	14669.68

ppm: mg kg⁻¹ dry weight.

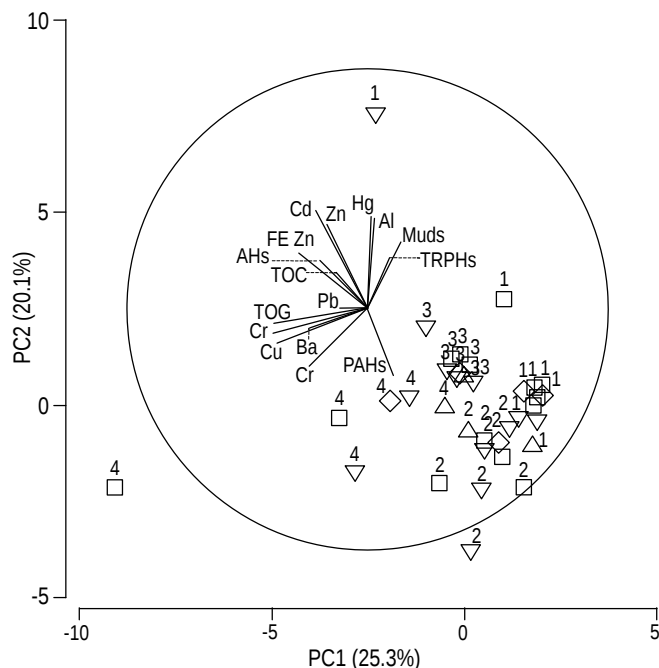


Figure 2. Principal component analysis (normalized environmental variables) showing ordination of samples according to the distance from the perforation (symbols) and sampling times (numbers) at Ballena. Distance intervals: $\triangle$ = near, 0–150 m; ∇ = intermediate, 150–250 m; $\square$ = intermediate-far, 250–650 m; and $\diamond$ = far, 650–1000 m. Sampling times: 1 = 15 days, 2 = 13 months, 3 = 19 months, and 4 = 30 months after perforation. Total recoverable petroleum hydrocarbons (TRPHs), total organic carbon (TOC), total oil and grease (TOG), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and aliphatic hydrocarbons (AHs).

Figura 2. Análisis de componentes principales (variables ambientales normalizadas) que muestra la ordenación de las muestras según la distancia del sitio de perforación (símbolos) y los tiempos de muestreo (números) en Ballena. Intervalos de distancia: $\triangle$ = cerca, 0–150 m; ∇ = intermedio, 150–250 m; $\square$ = intermedio-lejos, 250–650 m; y $\diamond$ = lejos, 650–1000 m. Tiempos de muestreo: 1 = 15 días, 2 = 13 meses, 3 = 19 meses, y 4 = 30 meses después de la perforación. Hidrocarburos totales recuperables (TRPHs), carbono orgánico total (TOC), aceites totales y grasas (TOG), hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) y hidrocarburos alifáticos (AHs).

recovery at T3 and T4. Dissimilarities were highest (100%) between T2 and T3 and between T2 and T4, whereas the lowest dissimilarity (49.1%) was detected between T3 and T4 (table 3). These dissimilarities between sampling times were best explained by changes in the abundance of polychaetes and bivalves (62–89% and 4–20%, respectively; table 3).

At Cocuina, the highest dissimilarity in the abundance of soft-bottom fauna occurred between T0 and T1 (table 3). Here, the abundance of each taxon seldom exceeded three individuals per sample, regardless of the distance from the perforation site and the sampling time. Nonetheless, polychaetes dominated the community and better explained differences between times (56–61%, table 3).

apreciables en T2 (fig. 5a, b). Se observó una correlación positiva entre TOG y TRPHs, pero éstos presentaron una asociación negativa con AHs y Al (fig. 4). Además, el contenido de metales como el Zn, Cr y Al estuvieron positivamente correlacionados a los limos y TOC en los sedimentos (fig. 4).

Cambios en la macrofauna bentónica

En ambos pozos, la comunidad bentónica estuvo compuesta principalmente por poliquetos, bivalvos, gastrópodos, peracaridos, nemertinos, cirripedios, anémonas, foraminíferos, equinodermos, sipuncúlidos, oligoquetos y nemátodos. Los poliquetos fueron dominantes (55–60% de los organismos) a todas las distancias y durante todos los tiempos de muestreo. Los bivalvos (24–26%) y sipuncúlidos (8–10%) siguieron en abundancia. La abundancia de los organismos fue similar espacialmente (NMDS no mostrado); sin embargo, se observaron patrones temporales claros para ambos pozos. En Ballena, hubo una disminución dramática en la abundancia de la comunidad bentónica en T2 (ejemplificado en fig. 6), seguido de un lento recobro en T3 y T4. Las disimilitudes fueron máximas (100%) entre T2 y T3 y entre T2 y T4, mientras que la disimilitud más baja (49.1%) se observó entre T3 y T4 (tabla 3). Estas disimilitudes entre tiempos de muestreo estuvieron explicadas principalmente por los cambios en la abundancia de poliquetos y bivalvos (62–89% y 4–20%, respectivamente; tabla 3).

En Cocuina, la disimilitud más alta en la abundancia de fauna se presentó entre T0 y T1 (tabla 3). Aquí, la abundancia de cada taxón rara vez superó los tres individuos por muestra, sin importar la distancia al sitio de perforación o el tiempo de muestreo. Sin embargo, los poliquetos dominaron la comunidad y fueron los que mejor explicaron las diferencias entre tiempos (56–61%, tabla 3).

Asociaciones entre las variables ambientales y biológicas

En Ballena se encontró una correlación significativa entre los patrones de abundancia de los organismos y los cambios en la química del sedimento sólo cuando todos los tiempos se consideraron dentro del análisis ($p = 0.61$, $P = 0.001$, tabla 4). La variable que mejor explicó la abundancia de los organismos fue PAHs, y esto no mejoró con ninguna otra combinación de variables (tabla 4). La correlación entre variables ambientales y abundancia de organismos se ilustra con el aumento de PAHs en T2 (fig. 3c) y la concomitante reducción de poliquetos (fig. 6). El recobro de la abundancia de poliquetos coincidió con una disminución de los niveles de PAHs en T3 y T4 (fig. 6). En Cocuina, los datos bióticos y ambientales no estuvieron correlacionados ($p = 0.26$, $P = 0.5$) debido a que la química del sedimento varió entre tiempos (fig. 4), mientras que la abundancia de organismos fue consistentemente baja durante todo el estudio.

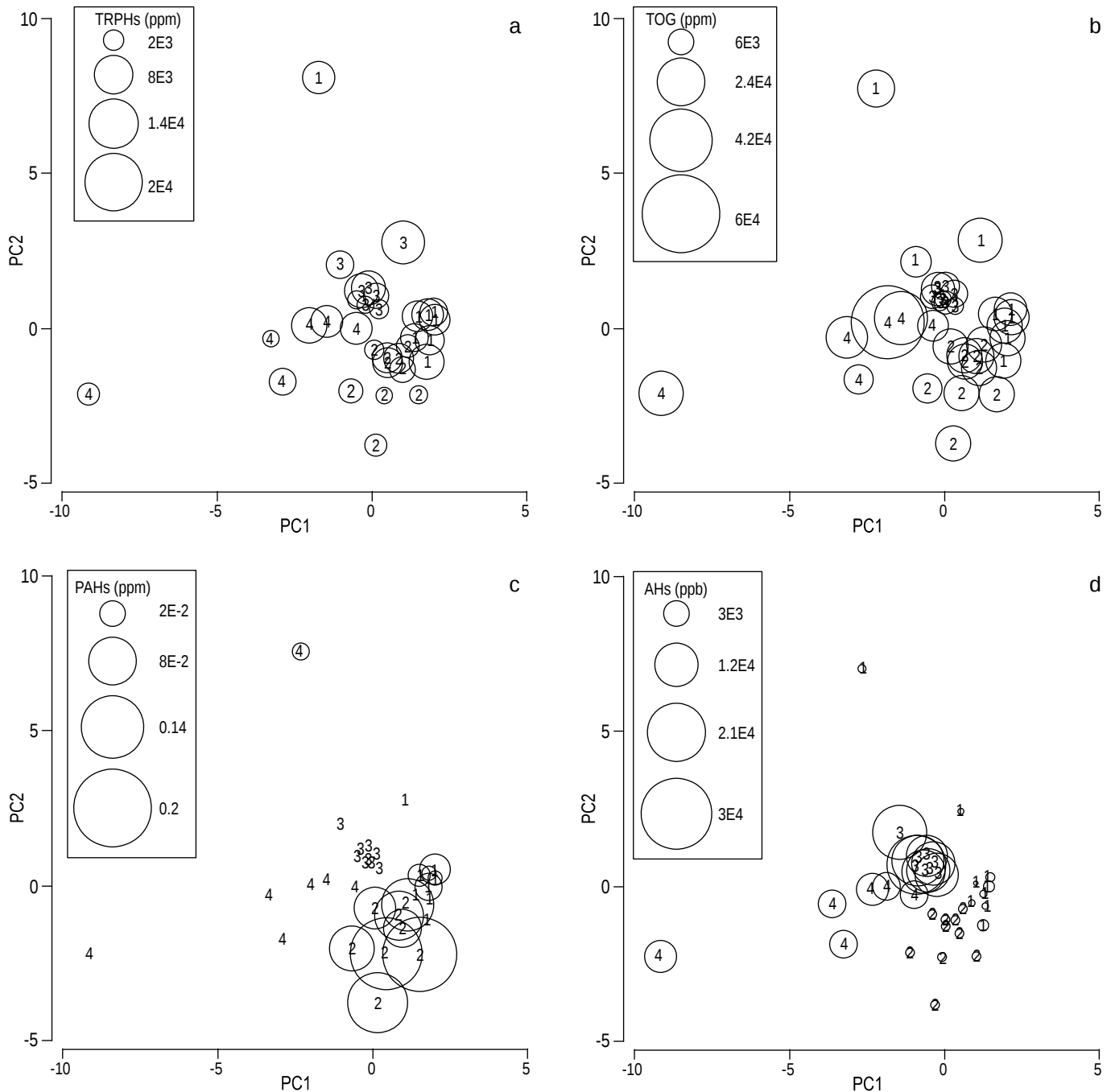


Figure 3. Environmental variables that most contributed to the dissimilarities between sampling times (numbers, same as in fig. 2) at Ballena: **(a)** total recoverable petroleum hydrocarbons (TRPHs), **(b)** total oil and grease (TOG), **(c)** polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and **(d)** aliphatic hydrocarbons (AHs).

Figura 3. Variables ambientales que más contribuyeron a las disimilitudes entre tiempos de muestreo (números, representados igual que en fig. 2) en Ballena: **(a)** hidrocarburos totales recuperables (TRPHs), **(b)** aceites totales y grasas (TOG), **(c)** hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) y **(d)** hidrocarburos alifáticos (AHs).

Associations between environmental and biological variables

At Ballena, a significant correlation between the patterns of abundance of organisms and the changes in sediment chemistry was found only when all times were considered in

DISCUSIÓN

El presente estudio evaluó la química de sedimentos oceánicos profundos y la abundancia de la macrofauna bentónica en dos pozos de gas durante la perforación exploratoria en el Atlántico venezolano. En general, la química de

the same analysis ($\rho = 0.61$, $P = 0.001$; table 4). The variable that best explained the abundance of organisms was PAHs, and this was not improved by any combination of variables (table 4). The correlation between changes in the abundance of organisms and sediment chemistry is further illustrated by the increase in PAHs during T2 (fig. 3c) and the concomitant reduction of polychaetes during this sampling time (fig. 6). The recovery of abundance for this particular group coincided with a decrease in the levels of PAHs at T3 and T4 (fig. 6). At Cocuina, biotic and environmental data were not significantly correlated ($\rho = 0.26$, $P = 0.5$) since the chemistry of sediments varied over time (fig. 4), but the abundance of organisms was consistently low at all times.

DISCUSSION

This study assessed the chemistry of deep-water sediments and the abundance of soft-bottom macrofauna at two Venezuelan Atlantic gas wells during exploratory perforation. Overall, the chemistry of sediments was similar up to 1 km from the perforation site, suggesting a homogenous dispersion of drilling muds over this spatial scale. Major changes found in the chemistry of sediments were temporal and could be associated with exploratory perforation activities. Drilling muds might be washed away steadily, since the concentration of chemical traces in the sediments decreased with time. At Cocuina, these temporal changes could be more easily associated with drilling discharges as the samples were

los sedimentos fue similar hasta 1 km desde el sitio de perforación, lo que sugiere una dispersión homogénea de los rípios en esta escala espacial. Los cambios mayores en la química de los sedimentos fueron temporales y podrían estar asociados con las actividades de perforación. De este modo, los rípios podrían ser transportados constantemente dado que la concentración de sus trazas químicas en el sedimento disminuyó con el tiempo. En Cocuina, estos cambios temporales pudieran estar fácilmente asociados a las descargas de los rípios debido a que las muestras se tomaron antes y después de la perforación, mientras que en Ballena existe la limitación de que las muestras sólo se recolectaron después de la perforación. Adicionalmente, en Ballena se derramaron fluidos con base sintética cuatro meses antes de la perforación (además de los fluidos base agua que se utilizaron posteriormente), lo cual confunde las posibles fuentes de contaminantes que afectaron la química del sedimento a través del tiempo en este pozo. Una combinación de factores podría estar afectando la dispersión y cambios temporales de los desechos de perforación en Ballena y Cocuina. Se ha demostrado que los procesos oceanográficos, la topología del océano, las características del sedimento, los disturbios bióticos y el tipo de fluido de perforación son variables que afectan la dispersión de los contaminantes (e.g., Lindstrom y Braddock 2002, Neff 2005) y por lo tanto requieren de discusión.

Ballena y Cocuina son pozos profundos (190–350 m) y los procesos oceanográficos dominantes a esas profundidades

Table 2. Environmental variables that best explained the differences between sampling times at (a) Ballena and (b) Cocuina, according to the analysis of similarities of sediment samples based on Euclidean distance: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), total oil and grease (TOG), total recoverable petroleum hydrocarbons (TRPHs), aliphatic hydrocarbons (AHs), and aluminium (Al). Sampling times: at Ballena, 15 days (T1), 13 months (T2), 19 months (T3), and 30 months (T4) after perforation; and at Cocuina, immediately before (T0), and 15 days (T1) and 12 months (T2) after perforation.

Tabla 2. Variables ambientales que mejor explicaron las diferencias entre tiempos de muestreo en (a) Ballena y (b) Cocuina, de acuerdo con los análisis de similitudes de muestras de sedimento con distancias euclídeas: hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), grasas y aceites totales (TOG), hidrocarburos totales recuperables (TRPHs), hidrocarburos alifáticos (AHs) y aluminio (Al). Tiempos de muestreo: en Ballena, 15 días (T1), 13 meses (T2), 19 meses (T3) y 30 meses (T4) después de la perforación; y en Cocuina, inmediatamente antes (T0), 15 días (T1) y 12 meses (T2) después de la perforación.

Sampling times	Mean Euclidean distance	Contribution to dissimilarity (%)					Accumulated (%)
		PAHs	TOG	TRPHs	AHs	Al	
(a) Ballena							
T1-T2	10188.13	78.26	11.26	10.42			99.94
T1-T3	17941.76	17.50	17.86		61.61		96.97
T1-T4	19996.99	20.05	71.70				91.75
T2-T3	19336.31	32.74	12.06		53.64		98.44
T2-T4	17197.27	22.20	69.88				92.08
T3-T4	25381.55		62.12		36.11		98.23
(b) Cocuina							
T0-T1	22379.78		19.06	10.10	63.25	5.3	97.71
T0-T2	14851.70		32.71	7.50	49.73	4.5	94.44
T1-T2	15241.02		11.18	68.37	13.72	3.8	97.07

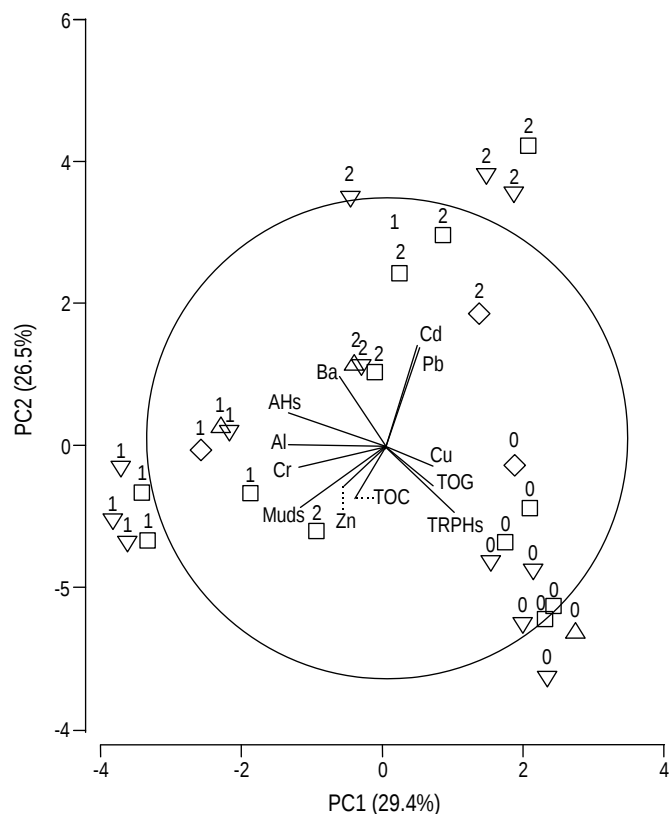


Figure 4. Principal component analysis showing ordination of samples according to the distance from the perforation (symbols, same as in fig. 2) and sampling times (numbers) at Cocuina: 0 = before perforation, 1 = 15 days after perforation, and 2 = 12 months after perforation. Total recoverable petroleum hydrocarbons (TRPHs), total organic carbon (TOC), total oil and grease (TOG), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and aliphatic hydrocarbons (AHs).

Figura 4. Análisis de componentes principales donde se muestra la ordenación de las muestras de acuerdo con la distancia del sitio de perforación (símbolos, como en fig. 2) y los tiempos de muestreo (números) en Cocuina: 0 = antes de la perforación, 1 = 15 días después de la perforación, y 2 = 12 meses después de la perforación. Hidrocarburos totales recuperables (TRPHs), carbono orgánico total (TOC), aceites totales y grasas (TOG), hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) y hidrocarburos alifáticos (AHs).

taken before and after perforation, whereas at Ballena there is the limitation that all samples were collected after perforation. Furthermore, at Ballena, synthetic-base fluids were spilled four months before perforation (although water-based muds were used afterwards), which confounds the potential source of pollutants that changed the chemistry of sediments in this well. A combination of factors could be implicated in the dispersion and temporal changes of drilling wastes at Ballena and Cocuina. Oceanographic processes, ocean topography, sediment characteristics, biotic disturbances, and the type of drilling fluids have all been shown to affect the dispersion of pollutants (e.g., Lindstrom and Braddock 2002, Neff 2005) and therefore deserve discussion.

aún son poco conocidos para esas localidades. Sin embargo, estimaciones *in situ* de la velocidad de las corrientes superficiales muestran que las masas de agua se mueven relativamente rápido (1.8–2.0 km h⁻¹). Considerando que los rípios en ambos pozos se descargaron en aguas más someras, las corrientes superficiales los pudieron haber transportado varios kilómetros antes de depositarse (e.g., Breuer *et al.* 2004), lo cual explicaría la ausencia de patrones espaciales en la escala de este estudio.

De 90% a 95% de los sedimentos en Ballena y Cocuina estuvieron compuestos por limos con niveles moderados de TOC, lo cual podría explicar la presencia y probable acumulación de metales y compuestos hidrofóbicos derivados de las actividades de perforación exploratoria (e.g., Horowitz y Elric 1987). Sin embargo, una fracción limosa contaminada en los sedimentos superficiales puede ser reemplazada por materia en suspensión menos contaminada (Laane *et al.* 1999). Esto es particularmente posible en la plataforma continental del Delta del Orinoco donde las tasas de sedimentación son unas 86.3×10^6 t al año (Bonilla *et al.* 1993).

El tipo de fluido usado en la perforación es quizás el factor antropogénico más importante que afecte la dispersión espacial y temporal de los rípios. Los fluidos de base sintética tienen una capacidad de dispersión muy limitada, mientras que los fluidos base agua normalmente presentan gran capacidad de dispersión. Por tanto, el uso de fluidos base agua para las perforaciones en Ballena y Cocuina podría explicar la dispersión amplia de los químicos sobre la escala espacial evaluada. La composición de los rípios es altamente variable pero muchos metales (Ba, Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn) y químicos (BaSO₄, PAHs y compuestos alifáticos) siempre están presentes. Aunque algunos de estos metales se detectaron en Ballena y Cocuina (e.g., Ba, Al, Cr), otros permanecieron por debajo del límite de detección (e.g., Hg, Zn, V). Asimismo, muchos de estos metales (e.g., Ba, Al) se encuentran de manera natural en el fondo oceánico, por lo que los factores de enriquecimiento proveen un indicador más efectivo de los compuestos residuales de origen antropogénico (Breuer *et al.* 2004). La Plataforma Deltana es un área sedimentaria sujeta a la deposición de metales pesados como el Ba, Fe y Al (Alfonso *et al.* 2006) debido a la gran escorrentía. Sin embargo, en los pozos costa afuera Ballena y Cocuina, los factores de enriquecimiento por metal fueron consistentemente bajos (datos no mostrados), dentro de límites aceptables y aun por debajo de lo reportado para otras áreas con perforaciones extensivas de hidrocarburos y gas, como el Golfo de México (Neff 2005). Este resultado no es inesperado considerando que Ballena y Cocuina son los primeros pozos exploratorios de la Plataforma Deltana.

Usando como referencia los niveles registrados para sedimentos de aguas someras de la Plataforma Deltana (Martín y Bone 2007), el Ba fue el único metal tres veces más abundante en Ballena y Cocuina (34–37 ppm vs 69–99 ppm), pero similar a lo encontrado en otros estudios (1–2000 ppm, ver revisión en Neff 2005). Otros metales traza asociados a rípios

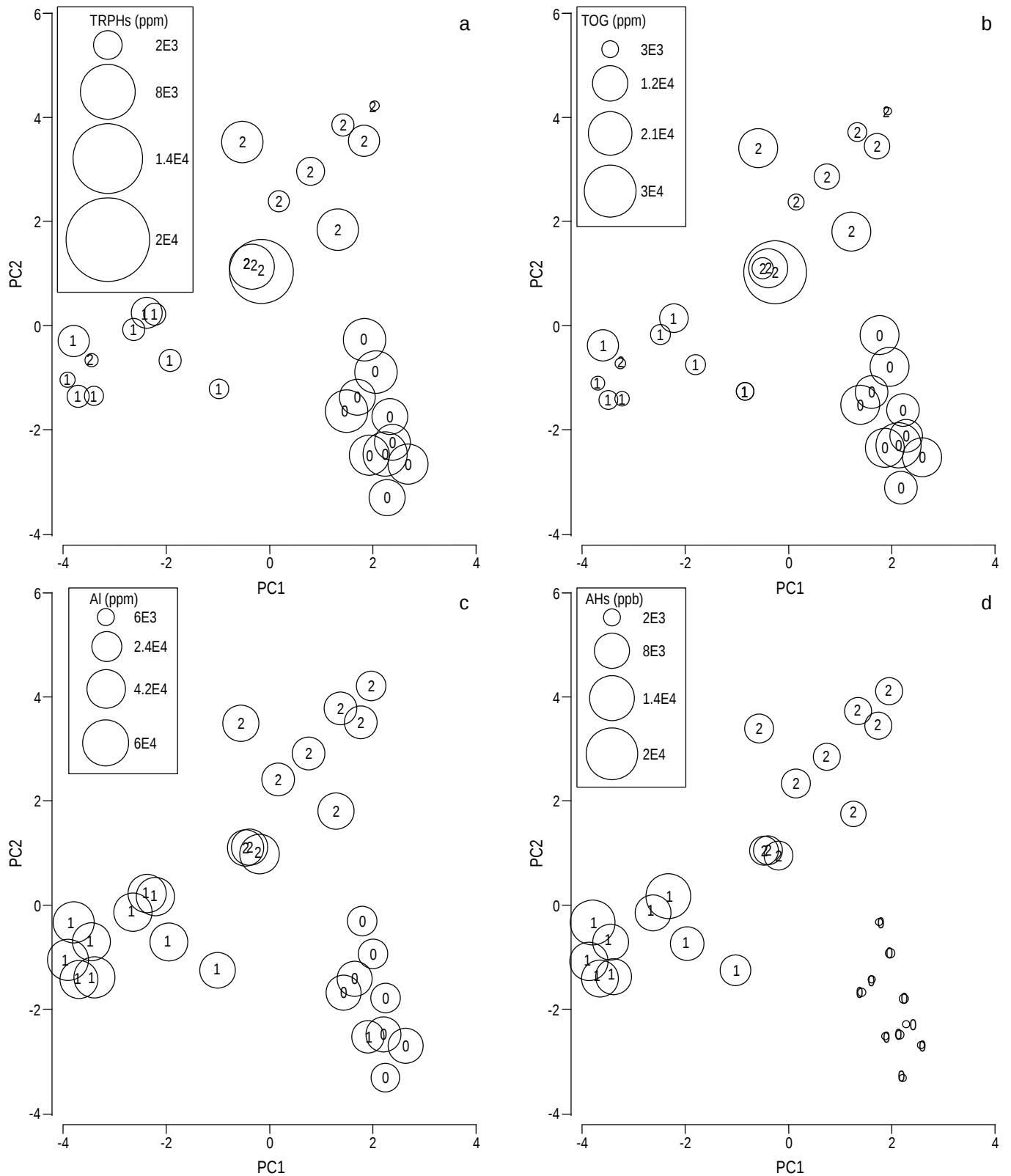


Figure 5. Environmental variables that most contributed to the dissimilarities between sampling times (numbers, same as in fig. 4) at Cocuina: **(a)** total recoverable petroleum hydrocarbons (TRPHs), **(b)** total oil and grease (TOG), **(c)** aluminum, and **(d)** aliphatic hydrocarbons (AHs).

Figura 5. Variables ambientales que más contribuyeron a las disimilitudes entre tiempos de muestreo (números, representados igual que en fig. 4) en Cocuina: **(a)** hidrocarburos totales recuperables (TRPHs), **(b)** aceites totales y grasas (TOG), **(c)** aluminio y **(d)** hidrocarburos alifáticos (AHs).

Ballena and Cocuina are deep wells (190–350 m) and their prevailing oceanographic processes at these depths remain poorly understood. *In situ* estimations of surface currents show that they move relatively fast (1.8–2.0 km h⁻¹). As drilling muds at both wells were released in shallow water, surface currents could have transported them several kilometers away before deposition (e.g., Breuer *et al.* 2004), which could explain the absence of a spatial pattern at the scale of this study.

At Ballena and Cocuina, 90–95% of the sediments were composed of silts with moderate levels of TOC, which could explain the presence and, probably, the accumulation of metals and hydrophobic compounds derived from exploratory perforation activities (e.g., Horowitz and Elric 1987). The polluted silt fraction in the surface sediments could be replaced by less polluted suspended matter (Laane *et al.* 1999). This is particularly possible on the continental shelf of the Orinoco Delta where sedimentation rates are 86.3×10^6 t per year (Bonilla *et al.* 1993).

The type of drilling fluid used during perforation is perhaps the most important anthropogenic factor affecting the dispersion of drilling muds. Synthetic-based muds have limited capacity for dispersion, whereas water-based muds normally exhibit higher dispersal potentials; thus, the use of the latter during perforation at Ballena and Cocuina could explain the wide dispersion of chemicals over the spatial scale evaluated. The composition of drilling muds is quite variable, but several metals (Ba, Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V, and Zn) and chemicals (BaSO₄, PAHs, and aliphatic compounds) are consistently present. While some of these metals were detected at Ballena and Cocuina (e.g., Ba, Al, Cr), others remained below their detection limit (e.g., Hg, Zn, V). Also, many of these metals (e.g., Ba, Al) occur naturally on the sea floor and, therefore, enrichment factors provide a more accurate signal of residual compounds of anthropogenic origin (Breuer *et al.* 2004). The Deltana Platform is subjected to the deposition of heavy metals such as Ba, Fe, and Al (Alfonso *et al.* 2006), particularly from continental runoffs. Nonetheless, at the Ballena and Cocuina offshore wells, metal enrichment factors were consistently low (data not shown), within the accepted limits and below values reported for other areas with extensive oil and gas perforation, such as the Gulf of Mexico (Neff 2005). This result is not unexpected considering that these were the first two wells explored in the Deltana Platform.

Using the levels reported for shallow sediments in the Deltana Platform as reference (Martín and Bone 2007), Ba was the only metal up to three-fold higher in concentration at Ballena and Cocuina (34–37 ppm vs 69–99 ppm), but it was still similar compared to other studies (1–2000 ppm, see review by Neff 2005). Other trace metals associated with drilling muds (e.g., Cr, Hg, Pb, Zn) showed low concentrations at Ballena and Cocuina compared to expected levels in areas where extensive oil and gas perforation occurs.

(e.g., Cr, Hg, Pb, Zn) mostraron bajas concentraciones en Ballena y Cocuina comparados a los niveles esperados en áreas con extensiva perforación para hidrocarburos o gas. Las concentraciones de TRPHs fueron tres órdenes de magnitud mayores en Ballena (4464 ppm) y Cocuina (2995 ppm) comparadas con los niveles promedio en la Plataforma Deltana (4–9 ppm). De forma similar, las concentraciones totales de PAHs fueron un orden de magnitud mayor en Ballena (0.04 ppm) y Cocuina (0.02 ppm) comparado con el nivel promedio encontrado en la Plataforma Deltana, el cual rara vez excedió los límites de detección (i.e., 0.001 ppm; Martín y Bone 2007).

En Ballena y Cocuina la macrofauna fue muy similar en términos de composición; los poliquetos, bivalvos y sipunculidos fueron los taxones dominantes, al igual que se ha observado en otros estudios (Sanders y Hessler 1969, Terlizzi *et al.* 2008). De forma similar, en la Plataforma Deltana el grupo de los poliquetos fue el más conspicuo (40–60% de la abundancia), seguido por el de los crustáceos, los nematodos y los bivalvos, entre otros taxones (Bone *et al.* 2007, Martín y Bone 2007). En Ballena, la reducción en la abundancia de los

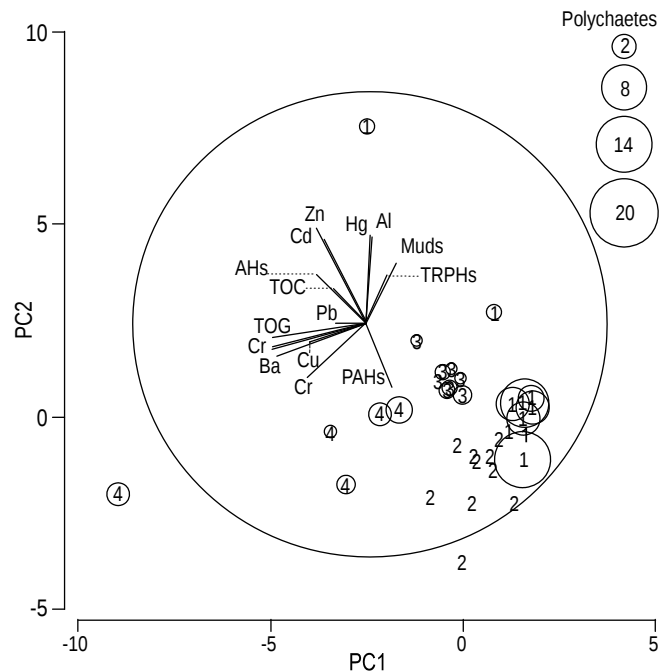


Figure 6. Mean polychaete abundance (number of organisms per sample) imposed over the principal component analysis of figure 2 for each sampling period at Ballena. Total recoverable petroleum hydrocarbons (TRPHs), total oil and grease (TOG), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and aliphatic hydrocarbons (AHs).

Figura 6. Abundancia promedio de poliquetos (número de organismos por muestra) sobrepuesta al análisis de componentes principales de la figura 2 para cada periodo de muestreo en Ballena. Hidrocarburos totales recuperables (TRPHs), aceites totales y grasas (TOG), hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) y hidrocarburos alifáticos (AHs).

Table 3. Taxonomic groups that best explained the differences between sampling times (see table 2) at (a) Ballena and (b) Cocuina, according to the analysis of similarities of sediment samples based on the Bray-Curtis dissimilarity index (B-C).**Tabla 3.** Grupos taxonómicos que mejor explicaron las diferencias entre los tiempos de muestreo (ver tabla 2) en (a) Ballena y (b) Cocuina, según el análisis de similitudes de las muestras de sedimento usando el índice de disimilitud de Bray-Curtis (B-C).

Sampling times	B-C (%)	Contribution to dissimilarity (%)							Accumulated (%)
		Polychaetes	Bivalves	Sipunculids	Nemertinids	Nematodes	Echinoderms	Gastropods	
(a) Ballena									
T1-T2	99.94	62.60	19.28	8.69					90.57
T1-T3	81.55	62.15	20.17	7.69					90.01
T1-T4	73.91	65.66	19.95	8.95					94.56
T2-T3	100.00	71.77	12.10		5.97	5.97			95.81
T2-T4	100.00	88.96	4.10						93.06
T3-T4	49.10	67.75	17.54	4.93					90.22
(b) Cocuina									
T0-T1	93.89	60.03					10.44	9.31	79.78
T0-T2	75.32	60.90		11.94	9.59	9.59			92.02
T1-T2	92.44	56.15			14.73	9.16			80.04

Concentrations of TRPHs were three orders of magnitude greater at Ballena (4464 ppm) and Cocuina (2995 ppm) compared to average levels in the Deltana Platform (4–9 ppm). Likewise, total PAH concentrations were one order of magnitude higher at Ballena (0.04 ppm) and Cocuina (0.02 ppm) compared to reported average levels for the Deltana Platform, which seldom exceed the limit of detection (i.e., 0.001 ppm, Martín and Bone 2007). The increase of some of these variables could be related to the kind of exploratory activity done at Ballena and Cocuina.

The macrofauna at Ballena and Cocuina was very similar in terms of composition, the dominant groups being polychaetes, bivalves, and sipunculids, as has been found in other studies (Sanders and Hessler 1969, Terlizzi *et al.* 2008). Likewise, in the Deltana Platform, polychaetes were the most conspicuous group (40–60% of abundance), followed by crustaceans, nematodes, and bivalves, among other taxa (Bone *et al.* 2007, Martín and Bone 2007). At Ballena, a reduction in the abundance of organisms coincided with the increase in PAHs at T2, which is supported by the fact that the variable that best explained the correlation between the chemistry of the sediments and the abundance of macrofauna was PAHs. This was followed by a slight recovery of the abundance of macrofauna at T3 and T4, as PAH levels decreased. Recovery was uneven among taxa since polychaetes seemed to respond better to this type of chemical disturbance. These organisms are known to respond to pollution efficiently through the activation of detoxification enzymes (Snyder 2002), and to be opportunistic being able to monopolize substrate under unfavorable conditions (Grassle and Grassle 1974).

organismos coincidió con el aumento de PAHs en T2, lo cual se sustenta con el hecho de que la variable PAHs es la que mejor explica la correlación entre la química de los sedimentos y la abundancia de la macrofauna. Posteriormente, la abundancia de la macrofauna mostró un ligero recobro en T3 y T4 a medida que el nivel de PAHs se redujo. El recobro de la abundancia fue desigual entre taxones dado que los poliquetos parecieron responder mejor a este tipo de disturbio químico. Estos organismos son reconocidos por su eficiente respuesta ante la contaminación mediante la activación de

Table 4. Correlations between biotic and environmental matrices at Ballena ($P < 0.01$).**Tabla 4.** Correlaciones entre matrices ambientales y bióticas en Ballena ($P < 0.01$).

Number of variables	Spearman rho correlation	Best combination
1	0.61	PAHs
2	0.60	TOC, PAHs
3	0.58	TOC, Cr, PAHs
3	0.57	TOC, PAHs, AHs
2	0.56	Mud, PAHs
4	0.55	Mud, TOC, PAHs, Cr
3	0.55	Mud, TOC, PAHs
4	0.54	TOC, Cr, PAHs, AHs
4	0.54	Mud, TOC, Cr, PAHs

PAHs: polycyclic aromatic hydrocarbons; TOC: total organic carbon; AHs: aliphatic hydrocarbons.

CONCLUSIONS

The chemical composition and macrofaunal abundance of deep-water sediments at two wells in the Deltana Platform changed temporally within a period of 30 months after perforation. At Cocuina, the most dissimilar samples were those collected immediately after (15 days) the discharge of drilling muds. Wastes were homogeneously dispersed at both Ballena and Cocuina up to 1 km from the perforation sites, indicating that the spatial scale should be increased and replicated reference sites included for a more efficient evaluation of the dispersion of drilling muds. This study provides baseline data and a first description of the relevant temporal and spatial scales required to evaluate the potential dispersion of chemical wastes from gas exploration in Venezuela. This information will be used to improve monitoring programs for offshore gas exploration and exploitation in Venezuela, and is highly valuable considering the great potential of this area for this type of exploitation.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank StatoilHydro Enterprise for providing the funds for this project and INTECMAR-USB for allowing the use of the data sets (grant 026-1942, StatoilHydro-INTECMAR-USB). We thank E Contreras (Statoil) for following this project, as well as O Farina (INTECMAR) for conducting and supervising the chemical analysis of sediments and for producing early technical reports. We would also like to thank the crews of the oceanographic vessels *Hno. Ginés* and *Guaquerí II* for their assistance and logistical support in the field. K Flynn, S Williams, and F Osborn provided valuable comments that improved the first version of this manuscript.

REFERENCES

- Alfonso JA, Martínez M, Flores S, Benzo Z. 2006. Distribution of trace elements in offshore sediments of the Orinoco Delta. *J. Coast. Res.* 22: 502–510.
- Bone D, Chollett I, Rodríguez CT. 2007. Macrobentos de aguas profundas en la costa Atlántica. *Interciencia* 32: 477–481.
- Bonilla J, Senior W, Bugden J, Zafiriou O, Jones R. 1993. Seasonal distribution of nutrients and primary productivity on the eastern continental shelf of Venezuela as influenced by the Orinoco River. *J. Geophys. Res.* 98, C2: 2245–2257.
- Breuer E, Stevenson AG, Howe JA, Carroll J, Shimmield GB. 2004. Drilling cutting accumulations in the northern and central North Sea: A review of environmental interactions and chemical fate. *Mar. Pollut. Bull.* 48: 12–25.
- Clarke KR, Warwick RM. 2001. Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation. 2nd ed. PRIMER-E, Plymouth.
- Currie DR, Issacs LR. 2005. Impact of exploratory offshore drilling on benthic communities in the Minerva gas field, Port Campbell, Australia. *Mar. Environ. Res.* 59: 217–233.
- Ellis JJ, Schneider DC. 1996. Evaluation of a gradient sampling design for environmental impact assessment. *Environ. Monit. Assess.* 48: 157–172.
- enzimas detoxificantes (Snyder 2002) y, por ser oportunistas, son capaces de monopolizar el sustrato bajo condiciones poco favorables (Grassle y Grassle 1974).

CONCLUSIONES

La composición química y la abundancia de la macrofauna en sedimentos oceánicos profundos de dos pozos de la Plataforma Deltana cambiaron temporalmente en un periodo de 30 meses después de la perforación. En Cocuina las muestras más disímiles fueron aquellas recolectadas justo después (15 días) de las descargas de rípios comparadas. Los desechos se dispersaron homogéneamente, tanto en Ballena como en Cocuina, hasta 1 km desde el sitio de perforación en ambos pozos, lo que indica que la escala espacial debe incrementarse y deben incluirse sitios de referencia para evaluar eficientemente la dispersión de rípios. Este estudio provee datos de línea base y constituye la primera descripción de las escalas espaciales y temporales relevantes para evaluar la dispersión potencial de los desechos químicos de la exploración de gas en Venezuela. La información reportada en este trabajo será usada para mejorar programas de monitorización de la exploración y explotación de gas costa afuera en Venezuela, y es de gran valor considerando el gran potencial de esta área para este tipo de explotación.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer a StatoilHydro Enterprise por proveer los fondos para este proyecto y a INTECMAR-USB por permitir el uso de los datos (proyecto 026-1942, StatoilHydro-INTECMAR-USB). Agradecemos a E Contreras (Statoil) por el seguimiento de este proyecto y a O Farina (INTECMAR) por realizar y supervisar el análisis químico de sedimentos, y por producir los reportes técnicos correspondientes. También agradecemos a la tripulación de los buques oceanográficos *Hno. Ginés* y *Guaquerí II* su asistencia logística en el campo. K Flynn, S Williams y F Osborn hicieron comentarios y ediciones muy valiosas que mejoraron el manuscrito y su versión en inglés.

- Folk RL, Ward WC. 1957. Brazos River bar [Texas]: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Res.* 27: 3–26.
- Grassle JF, Grassle JP. 1974. Opportunistic life histories and genetic systems in marine benthic polychaetes. *J. Mar. Res.* 32: 253–284.
- Gray JS, Clarke KR, Warwick RM, Hobbs G. 1990. Detention of initial effect of pollution of marine benthos: An example from the Ekofisk and Eldfisk oilfields. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 66: 285–229.
- Gray JS, Bakke T, Beck HJ, Nilssen I. 1999. Managing the environmental effects of the Norwegian oil and gas industry: From conflict to consensus. *Mar. Pollut. Bull.* 38: 5525–530.
- Holdway DA. 2002. The acute and chronic effect of wastes associated with offshore oil and gas production on temperate and

- tropical marine ecological processes. *Mar. Pollut. Bull.* 44: 185–203.
- Horowitz AJ, Elrick KA. 1987. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Appl. Geochem.* 2: 437–451.
- Jackson ML. 1970. *Análisis Químico de Suelos*. 2nd ed. Editorial Omega, Barcelona, 662 pp.
- Laane RWPM, Sonneveldt HMA, Van der Weyden AL, Loch JPC, Groeneveld G. 1999. Trends in the spatial and temporal distribution of metals (Cd, Cu, Zn and Pb) and organic compounds (PCBs and PAHs) in Dutch coastal zone sediments from 1981 to 1996: A model case study for Cd and PCBs. *J. Sea Res.* 41: 1–17.
- Lindstrom JE, Braddock JF. 2002. Biodegradation of petroleum hydrocarbons at low temperature in the presence of the dispersant corexit 9500. *Mar. Pollut. Bull.* 44: 739–747.
- Martín A, Bone D (eds). 2007. *Línea Base Ambiental Plataforma Deltana. Petróleos de Venezuela, SA. Universidad Simón Bolívar, Caracas*, 176 pp.
- Neff JM. 2005. Composition, environmental fates, and biological effects of water based drilling muds and cuttings discharged to the marine environment: A synthesis and annotated bibliography. *Batelle Duxbury, MA*, 73 pp.
- Olsøgard F, Gray JS. 1995. A comprehensive analysis of the effects of offshore oil and gas exploration and production on the benthic communities of the Norwegian continental shelf. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 122: 277–306.
- OSPAR, Oslo-Paris Convention. 2004. Guidelines for monitoring the environmental impact of offshore oil and gas activities, pp. 1–19.
- Pozebon D, Lima EL, Maia SM, Fachel JMG. 2005. Heavy metals contribution of non-aqueous fluids used in offshore oil dilling. *Fuel* 84: 53–61.
- Pozebon D, Santos JHZ, Peralba MCR, Maia SM, Barrionuevo S, Pizzolato TM. 2009. Metals, arsenic and hydrocarbons monitoring in marine sediment during drilling activities using NAFs. *Deep-Sea Res. II: Trop. Stud. Oceanogr.* 56: 22–31.
- Sanders HL, Hessler RR. 1969. Ecology of the deep-sea benthos. *Science* 163: 1419–1424.
- Santos MFL, Lana PC, Silva J, Fachel JG, Pulgati FH. 2009. Effects of non-aqueous fluids cuttings discharge from exploratory drilling activities on the deep-sea macrobenthic communities. *Deep-Sea Res. II: Trop. Stud. Oceanogr.* 56: 32–40.
- Snyder, MJ. 2002. Cytochrome P450 enzymes in aquatic invertebrates: Recent advances and future direction. *Aquat. Toxicol.* 48: 529–547.
- Terlizzi A, Bevilacqua S, Scuderi D, Fiorentino D, Guarnieri G, Giangrande A, Licciano M, Felling S, Frascetti S. 2008. Effects of offshore platforms on soft-bottom macro-benthic assemblages: A case study in a Mediterranean gas field. *Mar. Pollut. Bull.* 56: 1303–1309.
- Underwood AJ. 1993. The mechanics of spatially replicated sampling programs to detect environmental impacts in a variable world. *Aust. J Ecol.* 18: 99–116.
- USEPA, US Environmental Protection Agency. 2003. Final NPDES general permit for new existing sources and new discharges in the offshore subcategory of the oil and gas extraction category for the western portion of the outer continental shelf of the Gulf of Mexico, pp. 1–117.
- Wilson-Ormond EA, Ellis MS, Powell EN, Kim Y, Li S. 2000. Effects of gas producing platforms on continental shelf megafauna in the northwestern Gulf of Mexico: Reproductive status and health. *Int. Rev. Hydrobiol.* 85: 293–323.

*Received April 2010;
accepted February 2011.*