



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



**GEOQUÍMICA AMBIENTAL DEL DISTRITO  
MINERO SAN ANTONIO, SEDIMENTOS DE  
LOS ARROYOS DE LA CUENCA DE SAN JUAN  
DE LOS PLANES Y PLATAFORMA  
CONTINENTAL DE BAHÍA LA VENTANA, BCS,  
MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

IVONNE HAIDE POSADA AYALA

La Paz, BCS, México, junio de 2011

## DEDICATORIA

*“Tal vez en el dinero encuentres un poco de felicidad, en las amistades encuentres alegrías, en las medicinas la cura para tu enfermedad, pero el amor solo lo encontraras en la familia.” (Anónimo)*

Dedico este trabajo a mi guía, mi amuleto y mi pilar, a esa persona que en cada día de mi vida ha estado para levantarme en cada caída y alentarme para seguir siempre adelante. Atribuyo todos mis éxitos en esta vida a la enseñanza moral, intelectual y física que recibí de ella. Mi **madre**.

A mi gran Ángel *Anabell* por estar cuidándome desde el cielo y a mis otros dos Ángeles traviesos *Ali* y *Hector*, los quiero mucho. A mi gran hermana, *Julieta* por su amor incondicional, su apoyo y por darme a ese sobrino hermoso.

A la *Familia Matteotti Sánchez* por acogerme en su seno y dejarme ser parte de su muy extraordinaria familia, los quiero muchísimo y siempre los voy a llevar en mi corazón.

Y finalmente, pero sin restarles importancia, a mis amigos *Samuel* por encerrarme en el laboratorio, *Ale*, *Citla*, *Daniel*, *Fer*, *Ethel*, *Jesica*, Gris, *Paty* y mi compañera de desvelo en el último jalón a *Fátima* por su sincera amistad. Otro agradecimiento muy merecido con todo mi cariño a *Malu*, *Lili* y *Armando* por su incondicional apoyo y cariño a lo largo de mi estancia en esta ciudad e institución, a *Konstantine* y su padre por su muy acertado conocimiento. A *Magda*, amiga que te puedo decir, tú sabes que te quiero y ahí seguiremos en la batalla. Las comayas (*Irela*, *Elyn* y *Jare*) que aguantaron tantas locuras, pero sé que las van a extrañar. A mi mala influencia (*Cristian Moreno*) por ayudarme tantas veces con la compu y otras cosas, muchas gracias.

Agradezco a quienes formaron parte de mi formación.

## **RECONOCIMIENTOS ACADÉMICOS**

Deseo expresar mi agradecimiento al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN) por la oportunidad otorgada para realizar este posgrado.

A los proyectos CONACyT 25274, CONACyT 98710, SIP20101322 y SIP20101323 al mismo Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por la beca recibida y al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) por el apoyo económico otorgado.

Un agradecimiento especial a la Dra. Janette M. Murillo Jiménez y al Dr. Enrique H. Nava Sánchez por dirigir este trabajo, por su comprensión y ayuda brindada durante el desarrollo de este trabajo. Al Dr. Evgueni Choumiline por todo su apoyo en la realización de este trabajo, sus comentarios y sobre todo por ayudarme a crecer en mi formación académica. A la Dra. Ana Judith Marmolejo y al Dr. Sergio Aguíñiga por sus buena disposición de revisar este trabajo y por sus observaciones que ayudaron a mejorar este trabajo.

A la Lic. Ma. Magdalena Mendoza por todo su apoyo brindado en los trámites de las becas y de la tesis, sin ella muchos de estos trámites hubieran sido un caos.

Al Lic. Humberto Ceseña por su infinita paciencia, su amabilidad y eficiencia en todos los trámites que realicé durante mi estancia en el CICIMAR.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
1. Introducción	1
2. Antecedentes	4
2.1. Antecedentes Generales	4
2.1.1. Elementos potencialmente tóxicos	4
2.2.2. Elementos litogénicos (ETR)	7
2.2. Antecedentes Regionales	8
3. Justificación	10
4. Hipótesis y Objetivos	11
4.1. Hipótesis	11
4.2. Objetivos	11
4.2.1. Objetivo general	11
4.2.2. Objetivos particulares	11
5. Descripción del área de estudio	13
5.1. Fisiografía y geomorfología	14
5.2. Geología regional	17
5.3. Clima, vegetación y temperatura	18
6. Metodología	20
6.1. Recolección de muestras de sedimentos	20

6.2. Determinación del tamaño de grano	21
6.3. Análisis químicos	22
6.3.1. Determinación del carbono orgánico y carbonatos de calcio	22
6.3.2. Determinación de elementos mayoritarios y traza	23
6.3.2.1. Análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica	23
6.3.2.2. Análisis por Espectrofotometría de masas	24
6.4. Procesamiento estadístico de los datos granulométricos	25
6.5. Procesamiento estadístico de la composición química de los sedimentos	26
7. Resultados	30
7.1. Características granulométricas de los sedimentos	30
7.1.1. Sedimentos de arroyos	31
7.1.2. Sedimentos de playa	44
7.1.3. Sedimentos de dunas frontales	47
7.1.4. Sedimentos de la plataforma continental	48
7.2. Composición general de los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y plataforma continental	53
7.2.1. Concentración y distribución espacial de los componentes (C <sub>org</sub> , CaCO <sub>3</sub> ) elementos mayoritarios y traza, en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y plataforma continental	53

7.2.1.1. Distribución espacial del contenido de $\text{CaCO}_3$ y $\text{C}_{\text{org}}$ en sedimentos de la plataforma continental	57
7.2.1.2. Distribución espacial de las concentraciones de los elementos traza de importancia ambiental	58
7.3. Normalización de los elementos del grupo de tierras raras de los diferentes ambientes de depósito	85
7.4. Índice de geoacumulación de As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	90
7.5. Factores de enriquecimiento de los componentes mayoritarios y elementos traza	98
7.6. Asociaciones de los componentes, elementos mayoritarios y traza de los sedimentos	117
7.6.1. Desechos de minería y fundición y sedimentos de arroyos	117
7.6.2. Sedimentos de la plataforma continental	119
8. Discusión	123
8.1. Propiedades granulométricas de los sedimentos de la cuenca sedimentaria de Los Planes y de Bahía La Ventana	123
8.1.1. Sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes	123
8.1.2. Sedimentos de duna, playa y de plataforma continental de Bahía La Ventana	124
8.2. Comparación de los niveles de los contaminantes en los sedimentos del área de estudio con los resultados obtenidos para otras áreas del mundo	126

8.2.1. Desechos de minería y fundición y sedimentos de arroyo	127
8.2.2. Sedimentos de la plataforma continental	137
8.3. Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos	143
8.4. Posible origen de los elementos en sedimentos y su relación con la geología del área de estudio	149
9. Conclusiones	154
10. Recomendaciones	157
11. Literatura citada	159
12. Apéndices	176

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio y estaciones de muestreo de los diferentes ambientes sedimentarios	14
<b>Figura 2.</b> Litología y estructuras geológicas de la Cuenca de San Juan de Los Planes modificado de Pérez Briceño (2009)	19
<b>Figura 3.</b> Diagrama ternario de clasificación de los grupos texturales del material sedimentario de los diferentes ambientes de depósito (Folk, 1974)	30
<b>Figura 4.</b> Grupos de muestras de sedimentos superficiales de los arroyos y planicies de inundación	32
<b>Figura 5.</b> Distribución de (a) tamaño medio, (b) grado de selección y (c) sesgo de los sedimentos fluviales y planicies de inundación muestreados en la Cuenca de San Juan de Los Planes	33
<b>Figura 6.</b> Granulometría de sedimentos del grupo G1: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	34
<b>Figura 7.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G2: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	36
<b>Figura 8.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G3: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	37

<b>Figura 9.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G4: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	38
<b>Figura 10.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G5: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	39
<b>Figura 11.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G6: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	40
<b>Figura 12.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G7: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	41
<b>Figura 13.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G8: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	42
<b>Figura 14.</b> Granulometría de los sedimentos del grupo G9: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	43
<b>Figura 15.</b> Mapa de localización y características granulométricas de los sedimentos de playa; tamaño medio, grado de selección y sesgo de los sedimentos de playa	44

<b>Figura 16.</b> Granulometría de los sedimentos de playa de Bahía La Ventana: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	46
<b>Figura 17.</b> Mapa de localización y características granulométricas de los sedimentos de playa; tamaño medio, grado de selección y sesgo de los sedimentos de dunas frontales	47
<b>Figura 18.</b> Granulometría de los sedimentos de dunas frontales ubicadas en la porción sur de Bahía La Ventana: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	48
<b>Figura 19.</b> Distribución de a) el tamaño medio b) grado de selección y c) sesgo del sedimento de la plataforma continental de Bahía La Ventana	49
<b>Figura 20.</b> Granulometría de los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras	52
<b>Figura 21.</b> Distribución espacial del contenido de $\text{CaCO}_3$ (%) en sedimentos de la plataforma continental en Bahía La Ventana	57
<b>Figura 22.</b> Distribución del contenido de $C_{\text{org}}$ (%) en sedimentos de la plataforma continental en Bahía La Ventana	58
<b>Figura 23.</b> Distribución espacial de la concentración de As ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos,	62

playa y de la plataforma continental

**Figura 24.** Histogramas de la concentración promedio de As ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM) 63

**Figura 25.** Distribución espacial de la concentración de Cd ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental 66

**Figura 26.** Histogramas de la concentración promedio de Cd ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM) 67

**Figura 27.** Distribución espacial de la concentración de Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental 70

**Figura 28.** Histogramas de la concentración promedio de Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM) 71

**Figura 29.** Distribución espacial de la concentración de Hg ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental 73

**Figura 30.** Histogramas de la concentración promedio de Hg ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de 74

minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM)

**Figura 31.** Distribución espacial de la concentración de Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental 76

**Figura 32.** Histogramas de la concentración promedio de Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM) 77

**Figura 33.** Distribución espacial de la concentración de Sb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental 79

**Figura 34.** Histogramas de la concentración promedio de Sb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca 80

**Figura 35.** Distribución espacial de la concentración de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental 83

**Figura 36.** Histogramas de la concentración promedio de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM) 84

**Figura 37.** Patrones de las características de los ETR normalizados en algunas muestras de sedimentos de arroyos y plataforma 87

continental, a) ETR con anomalía positiva de Eu, b) enriquecimiento de ETR ligeros, c) ETR ligeros enriquecidos y pesados empobrecidos y d) ETR pesados enriquecidos con anomalía positiva de Eu

<b>Figura 38.</b> Distribución espacial de los patrones de las concentraciones de los ETR normalizados con Lutita norteamericana de los sedimentos de desechos de minería y fundición y arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes	89
<b>Figura 39.</b> Batimetría y distribución de los patrones de las concentraciones de los ETR normalizados con Lutita norteamericana de los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana	90
<b>Figura 40.</b> Distribución espacial del índice de geoacumulación para As en los sedimentos de arroyos, playa y plataforma continental	91
<b>Figura 41.</b> Distribución espacial del índice de geoacumulación para Cu en los sedimentos arroyos, playa y plataforma continental	93
<b>Figura 42.</b> Distribución espacial del índice de geoacumulación para Pb en los sedimentos arroyos, playa y plataforma continental	95
<b>Figura 43.</b> Distribución espacial del índice de geoacumulación para Zn en los sedimentos de arroyos, playa y plataforma continental	97
<b>Figura 44.</b> Distribución espacial del factor de enriquecimiento de As en los desechos de minería y fundición, en los sedimentos de los arroyo y plataforma continental	104
<b>Figura 45.</b> Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Cd en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental	106
<b>Figura 46.</b> Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Cu en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y	108

plataforma continental

**Figura 47.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Hg en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental 110

**Figura 48.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Pb en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental 112

**Figura 49.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Sb en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental 114

**Figura 50.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Zn en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental 116

**Figura 51.** Distribución espacial de los patrones de las características de los ETR normalizados con Lutita norteamericana de los sedimentos de desechos de minería y fundición en San Antonio y arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes 153

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1.</b> Comparación de la abundancia promedio de los componentes y elementos mayoritarios (%) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de los componentes mayoritarios en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental	54
<b>Tabla 2.</b> Comparación de la abundancia promedio de los elementos traza ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental	54
<b>Tabla 3.</b> Comparación de la abundancia promedio de los elementos traza ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de elementos traza de importancia ambiental en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental	59
<b>Tabla 4.</b> Comparación de la concentración de ETR normalizados ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental con los valores de la lutita norteamericana	86
<b>Tabla 5.</b> Valores de los factores de enriquecimiento (FE) de los componentes mayoritarios y elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental	100
<b>Tabla 6.</b> Análisis de componentes principales y su variabilidad a partir de las concentraciones de los elementos en desechos de minería y	118

fundición y sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

<b>Tabla 7.</b> Análisis de componentes principales y su variabilidad a partir de las concentraciones de los elementos en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana	120
<b>Tabla 8.</b> Comparación de los contenidos de los principales contaminantes ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) del los sedimentos de los desechos de minería y fundición y arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes	136
<b>Tabla 9.</b> Comparación de los contenidos de los principales contaminantes ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) del los sedimentos de la plataforma de Bahía La Ventana	141
<b>Tabla 10.</b> Valores de los criterios de ERL y ERM para elementos traza ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) y porcentaje de incidencia de posible efectos biológicos por Long <i>et al.</i> (1995)	144

## ÍNDICE DE APENDICES

Apéndice 1	Página
<b>Tabla 11.</b> Localización de las muestras tomadas de los desechos de minería y fundición en San Antonio	177
<b>Tabla 12.</b> Parámetros texturales de los sedimentos de arroyos, donde A=arcilla, LMF=limo muy fino, AF=arena fina, AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobrementemente seleccionado, MPS=muy pobrementemente seleccionado; MSG=muy sesgado a los gruesos, SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos	178
<b>Tabla 13.</b> Parámetros texturales de los sedimentos de duna, donde AM=arena media, AG=arena gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado; S=simétrico	181
<b>Tabla 14.</b> Parámetros texturales de los sedimentos de playa, donde AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobrementemente seleccionado; SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos	181
<b>Tabla 15.</b> Parámetros texturales de los sedimentos de plataforma, donde LMF=limo muy fino, LM=limo medio, AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobrementemente seleccionado, MPS=muy pobrementemente seleccionada; MSG=muy sesgado a los gruesos, SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los	182

finos, MSF=muy sesgado a los finos

<b>Tabla 16.</b> Concentraciones (%) de los elementos mayoritarios en sedimentos de los desechos de minería y fundición en San Antonio	184
<b>Tabla 27.</b> Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el Hg $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de los desechos de minería y fundición en San Antonio	184
<b>Tabla 3</b> Concentraciones (%) de los elementos mayoritarios en sedimentos de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes	185
<b>Tabla 19.</b> Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el Hg $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes	186
<b>Tabla 20.</b> Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el Hg $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de playa de Bahía La Ventana	189
<b>Tabla 4</b> Concentraciones (%) de componentes y elementos mayoritarios en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana	190
<b>Tabla 22.</b> Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el Hg $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana	192
<b>Tabla 23.</b> Exactitudes (%) de la determinación de los componentes y elementos de los diferentes materiales de referencia estándar	194
<b>Tabla 24.</b> Selección del elemento normalizador de sedimentos superficiales de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes	195
<b>Tabla 25.</b> Selección del elemento normalizador de sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana	196

Apéndice 2	Páginas
<b>Figura 52.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos	198
<b>Figura 53.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos	199
<b>Figura 54.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos	200
<b>Figura 55.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos	201
<b>Figura 56.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos	202
<b>Figura 57.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos	203
<b>Figura 58.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de playa	204
<b>Figura 59.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de dunas frontales	205
<b>Figura 60.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de la plataforma continental	206
<b>Figura 61.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de la plataforma continental	207
<b>Figura 62.</b> Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de la plataforma continental	208
<b>Figura 63.</b> FE de los elementos mayores y traza en el material	209

sedimentario de los desechos de minería y fundición en San Antonio, sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes y de la plataforma de Bahía La Ventana

**Figura 64.** Fotografía de la chimenea de fundición de Los San Juanes en San Antonio y diagrama esquemático de la generación de arsenolita dentro de las cámaras de sublimación, tomada de Carrillo (1996)

210

## RESUMEN

En México, como en muchos otros lugares en el mundo, existen innumerables áreas con fuerte contaminación ambiental a causa de actividades mineras. Dos siglos de historia en el distrito minero El Triunfo-San Antonio dejaron como resultado una cantidad aproximada de 800 mil toneladas de desechos, producto de la explotación de yacimientos minerales con oro y plata. Estudios previos en la zona revelan que dicha actividad dejó enriquecimientos por As, Cd, Pb y Zn en los sedimentos cercanos al poblado de San Antonio. El objetivo de este estudio fue identificar el impacto antropogénico sobre el distrito minero de San Antonio y el área circundante. Con este propósito se determinaron las características granulométricas de sedimentos de arroyos de la cuenca de drenaje de San Juan de Los Planes y de playa, duna y plataforma continental de Bahía La Ventana. También se determinaron las concentraciones de elementos traza (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn) en los sedimentos superficiales colectados en los diferentes ambientes de depósito del área de estudio. Las características granulométricas de los sedimentos se obtuvieron mediante las técnicas de tamizado y difracción de rayos láser. La composición química en sedimentos se obtuvo mediante las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica (EAA), espectrometría de plasma acoplado (ICP-AES) y espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado (ICP-MS). Para elementos de importancia ambiental, se aplicaron índices para determinar el grado de contaminación basado en los valores promedios para la corteza continental superior como son los factores de enriquecimiento (FE), el Índice de Geoacumulación ( $I_{geo}$ ) y los criterios para evaluar la calidad de los sedimentos ERM y ERL. Los resultados del análisis granulométrico evidencian que el tamaño medio dominante en las distribuciones texturales de los sedimentos de arroyo, duna, playa y de la plataforma continental, son las arenas con tendencia hacia las gravas, con selección muy pobre y sesgados hacia los finos. Los resultados del análisis químico muestran que las concentraciones promedio (mostradas como  $\bar{X} \pm \sigma$ ; unidades en  $mg\ kg^{-1}$ , excepto el Hg  $\mu g\ kg^{-1}$  en todos los casos), de mayor a menor, en los desechos de minería y fundición son: As ( $71682 \pm 76381$ ), Pb ( $2654 \pm 4797$ ), Zn ( $233 \pm 180$ ), Cu ( $148 \pm$

127), Sb ( $102 \pm 147$ ), Cd ( $10 \pm 10$ ) y Hg (7, valor único). Para los arroyos cercanos al área de fundición y otros arroyos fueron: As ( $2539 \pm 15892$ ), Pb ( $124 \pm 539$ ), Cu ( $27 \pm 61$ ), Zn ( $53 \pm 51$ ), Hg ( $11 \pm 12$ ) Sb ( $2 \pm 5$ ) y Cd ( $1.4 \pm 3.5$ ), los sedimentos de playa: Zn ( $11 \pm 8$ ), Pb ( $4 \pm 1$ ), Cu ( $0.5 \pm 0.3$ ), As ( $0.2 \pm 0.2$ ), Cd ( $0.05 \pm 0.04$ ) y Hg ( $24 \pm 57$ ), finalmente en los sedimentos de la plataforma continental: Zn ( $25 \pm 18$ ), Pb ( $14 \pm 9$ ), Cu ( $6 \pm 8$ ), Hg ( $6 \pm 9$ )As ( $2 \pm 3$ ), Cd ( $0.8 \pm 1$ ) y Sb ( $0.8 \pm 0.4$ ). Las concentraciones de los elementos de las tierras raras (ETR) en sedimentos de arroyos son mayores comparadas con los de la lutita norteamericana. Mientras que en los desechos mineros solo los ETR ligeros y pesados son mayores. De acuerdo al  $I_{geo}$  los elementos que presentan fuerte contaminación ( $I_{geo} > 3$ ) para sedimentos de los arroyos en orden de importancia son: Zn > Pb > As > Cu; para los sedimentos de playa Hg > Zn; para los sedimentos de la plataforma continental solamente el Zn. Con base a los FE los elementos enriquecidos en los sedimentos de los diferentes ambientes de depósito destacan el As, Cd, Pb y Sb. Los criterios de calidad ERL y ERM muestran que As, Hg y Cd representan un riesgo para la biota en los sedimentos de arroyos y en los desechos de minería y fundición. Para la plataforma continental, los sedimentos de la zona mostraron que El Cd y en menor grado el As representan un riesgo para la biota.

## ABSTRACT

In Mexico, as in many other places in the world, there are many areas with significant environmental contamination caused by mining activities. Two centuries history in the mining district El Triunfo-San Antonio left a figure of approximately 800 thousand tons of solid wastes, result of excessive exploitation of mineral deposits of gold and silver. Previous studies in the area reveal that activity stopped enrichment by As, Cd, Pb and Zn in sediments near the town of San Antonio. The aim of this study was to identify the anthropogenic impact on the mining district of San Antonio and surrounding area. For this purpose, was determined the granulometric characteristics of sediments from rivers of the drainage basin of San Juan de Los Planes and beach, dunes and continental shelf of Bahía La Ventana. We also determined the concentrations of trace elements (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb and Zn) in surface sediments collected from the different depositional environments of the study area. The granulometric characteristics of sediments were determined by sieving techniques and laser-ray diffraction. The chemical composition in sediments was determined by applying the techniques of atomic absorption spectrophotometry (AAS), mass spectrometry (ICP-AES) and inductively couple plasma mass spectrometry (ICP-MS). For elements of environmental significance, index were applied to determine the degree of pollution based on the average values for the upper continental crust such as the enrichment factors (EF), geoaccumulation Index ( $I_{geo}$ ) and the criteria for assessing sediment quality ERL and ERM. Particle size analysis results show that the average dominant textural distributions of stream sediment, dune, beach and shelf are the sands with trend to grave, with very poor selection and skewed towards fine. The chemical analysis results show that the average concentrations (shown as  $\bar{X} \pm \sigma$ ; units  $\text{mg kg}^{-1}$ , except Hg  $\mu\text{g kg}^{-1}$  in all cases), high to low, in the mining and smelting wastes are: As ( $71682 \pm 76381$ ), Pb ( $2654 \pm 4797$ ), Zn ( $233 \pm 180$ ), Cu ( $148 \pm 127$ ), Sb ( $102 \pm 147$ ), Cd ( $10 \pm 10$ ) y Hg (7, unique valor). For streams near the smelting area and other streams were: As ( $2539 \pm 15892$ ), Pb ( $124 \pm 539$ ), Cu ( $27 \pm 61$ ), Zn ( $53 \pm 51$ ), Hg ( $11 \pm 12$ ) Sb ( $2 \pm 5$ ) y Cd ( $1.4 \pm 3.5$ ), beach sediments: Zn ( $11 \pm 8$ ), Pb ( $4 \pm 1$ ), Cu ( $0.5 \pm 0.3$ ), As ( $0.2 \pm 0.2$ ), Cd ( $0.05 \pm 0.04$ ) y

Hg ( $24 \pm 57$ ), finally in the continental shelf sediments: Zn ( $25 \pm 18$ ), Pb ( $14 \pm 9$ ), Cu ( $6 \pm 8$ ), Hg ( $6 \pm 9$ ), As ( $2 \pm 3$ ), Cd ( $0.8 \pm 1$ ) y Sb ( $0.8 \pm 0.4$ ). The concentrations of rare earth elements (REE) in sediments of streams are higher compared with those of the American shale. While in the tailings only light and heavy REE are higher. The elements that present heavy pollution ( $I_{geo} > 3$ ) for stream sediments in order of importance are: Zn > Pb > As > Cu; for beach sediments: Hg > Zn; for continental shelf sediments only Zn. Based on the EF the enriched elements in sediments of different depositional environments include As, Cd, Pb and Sb. Quality criteria ERL and ERM show that As, Hg and Cd pose a risk to the biota in sediments of streams and the mining and smelting wastes. For the continental shelf sediments from the area showed that Cd and As less hazardous to the biota.

## GLOSARIO

**Amalgamación.** Extracción de los metales preciosos de los minerales que los contienen mediante la utilización del mercurio.

**Contaminación.** Es causada cuando la entrada de actividades humanas aumenta la concentración de sustancias en agua de mar, sedimentos u organismos por encima del nivel de fondo para tal área y los organismos.

**Contaminante.** Generalmente, cualquier sustancia introducida en el ambiente que afecta adversamente los recursos naturales o la salud de seres humanos, de animales, o de ecosistemas.

**Cuenca de drenaje.** Superficie donde se recoge el agua drenada por una corriente de agua.

**Elementos traza.** Elemento químico cuya concentración es menor a  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ .

**Fundición.** Proceso térmico en el cual tienen lugar las reacciones químicas para producir metal líquido de una mena beneficiada.

**Jales.** Apilamientos de materiales de rocas molidas y subproductos que se generan después de que los minerales de interés han sido extraídos de las rocas que lo contienen.

**Hidrólisis:** reacción ácido-base entre una sustancia, típicamente una sal, y el agua. Al ser disueltos en agua, los iones constituyentes de una sal se combinan con los iones hidronio u oxinio,  $\text{H}_3\text{O}^+$  o bien con los iones hidroxilo,  $\text{OH}^-$ , o ambos. Dichos iones proceden de la disociación o autoprotólisis del agua. Esto produce un desplazamiento del de disociación del agua y como consecuencia se modifica el pH.

**Intemperismo.** Desintegración y descomposición de una roca en la superficie próxima a ella como consecuencia de su exposición a los agentes atmosféricos, con la participación de agentes biológicos.

**Lixiviación.** Empobrecimiento de materiales constituyentes solubles de la parte superior del suelo por percolación de aguas descendentes.

**Mena.** Mineral que contiene metal en concentración suficiente para ser explotado en forma rentable. Mineral en su forma natural, sin explotar.

**Metales.** Conjunto de elementos que se caracterizan por presentar enlace metálico y una serie de características físicas y químicas comunes. Los metales poseen ciertas propiedades físicas características, entre ellas son conductores de la electricidad. La mayoría de ellos son de color grisáceo, pero algunos presentan colores distintos, suelen ser opacos o de brillo metálico, tienen alta densidad, son dúctiles y maleables, tienen un punto de fusión alto, son duros, y son buenos conductores (calor y electricidad).

**Metaloides o semimetales.** Comprenden una de las tres categorías de elementos químicos siguiendo una clasificación de acuerdo con las propiedades de enlace e ionización. Sus propiedades son intermedias entre los metales y los no metales. No hay una forma unívoca de distinguir los metaloides de los metales verdaderos, pero generalmente se diferencian en que los metaloides son semiconductores antes que conductores.

**Mineral.** Elemento o compuesto inorgánico que ocurre en forma natural, teniendo una estructura interna ordenada y como características: composición química, forma cristalina y propiedades físicas.

**Minería.** Es la obtención selectiva de los minerales y otros materiales a partir de la corteza terrestre.

**Terrero.** Apilamientos de diversos materiales producto de los trabajos de minería, los cuales pueden contener las rocas con concentraciones de metales de interés ya sea la roca original o la roca molida para el proceso de extracción de los metales de interés.

**Valor de fondo o “background”.** De un determinado metal pesado en sedimentos es el contenido natural en ese metal (sin intervención humana). Dicho valor va a estar en función de la geoquímica del área fuente de los sedimentos en cuestión.

## 1. INTRODUCCIÓN

Estudios sobre la contaminación por metales y metaloides (elementos traza - ET) son importantes dado que la mayoría son potencialmente tóxicos (Cothorn, 1994), provocando el agravamiento a los problemas ambientales, esto ha dado origen a una nueva rama de la geoquímica, llamada Geoquímica Ambiental su campo de estudio abarca las complejas interacciones químicas entre litósfera, hidrosfera, atmósfera y biósfera, especialmente las que conducen a la degradación del ambiente causadas por la acción del ser humano (Fleet, 1984). En consecuencia, incluye el estudio de los numerosos factores que condicionan la fuente, distribución, dispersión, concentración y tiempo de residencia de los elementos y compuestos químicos en los sistemas del ciclo biogeoquímico. Está evidentemente vinculada con la salud humana, animal y vegetal, y su tarea es por naturaleza multidisciplinaria (Thornton, 1993).

En el medio ambiente podemos encontrar a los ET de forma natural y antropogénica. La principal fuente natural de los ET es la erosión y degradación de las rocas circundantes. Sin embargo, existen una gran cantidad de entradas de ET, por fuentes antropogénicas, a la atmosfera, agua y suelo como son: la minería, los procesos metalúrgicos, las descargas de las aguas residuales, industriales y urbanas, la quema de combustibles fósiles (principalmente carbón), la incineración de desechos municipales, la producción de cemento, la explotación de fosforitas, la generación de lodos de aguas residuales, el uso de pesticidas y fertilizantes comerciales, y otros (Daikumar *et al.*, 2010; Callender, 2003; Clark, 2001; Anikiev *et al.*, 1994; Nriagu y Pacyna, 1988; Adriano, 1986; Salomons y Förstner, 1984). Entre estas fuentes destacan la minería y la fundición como fuentes importantes (Nriagu, 1979 y 1989; Viers *et al.*, 2008), ya que en los procesos de recuperación de metales de interés económico algunos ET, asociados con yacimientos minerales como son: As, Cu, Cd, Hg, Pb, Sb y Zn, son enriquecidos y acumulados resultando un riesgo para la salud, por su alto potencial tóxico. La mayoría de los desechos de minería y fundición no se disponen adecuadamente siendo abandonados en patios industriales, barrancas y

espacios abiertos (Olvera, 2008; Hilts, 2003; Morrison, 2003; Mugica *et al*, 2003; Monroy *et al*, 2002; Esterman y Maynard, 1998; Nriagu y Pacyna, 1988), con la posibilidad de ser transportados por viento y/o agua hacia las áreas, donde pueden afectar los cuerpos de agua y suelos, y finalmente ocasionar daños a la salud de la población.

En muchos casos, la minería es ampliamente reconocida debido al impacto que tiene en aguas superficiales y subterráneas generadas en áreas mineras. Los ET disueltos y particulados procedentes de las minas abandonadas eventualmente son depositados en las partes bajas de los sistemas fluviales, donde se pueden estar acumulando en los estuarios o en las zonas costeras (Osher *et al.*, 2006). La contaminación del agua por los ET disueltos frecuentemente está asociada con el drenaje ácido de minas (DAM) (Razo *et al.*, 2004; Blowes *et al.*, 2003), uno de los riesgos más serios de la industria minera, ya que el DAM es la consecuencia de la oxidación de minerales sulfurados expuestos a condiciones ambientales, generando efluentes caracterizados por valores de pH bajos que favorecen la disolución de metales y metaloides (e.g. As, Cd, Cu, Zn) de los sedimentos de arroyos, rías (estuarios) y lagos (Wilson *et al.*, 2005; Blight, 1997). El DAM no representa directamente un problema ambiental en los sitios mineros en los climas semiáridos debido a la baja precipitación y alta tasa de evaporación. No obstante, la minería en climas secos puede también producir el DAM, el cual no comienza inmediatamente, pero una vez iniciado, podría continuar por muchos años. Lo contrario a la generación de DAM, los efectos del clima como rachas de viento y tormentas con lluvias torrenciales tienen gran impacto en la dispersión de metales en áreas semiáridas con los suelos escasamente vegetados. La erosión por viento puede ser una causa principal de la pérdida y propagación del material de desechos confinados en su entorno y puede afectar presas de jales en todo tipo de climas, aunque empeora a medida que aumenta la aridez climática (Razo *et al.*, 2004).

La mayor parte de los distritos mineros en México se ubican en zonas áridas y apartadas (Vizcaíno, 1975); algunos de los estados que realizan esta actividad son

Colima (Corona Esquivel y Henríquez, 2004) San Luis Potosí, (Razo *et al.*, 2004), Coahuila (Olvera, 2008), Hidalgo, Taxco-Guerrero, Sonora, Chihuahua (Romero *et al.*, 2008), entre otros. En Baja California Sur el distrito minero El Triunfo-San Antonio aparte de la extracción del oro y plata, durante la actividad minera se generó una gran cantidad de desechos sólidos, los cuales fueron abandonados en el área sujetos a ser removidos y transportados hacia la zona costera en épocas de lluvias. Por ejemplo, en el área minera de San Antonio se presenta enriquecimiento de ET en los materiales sedimentarios asociados a la minería y fundición tales como As, Cd, Pb y Zn en sedimentos (Naranjo, 2004; Anónimo, 2003; Carrillo-Chávez, *et al.*, 2000; Carrillo y Drever, 1998 y 1998a; Carrillo y Huyck, 1997; Carrillo 1996) y altas concentraciones de As en agua de pozos (Carrillo-Chávez, *et al.*, 2000; Anónimo, 2005). Por lo anterior se planteó la necesidad de realizar este trabajo, para hacer una evaluación de la presencia y distribución de las concentraciones de los contaminantes en los sedimentos del arroyo San Antonio y algunos otros arroyos y playa dentro de la Cuenca de San Juan de Los Planes, así como de los sedimentos de la plataforma de Bahía La Ventana.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. ANTECEDENTES GENERALES

Los ET son aportados desde el continente al mar por procesos naturales como resultado del intemperismo de la corteza continental (Li, 2000). En general, la concentración de elementos en aguas naturales y sus flujos dependen de la geología de la cuenca de drenaje, de los procesos de intemperismo y lixiviación, de sus interacciones con la materia orgánica, de su entrada por vía atmosférica, mas las interacciones físicas y químicas con los contaminantes (Chester, 2003). Los aportes de elementos por aguas naturales se integran finalmente a los ambientes costeros como lagunas, estuarios y plataformas continentales (Li, 2000; Riley y Chester, 1971).

#### 2.1.1. Elementos potencialmente tóxicos

Trabajos referidos a la geoquímica y caracterización ambiental de los ET se reportan para diversas regiones del mundo durante las últimas décadas, realizados en agua de ríos, de lagos y del mar (Rose *et al.*, 2007), sedimentos fluviales y marinos (Rubio *et al.*, 2000 y 2000a), y sobre la biota (Valente y Gomes, 2007; Wilson *et al.*, 2005; Lorber y Erhart-Schippeh, 2000; Narayan, 1998; García-Guinea y Huascar, 1997; Edwards, 1996; Macklin *et al.*, 1996; Chandler y Tosatti, 1995). De éstos los tres últimos son los más estudiados debido a la facilidad de su manejo y procesamiento, al considerar las dificultades metodológicas que se tienen durante el análisis de los ET disueltos o particulados en el agua. En particular, se ha demostrado la presencia de elementos de importancia ambiental (Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn, y otros) en concentraciones elevadas en los ecosistemas costeros y marinos de las diferentes regiones del mundo (Viers *et al.* 2008; Rodríguez Figueroa, 2004; Shulkin, 1998).

Particularmente en las zonas con actividad minera, donde se han reportado como contaminantes al As, Cd, Cu, Ni, Pb, Se y Zn, entre otros (Lizárraga, 2007; Adriano, 1986) debido a que por enriquecimiento antropogénico sus concentraciones exceden niveles reportados de estos elementos en los

componentes naturales de los ecosistemas. Y dada la intensidad de esta actividad a nivel mundial, es posible constatar serias alteraciones de la composición de los sedimentos de distintos ambientes aledaños a zonas mineras y por ende, los efectos negativos sobre la biota y la salud humana. Un ejemplo clásico de este tipo de impactos es la “enfermedad Itai-Itai” en la prefectura Toyama (Japón), a causa del envenenamiento de la población de esta zona por cadmio debido a la movilización de tal elemento desde los desechos de minería de zinc y su aporte a consecuencia de las lluvias en el agua del río Jinzu y sus efluentes, el cual se utilizaba para irrigación de los campos de arroz, y también como agua potable, la pesca y otros usos de las poblaciones aguas abajo. Por el consumo de arroz y agua contaminados con Cd la población local se intoxicó (Salomons y Förstner, 1984). Wilson *et al.* (2005) reportaron la dispersión de varios metales (Cd, Cu, Pb y Zn) por aguas subterráneas generando drenaje ácido cerca de la mina de cobre “Britannia” (British Columbia, Canadá), la más grande del antiguo imperio británico, con posible impacto sobre los organismos vivos.

En Europa Oriental estudiaron la distribución de elementos como As, Cd, Cu y Pb presentes en sedimentos a lo largo de los ríos Lopus, Somes y Tisa (Bird *et al.*, 2003). Los autores revelaron que aunque no se observó enriquecimiento de estos elementos río abajo, las concentraciones de los elementos mencionados son potencialmente peligrosas para la salud humana debido a su biodisponibilidad elevada. En el río Ekulu en Enugu (Nigeria), Adaikpoh *et al.* (2005) analizaron metales pesados en depósitos de carbón y sedimentos, encontraron niveles elevados de As, Cd, Cr, Ni, Mn y Pb. En particular, estos autores reportan un efecto estacional sobre las concentraciones de estos elementos en sedimentos fluviales. Van Aardt y Erdmann (2004) analizaron lodos, sedimentos y tejidos de peces en el río Mooi, aledaño a una mina de oro, en Sudáfrica. Los resultados revelaron la presencia de altas concentraciones de Cd, Cu y Pb en tejidos de peces. Por otro lado, aunque se demostró baja biodisponibilidad por Cd y Pb, dado que estos formaron complejos insolubles en sedimentos, también encontraron la presencia de uranio en los mismos.

En Firefly Village una mina abandonada en Shikoku (Japón) Anasawa *et al.* (2004) efectuaron un análisis multivariado de componentes principales para caracterizar la distribución de metales pesados (Cd, Fe y Mn) en agua y sedimentos, encontrando cierta similitud en el patrón de distribución de elementos en los sitios de muestreo, salvo los aledaños a la mina. Fuertes impactos en minas abandonadas sobre los niveles de ET de importancia ambiental (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en sedimentos de ríos aguas abajo y en sistemas costeros en Queensland, Australia (Moss y Constanzo, 1998), tales impactos fueron medidos con la guía de calidad de sedimentos con los índices ERL y ERM desarrollados por la NOAA (Long *et al.*, 1995).

Estudios sobre geoquímica con influencia de minería en climas tropicales existen en una amplia variedad de trabajos sobre sedimentos cercanos a una mina de plata abandonada en Tipperary (Irlanda) enriquecidos con Cd, Pb y Zn (Aslibekian y Moles, 2002), al norte de Italia Dinelli y Tateo (2001) investigaron los factores que controlan la dispersión de metales pesados es un área minera Vigonzano con depósitos de sulfuro Fe-Cu, sobre la materia particulada suspendida en el río Marabasco entre Colima y Jalisco (Shumilin *et al.*, 2005a), la fracción lábil en sedimentos del río Marabasco y la laguna de Barra Navidad (Marmolejo-Rodríguez *et al.*, 2007), entre otros, sin embargo estudios en climas áridos son muy escasos. Algunos de estos son:

El impacto combinado de minas y la actividad antropogénica en el distrito Rodalquilar (España), una región semiárida del sureste de España, dieron como resultado los niveles elevados de As, Bi, Cu, Mo, Pb, Sb, Te y Zn en sedimentos de esta área, atribuidos a origen antropogénico (Wray, 1998). En una región extremadamente árida del norte de Chile, dentro de Los Andes y el desierto Atacama, Romero *et al.* (2003) evaluaron la concentración y fuentes de As en aguas y sedimentos en el río Loa. Los autores determinaron que la actividad geotermal del volcán El Tatio es la causa natural de las concentraciones elevadas de As en agua y los sedimentos, además de la intensa actividad minera en la extracción de cobre como fuente antropogénica.

Como se puede apreciar, estudios donde están ampliamente documentados los efectos de elementos traza potencialmente tóxicos, provenientes de minería y fundición de los minerales sobre ambientes sedimentarios en ríos y sistemas lagunares o estuarinos tienen un alto impacto en los ecosistemas y por ende, a la salud humana.

#### 2.1.2. Elementos litogénicos (ETR)

El grupo de los elementos de tierras raras (ETR) que ni son tierras ni son raras, juegan un papel muy importante para explicar la génesis de la corteza terrestre, por aportes en la erosión y degradación de las rocas (Cornell, 1993), así como ayudar a identificar el impacto antropogénico en sedimentos (Olmez *et al.*, 1991), por contribución de los desechos mineros de yacimientos minerales (Shumilin *et al.*, 2005), refinerías de petróleo, industrias electrónicas y de semiconductores (Elbaz-Poulichet y Dupuy, 1999; Hendrick, 1995).

Tanto en agua de ríos (Sholkovitz, 1995), agua estuarina (Douglas y Adeney, 2000; Sholkovitz, 1995), agua marina (Greaves y Elderfield, 1999), sedimentos de río (Marmolejo-Rodríguez *et al.*, 2007), sedimentos superficiales marinos (Courtois y Hoffert, 1997), material disuelto y particulado disuelto (Elbaz-Poulichet y Dupuy, 1999), fluidos hidrotermales y plumas (Mitra y Elderfield, 1994). Es importante mencionar que en el área de estudio no existen trabajos sobre el grupo de las tierras raras.

## 2.2. ANTECEDENTES REGIONALES

En el estado de Baja California Sur, Nava Sánchez (1992) caracterizó los ambientes sedimentarios de la Cuenca de San Juan de Los Planes a partir de la sedimentología y geomorfología, y explicó que la cuenca sedimentaria comprende un graben orientado norte-sur, con pilares tectónicos en donde se han desarrollado abanicos aluviales que se “entrelazan” lateralmente y forman una pendiente común. De acuerdo a los rasgos morfológicos de la cuenca, el autor infiere que en esta cuenca podrían transportarse los contaminantes desde San Antonio hasta Bahía la Ventana, principalmente durante lluvias torrenciales, generadas por el paso de los ciclones tropicales a través de esta parte de la península y dejar su “huella” en los materiales de la cuenca hidrológica y la parte adyacente del mar.

Estudios geoquímicos en los sedimentos en Baja California Sur, Rodríguez Figueroa *et al.* (1998); Shumilin *et al.* (2000; 2011), Choumiline *et al.* (2006) y Rodríguez Figueroa (2004, 2010) encontraron que en materiales de distintos ambientes depositacionales (arroyo, playa y desechos de minería) y en los sedimentos marinos de la región minera de Santa Rosalía se observa un enriquecimiento natural en varios elementos As, Ba, Co, Hg, Ni, Sb, Se, U y Zn. Pero las concentraciones de Co, Cu, Mn, U y Zn excedieron mucho los niveles de referencia a causa de la explotación y procesamiento del yacimiento de los minerales de cobre, responsables por la contaminación antropogénica de esta área.

En el distrito minero El Triunfo-San Antonio Carrillo (1996) realizó un estudio geoquímico enfocándose principalmente a la contaminación del agua subterránea por lixiviación de los desechos mineros con alto contenido en arsénico; indicando que el agua subterránea contiene un promedio de este elemento de  $0.04 \text{ mg L}^{-1}$ , Martínez (1998) monitoreó seis pozos, un manantial y una pila de cianuración en la misma región encontrando en promedio  $0.417 \text{ mg L}^{-1}$  de As, tal valor se encuentra por arriba de la norma establecida por la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.) para agua potable ( $0.05 \text{ mg L}^{-1}$ ). En este mismo distrito, Carrillo y

Drever (1998a) reportaron que existen más de 800 mil toneladas de desechos de minería y de fundición con un promedio de 4% de óxido de arsénico, de los cuales aproximadamente 600 toneladas de arsenolita pura.

Dentro del mismo distrito, Naranjo-Pulido *et al.* (2002) evaluaron el contenido de As en suelos, encontrando que sus niveles exceden el límite ambiental de este elemento ( $2 \text{ mg kg}^{-1}$ ), establecido por Galván y Corey (1987). Según la opinión de estos autores, la causa probable de la contaminación por As de los suelos es por las escorrentías y por la emisión de las cenizas durante el periodo activo de la fundición para la extracción del Au y Ag.

### 3. JUSTIFICACIÓN

A causa de la actividad minera antigua (intermitente a partir del año 1748) en el distrito minero El Triunfo-San Antonio se generaron 800 mil toneladas de desechos con altos contenidos de As, Cd, Pb y Zn (Carrillo y Drever, 1998a), por lo que la zona adyacente presenta problemas de contaminación en agua y suelos con concentraciones de metales pesados superiores a los límites permisibles (LMP), establecidos por la PROFEPA. Existen pocos estudios que evalúan la calidad de sedimentos, procedentes de zonas mineras con climas áridos a semiáridos. La mayor parte de las instalaciones mineras se ubican en partes altas de las cuencas sedimentarias, y es por esta razón que este tipo de estudios son altamente necesarios ya que cualquier tipo de desechos es transportado hacia la zona costera aledaña. El litoral de esta zona es un recurso natural valioso para los desarrollos costeros habitacionales y recreativos, además de que proporcionan alimentación a la población local y turística. Este trabajo está enfocado en evaluar el grado de contaminación de los sedimentos de la Cuenca de San Juan de Los Planes y de la zona costera de Bahía La Ventana, esperando que en un futuro próximo se aborden también los estudios directos sobre toxicidad y bioacumulación de los contaminantes en la biota terrestre y marina para conocer con certeza su impacto sobre la cadena trófica, estado de los ecosistemas correspondientes y la salud de la población.

## 4. HIPOTESIS Y OBJETIVOS

### 4.1. Hipótesis

Los desechos mineros de la región de San Antonio, con altas concentraciones de elementos traza considerados potencialmente tóxicos para la salud, están siendo movilizados vía fluvial hacia la cuenca de San Juan de Los Planes y Bahía La Ventana.

### 4.2. Objetivos

#### 4.2.1. Objetivo general

Evaluar la influencia antropogénica por enriquecimiento de elementos, asociados a la minería en los sedimentos superficiales de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes y de la playa y plataforma continental de Bahía La Ventana.

#### 4.2.2. Objetivos particulares

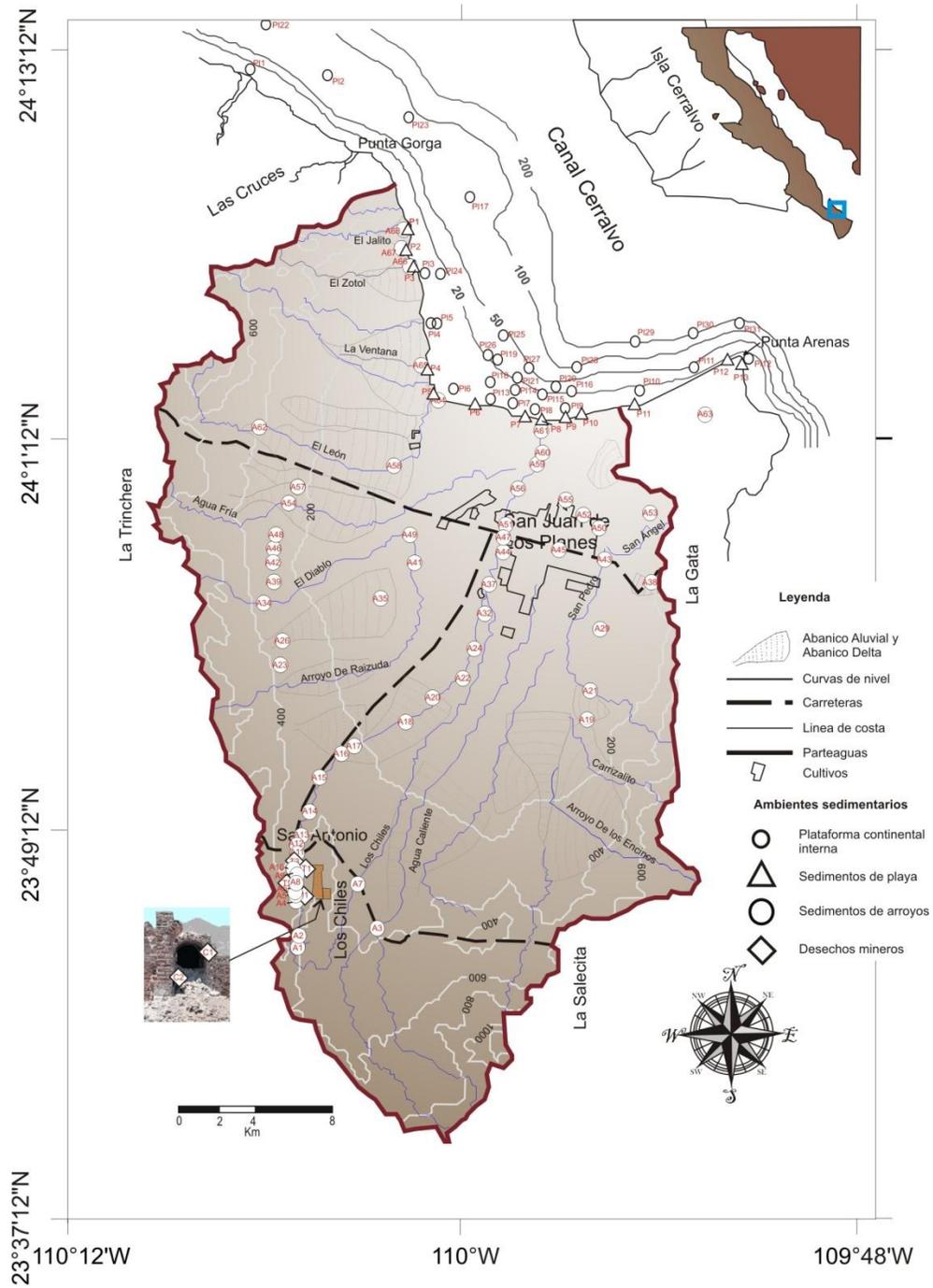
- 1) Obtener las características texturales (tamaño medio, grado de selección y tendencia o sesgo) de los sedimentos superficiales de los diferentes ambientes sedimentarios.
- 2) Determinar la concentración de elementos traza de importancia ambiental (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn) en sedimentos superficiales de la Cuenca de San Juan de Los Planes y plataforma de Bahía La Ventana, para conocer la influencia antropogénica por la actividad minera.
- 3) Calcular los factores de enriquecimiento de los elementos en los sedimentos de la Cuenca de San Juan de Los Planes y plataforma continental de Bahía La Ventana con respecto a los valores de la corteza superior.

- 4) Identificar los niveles de contaminación por la actividad minera en los sedimentos de los diferentes ambientes de depósito, aplicando los conceptos del índice de geoacumulación y la guía de calidad de los sedimentos ERM y ERL.
- 5) Definir las asociaciones geoquímicas de los elementos traza (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn) en los sedimentos de los diferentes ambientes de depósito para inferir su posible origen, aplicando el análisis de componentes principales.
- 6) Establecer los niveles de ETR en los sedimentos superficiales de los diferentes ambientes de depósito en el área de estudio, caracterizados por sus patrones normalizados.

## 5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DEL ESTUDIO

El área de estudio está integrada por la cuenca hidrológica de San Juan de Los Planes y por la porción marina adyacente a la cuenca que comprende la plataforma de Bahía La Ventana (Figura 1). Esta cuenca recibe su nombre debido a que en su porción centro-norte se localiza la población agrícola de San Juan de Los Planes. El área se ubica aproximadamente a 50 km al sureste de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, está limitada por los paralelos  $24^{\circ} 10'$  y  $23^{\circ} 40'$  de latitud Norte y los meridianos  $109^{\circ} 50.0'$  y  $110^{\circ} 07.50'$  de longitud Oeste, comprendiendo una superficie aproximada de  $936.4 \text{ km}^2$ . La forma de la cuenca es alargada con una longitud de 55 km y un ancho aproximado de 24 km. Presenta una altitud máxima de poco más de 1400 metros sobre el nivel del mar en la sierra La Salecita en su parte sur (Del Rosal Pardo, 2003; Pérez Briceño, 2009).

En la parte norte de la Cuenca de San Juan de Los Planes se encuentra Bahía La Ventana, cuyas coordenadas geográficas que delimitan el área son:  $23^{\circ} 47' 6.67''$  y  $24^{\circ} 09' 42.40''$  de latitud Norte y  $109^{\circ} 49' 22.03''$  y  $110^{\circ} 03' 31.60''$  de longitud Oeste, limitada al norte por Punta Gorda, al sur por Punta Arenas y al noroeste por la isla Cerralvo. En la parte media de la bahía se encuentra el Canal Cerralvo el cual tiene un ancho aproximado de 13 km y una profundidad de hasta 500 m en la porción más estrecha de la bahía, al frente de Punta Arenas. La morfología de la línea de costa, así como la del canal Cerralvo están regidos por fallas normales dándoles una forma de letra L.



**Figura 1.** Localización del área de estudio y estaciones de muestreo de los diferentes ambientes sedimentarios.

## 5.1. Fisiografía y geomorfología

El área de estudio pertenece a la provincia fisiográfica de Baja California, representada en parte por la subprovincia de Tierras Altas del Sur (Raisz, 1959). Esta subprovincia es un complejo fallado producto del levantamiento de un terreno montañoso de hasta 2000 m de altura (Nava Sánchez, 1992). Está representada por un relieve de sierras y valles, obedeciendo a una estructura geológica de pilares y cuencas cuyo eje longitudinal está orientado norte-sur. La estructura más sobresaliente es la sierra La Victoria, donde predominan las rocas graníticas y está integrada por las sierras La Laguna y San Lázaro, con alturas que sobrepasan ligeramente los 2000 m. Al norte, la sierra La Victoria se divide en la Sierra Las Cruces y Santa Martha-El Carrizal que son de menor altura y que están separadas por el graben de San Juan de Los Planes (Pérez Briceño, 2009; Nava Sánchez, 1992).

Es aquí donde se desarrolló la Cuenca de San Juan de Los Planes, cuya forma está controlada por las diversas fallas que la delimitan lateralmente lo que hace a la geomorfología de la cuenca muy diversa. Al pie del frente montañoso, asociado con fallas, son comunes los abanicos aluviales, el pie de monte, los taludes de derrubios, los conos de deyección y la conjunción de estas formas, hacia la parte central, constituyen una bajada. En la porción central norte se han desarrollado planicies de inundación y cerca de la línea de costa, por donde se llevan a cabo las descargas fluviales, existe una laguna, de forma alargada y perpendicular a la costa llamada "La Bocana", que representa una comunicación con el mar esporádica (Nava Sánchez, 1992).

De acuerdo al relieve, las partes altas están representadas por las sierras San Antonio con 1100 m y La Salecita al sureste con una altura máxima de 1400 m. El flanco occidental de la cuenca es definido por las sierras La Trinchera con 820 m y Las Cruces con 1200 m de altura, mientras que hacia el oriente se alza la denominada Sierra Santa Martha-El Carrizal con 1100 m de altura (Pérez Briceño, 2009).

En la zona de sierras, propuesta por Del Rosal Pardo (2003), se presentan suelos poco profundos y afloramientos rocosos, la pendiente promedio es mayor de 6.7% y el tipo de drenaje es principalmente dendrítico. Por otra parte la zona de pendiente incluye depósitos de pie de monte y abanicos aluviales producto de la acción fluvial. Finalmente está la zona de planicies, cuya pendiente es la más suave, con arroyos de mayor longitud, que se trenzan y forman drenajes paralelos a subparalelos. La pendiente en general varía de 3.3% a menos de <0.5%, y los suelos son profundos en esta región.

En la margen costera prevalecen las playas, desde Punta Arenas al sur hasta Punta Gorda al norte. Nava Sánchez (1992) describe a la línea de costa del área de interés como una provincia sedimentaria, con dos orientaciones principales: norte-sur al pie de los abanicos y este-oeste al sur del Canal Cerralvo. La línea de costa al pie de los abanicos está asociada a una falla con la misma orientación, presenta escarpes de erosión en depósitos Pleistocénicos con sedimentos oxidados, con alturas que varían de 8 a 10 m. También existen terrazas fluviales en depósitos recientes de abanicos deltaicos, donde alcanzan 3 m de altura. Las playas son de pendientes fuertes y los sedimentos son de arenas gruesas. Frente a las descargas fluviales importantes la línea de costa es lobulada, desarrollada por abanicos-delta deltaicos muy pequeños. La parte orientada este-oeste está compuesta de playas, las cuales están bien desarrolladas hacia ambos extremos. En la parte central las playas son más reducidas y en algunos puntos presentan escarpes en rocas sedimentarias, las cuales representan terrazas marinas que se continúan por debajo del nivel del mar, a manera de pequeñas plataformas de abrasión activas. Sobre esta formación sedimentaria y a todo lo largo de la línea de costa en otra parte, existe un cordón de dunas parcialmente estabilizadas por vegetación que alcanzan hasta 13.7 m de altura, presentando al sur las planicies de marea. El quiebre en la configuración de la línea de costa, en Punta Arenas, es provocado por las mismas características tectónicas que afectan en general a la Península de Baja California a través de un fallamiento normal Norte-Sur (Pérez Briceño, 2009).

## 5.2. Geología regional

La Cuenca de San Juan de Los Planes corresponde a una depresión de forma alargada, con orientación Norte-Sur, la cual es una manifestación más de la tectónica de la provincia extensional del Golfo de California. Geológicamente, se encuentra ubicada en la parte central del bloque tectónico de Los Cabo, el cual se caracteriza por presentar una alta complejidad litológica y estructural. Las unidades litológicas que predominan en el área, incluyen rocas de origen metamórfico, ígneo y sedimentario, con edades del Mesozoico al Reciente, las cuales se encuentran afectadas directa o indirectamente por estructuras de carácter regional o local (Pérez Briceño, 2009).

El margen occidental de dicha cuenca es definido por las sierra Las Cruces y La Trinchera (Figura 2) formando un pilar tectónico donde predominan rocas intrusivas graníticas K(Gr) y granodioritas K(Gd). El margen oriental, por otra parte, es definido por la denominada sierra La Gata de orientación Norte-Sur, con bordes aproximadamente rectos, lo que sugiere la presencia de fallas normales limitando un pilar tectónico de varios kilómetros (Pérez Venzor, 1993) el cual se integra básicamente por rocas intrusivas Cretácicas como son granitos K(Gr), granodioritas K(Gd), dioritas K(Di) y tonalitas K(Tn), así como metasedimentos M(Ms) producto del metamorfismo de rocas sedimentarias tales como lutitas, areniscas y en menor grado margas y calizas impuras. Al sur de la Cuenca de San Juan de Los Planes se presenta la sierra San Antonio, en donde afloran granitos K(Gr) y granodioritas K(Gd), así como metasedimentos M(Ms) y diques de diferente composición con espesores irregulares integrados por tonalita, cuarzodiorita, cuarzomonzonita, gabro, aplita, andesita y riolitas (Romero Rojas, 1990). Finalmente, en la parte sureste de la cuenca se ubica la sierra La Salecita, la cual presenta una asociación de granodiorita-tonalita K(Gd-Tn) que constituye la mayor parte de la sierra La Laguna (Pérez Briceño, 2009; Ortega Gutiérrez, 1982).

En la porción centro-norte de la cuenca, al sur de Bahía La Ventana, afloran rocas sedimentarias de origen marino que corresponden a una arenisca calcárea con gran contenido fosilífero, principalmente conchas y corales (Nava Sánchez,

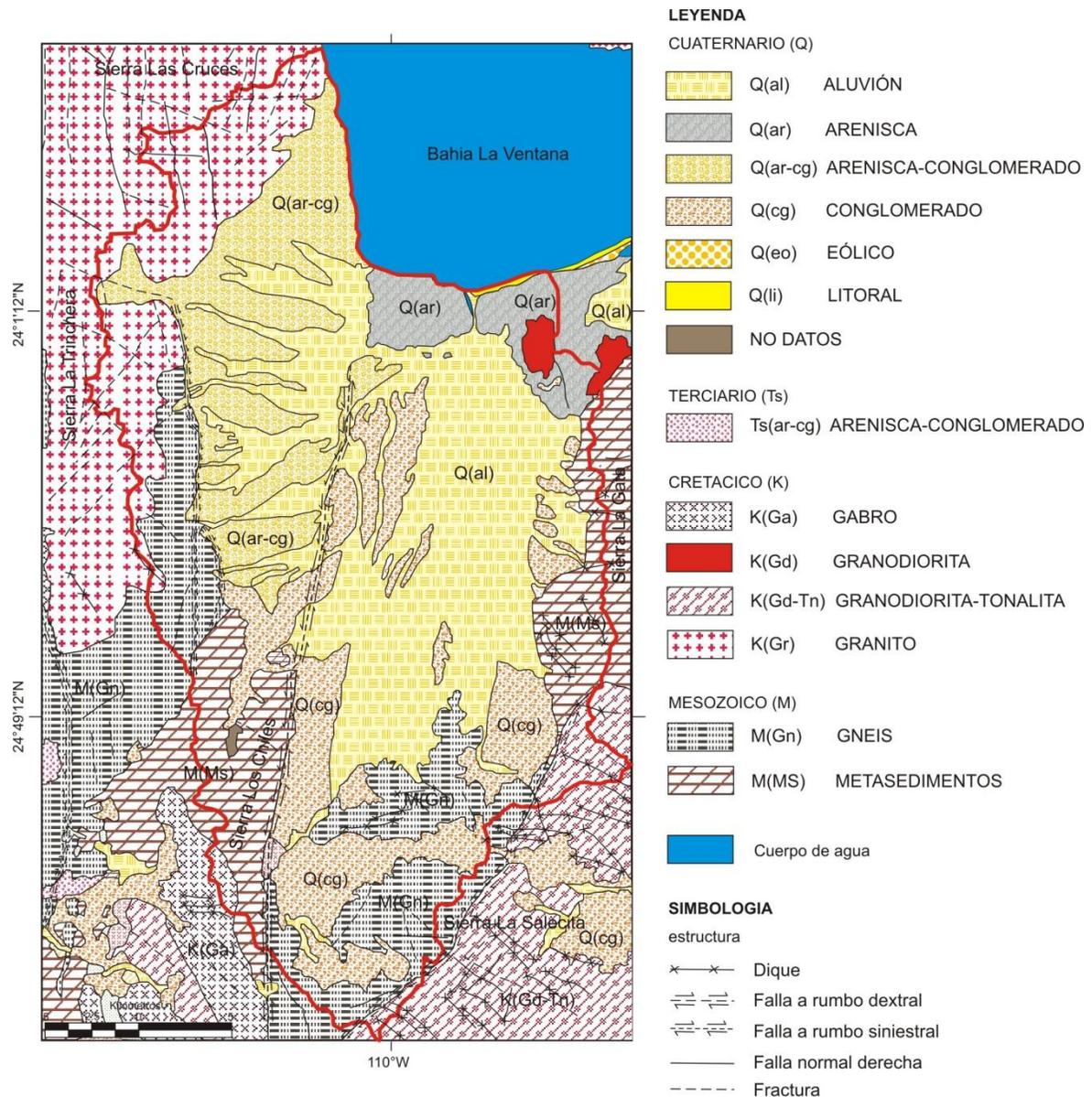
1992). Una secuencia de conglomerados Q(cg) y arenisca-conglomerados Q(ar-cg) dan origen principalmente a los abanicos aluviales distribuidos al pie de las sierras que circundan el área de estudio y son de gran importancia para la recarga natural del acuífero de la cuenca. Al igual que materiales no consolidados que cubre el valle cuyo espesor es de 200 m y se encuentran representados por depósitos cuaternarios de origen fluvial Q(al), eólico Q(eo), los cuales están integrados por gravas, arenas, arcillas y limos. El relleno de todos los arroyos en la zona de la sierra representa la fuente principal de sedimentos de la Cuenca de San Juan de Los Planes, la cual está constituida, principalmente por arenas medias a gruesas (Pérez Briceño, 2009).

### 5.3. Clima, vegetación y temperatura

El clima en la parte continental, de acuerdo a lo descrito por Robles (1985, en Nava Sánchez 1992), es seco desértico, cálido con una temperatura media anual mayor de 22°C, con un régimen de lluvias en verano y una oscilación anual extremosa de la temperatura que varía entre 7° y 14°C. Aquí la precipitación media anual es de 400 mm en las partes de mayor elevación y de 100 a 200 mm en las zonas por debajo de los 360 m.s.n.m. Las temperaturas registradas se encuentran entre los 0 y 45.4°C, la temperatura media anual oscila entre los 12 y 18°C (datos no publicados, CNA). La región litoral en el Golfo (Roden, 1964) es un desierto cálido con una temperatura media anual de 22°C (en verano alrededor de 41°C). La precipitación anual se encuentra entre 300 mm.

Los vientos presentan un patrón del norte que predomina en casi todo el año y siempre en temporadas de lluvias, con vientos débiles en verano y moderados en invierno. En la porción costera se presentan principalmente dos patrones de viento. Vientos del sur y sureste, que ocurren al final de primavera y persisten en verano hasta principio de otoño, generalmente ocurren combinados con calma frecuente. Los vientos del norte y noroeste, dominantes a finales de otoño-invierno y parte de primavera, son fuertes y persistentes (Del Rosal Pardo, 2003).

Las corrientes superficiales en el litoral del Golfo de California, determinadas por Roden (1964) en la parte costera de Sinaloa y Sonora tienen predominancia del sureste durante casi todo el año, mientras que en la costa de la península la predominancia es de norte a sur. En Bahía La Ventana predominan las corrientes de norte a sur (Nava *et al.*, 2001).



**Figura 2.** Litología y estructuras geológicas de la Cuenca de San Juan de Los Planes modificado de Pérez Briceño (2009).

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Recolección de muestras de sedimentos

Se realizaron cuatro campañas de muestreo dentro del área de estudio (Figura 1). Las coordenadas de las estaciones de muestreo se presentan en el Anexo 1.

Durante los meses de mayo y noviembre de 2009 se realizaron recorridos por las zonas serranas en la parte oeste y este de la cuenca, donde se colectaron muestras de sedimento fluvial. Para el análisis granulométrico, las muestras se obtuvieron trazando un cuadro aproximado de 10 x 10 cm removiendo el sedimento de dos lados del cuadro hasta una profundidad de 10 cm y de esta forma se obtuvo un cubo de sedimento, cuyo volumen (con peso aproximado a 500 g) se extrajo completamente y fue almacenado en bolsas Ziploc debidamente etiquetadas. En algunos arroyos las muestras se obtuvieron escavando una pequeña trinchera de aproximadamente 1 m de longitud, perpendicular al cauce del arroyo, y una profundidad aproximadamente de 1 cm. La muestra se tomó con ayuda de una pala metálica y vaciado en una bandeja de aluminio para ser descargado en el cuarteador, el cual consiste de una serie de láminas inclinadas alternadamente en direcciones opuestas para dividir las muestras en proporciones iguales y conseguir un peso aproximado a 500 g. Para la obtención de las muestras destinadas al análisis químico se trazó una pequeña trinchera de aproximadamente 1 m de longitud y 1 cm de profundidad, perpendicular a las marcas de los vestigios del flujo anterior. El sedimento en este caso se recolectó con una cuchara de plástico y se almacenó en viales de plástico. Los recipientes utilizados para la recolección de muestras destinadas al análisis químico fueron lavados previamente con una solución jabonosa (micro 90), después se enjuagaron con agua destilada, posteriormente fueron puestos en HCl al 10% durante tres días y HNO<sub>3</sub> al 10% durante otros tres días (Moody y Lindstrom, 1997). Para el análisis químico en la Cuenca de San Juan de Los Planes se obtuvieron muestras de sedimento superficial del lecho de algunos arroyos, y de los desechos de minería y fundición de la región de San Antonio como son: los

residuos de las paredes internas de cámaras de sublimación en donde quemaban el material para la extracción del oro, de depósitos de jales y de terreros con escorias del minado (noviembre del 2009). Particularmente se hizo un muestreo de los sedimentos a lo largo del lecho del arroyo San Antonio, cada kilómetro, a partir de su nacimiento en el parteaguas hasta su desembocadura en la zona costera (octubre del 2009).

El muestreo en la línea de costa de Bahía La Ventana se realizó en el mes de noviembre del 2008, tomando en cuenta las áreas de las desembocaduras de los arroyos, en donde se tomaron muestras de arroyo, playa y duna. Para el análisis granulométrico las muestras de playa y arroyo se obtuvieron mediante la técnica del cubo, y las muestras de duna se colectaron con ayuda de una cuchara de plástico, todas las muestras se almacenaron en bolsas Ziploc con su respectiva etiqueta. Para el análisis químico las muestras de playa y arroyo se obtuvieron siguiendo la técnica de la trinchera. En los arroyos la trinchera se hizo perpendicular al flujo del arroyo y en la playa se hizo paralela a la línea de costa. En todas las estaciones muestreadas se obtuvo una muestra para granulometría y una para el análisis químico, colectando un total de 63 muestras de arroyo, 12 de playa y 4 de duna frontal.

En la parte marina el muestreo se realizó en el mes de septiembre de 2008 a bordo de la embarcación CICIMAR-XV. Se colectaron 31 muestras de sedimento superficial de la plataforma con ayuda de una draga tipo Van Veen y un nucleador de gravedad tipo Fletcher. La draga Van Veen se utilizó en la colecta de muestras para el análisis granulométrico. Para la colecta de las muestras destinadas al análisis químico se empleó el nucleador de gravedad, con tubos de acrílico de 3.5 cm de diámetro y 30 cm de largo previamente lavados (Moody y Lindstrom, 1997), en donde se submuestreó la superficie del núcleo (capa 0 - 5 cm).

## 6.2. Determinación del tamaño de grano

El análisis de tamaño de grano se realizó en el Laboratorio de Geología Marina del CICIMAR-IPN. Para obtener las diferentes clases de tamaño de los

sedimentos gruesos se usó la técnica de Rotap (Steve Shaker, Modelo RX86, serie 19042) y para las partículas finas se utilizó el analizador por difracción láser Beckman Coulter LS13320. En la primera se utilizó una serie de tamices con las que se obtuvieron tamaños desde  $2\phi$  (0.25 mm) hasta  $-0.75\phi$  (1.68 mm) con intervalos de clase de  $0.5\phi$ . En la segunda, las muestras se procesaron a cada cuarto de phi ( $0.025\phi$ ), donde se obtuvieron tamaños entre 2 mm y  $0.04\mu\text{m}$ .

La técnica del Rotap se utilizó para las muestras que a simple vista se observarían la mayor cantidad de partículas mayores a  $1\phi$  (2 mm). Para las muestras en las que se observaron tamaños menores a 2 mm se utilizó la técnica del analizador láser. Sin embargo, se obtuvo en algunas muestras una mezcla de tamaños de partículas desde limos hasta arenas gruesas, y en este caso en particular se combinaron ambas técnicas: el tamizado, donde al final de la serie de tamices, en la una bandeja colectora se retuvo la fracción más fina con tamaños menores a 1.4 mm y fue analizada por el analizador láser.

### 6.3 Análisis químicos

Previamente las muestras húmedas de sedimento provenientes de los diferentes ambientes sedimentarios fueron secadas en un horno de madera a  $\sim 40^\circ\text{C}$ . Posteriormente las muestras se homogenizaron en un mortero para trabajar con un tamaño de grano menor a  $200\mu\text{m}$  de diámetro y después se dividió la muestra en varias submuestras con el fin de realizar diversos análisis químicos.

#### 6.3.1. Determinación del carbono orgánico y carbonatos de calcio

La determinación de  $\text{C}_{\text{org}}$  y  $\text{CO}_2$  se llevaron a cabo en el laboratorio ACTLABS (Ontario, Canadá).

##### Carbono inorgánico

La determinación de  $\text{CaCO}_3$  en sedimentos de la plataforma se realizó mediante una relación estequiométrica. Para realizar tal relación se midió el  $\text{CO}_2$  por medio de coulometría, de cada una de las muestras de la siguiente manera: se

liberó el CO<sub>2</sub> desde los sedimentos, este se absorbió en una solución alcalina, la cual después se tituló coulométricamente.

### Carbono orgánico

El C<sub>org</sub> fue determinado mediante espectrofotometría de luz infrarroja (IR), utilizando el método convencional descrito por Jackson *et al.* (1987). Se tomó una alícuota de 0.2 g la cual se descompone térmicamente en un horno en un ambiente de nitrógeno puro a 1000°C, utilizando un sistema ELECTRA CW-800 para transformar cuantitativamente el carbono orgánico a dióxido de carbono. El vapor del agua producido junto con CO<sub>2</sub> se captura en la trampa de humedad antes de la detección del dióxido de carbono en las celdas IR. El CO<sub>2</sub> absorbe la energía infrarroja en una longitud de onda y así se cuantifica. La exactitud del método es <10%, comprobada con los estándares internacionales CaCO<sub>3</sub> y SY4.

### 6.3.2. Determinación de elementos mayoritarios y traza

#### 6.3.2.1. Análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica

Algunos elementos importantes en geoquímica ambiental son Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, así como el Al y Li que son indicadores de la procedencia natural continental de los materiales sedimentarios. En la primera etapa del estudio geoquímico en base a las evidencias de que en la zona de estudio existen indicios de contaminación en los desechos de minería y fundición por As, Cd, Pb y Zn, se analizaron estos elementos en materiales sedimentarios y se incluyeron los elementos Cu y Hg, el análisis se realizó mediante el método de espectrofotometría de absorción atómica (EAA) en el Laboratorio de Oceanografía Geológica del Instituto de Oceanografía de Fundação Universidad de Federal do Rio Grande en Brasil. Para el tratamiento de las muestras se tomó una alícuota de 0.2 g de muestra de sedimento. Para determinar los contenidos de Cd, Cu, Pb y Zn los sedimentos fueron digeridos a una temperatura de 130°C con ácidos fuertes (HCl+HNO<sub>3</sub>+HF) y medidos con EAA con flama aire-acetileno. Para la medición de As y Hg se utilizó EAA después de una digestión suave (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+HNO<sub>3</sub>+HCl). Una alícuota para arsénico fue pre-reducida con KI después

As fue medido utilizando EAA con flama aire-acetileno acoplado el generador de hidruros usando  $\text{NaBH}_4$ ,  $\text{NaOH}$  y  $\text{HCl}$ . Todas las muestras se analizaron por triplicado, el coeficiente de variación de cada una fue de 6%, el límite de detección fue de  $25 \mu\text{g kg}^{-1}$ . Para la determinación de mercurio se tomó aproximadamente 0.5 g de submuestra, la digestión de los sedimentos se hizo con una mezcla (1:3) de  $\text{HNO}_3$  concentrado y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  junto con 2 ml de  $\text{HClO}_4$  a una temperatura de  $120^\circ\text{C}$ . Las mediciones fueron mediante un sistema de vapor frio acoplado a EAA (GBC 932AA). Cada muestra se midió por triplicado, la desviación estándar relativa (RDS) fue menos que 4% y el límite de detección para cada una de las muestras fue de  $5 \mu\text{g kg}^{-1}$ .

La exactitud del método se evaluó aplicando los estándares de referencia MESS-3 y PACS-2 de sedimentos marinos (NRCC). La exactitud del análisis para As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn fue menor al 10%, se calculó en base a la siguiente ecuación:

$$\text{Exactitud} = \left| \frac{\text{concentración promedio del material de referencia estándar} - \text{concentración certificada del material de referencia estándar}}{\text{concentración promedio certificada del material de referencia estándar}} \right| \times 100\%$$

#### 6.3.2.2. Análisis por Espectrometría de masas

En la segunda etapa del estudio geoquímico la determinación de elementos mayores, elementos traza y elementos del grupo de tierras raras (ETR) se realizó aplicando las técnicas de espectrometría de plasma inductivo (ICP) y de espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS) en el Laboratorio ACTLABS en Ontario, Canadá.

Para ambas técnicas se tomó una alícuota de 0.25 g de muestra. Todas estas submuestras fueron digeridas en una solución multiácida ( $\text{HF}$ ,  $\text{HClO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  concentrados) a una temperatura de  $260^\circ\text{C}$  y se diluyeron con agua regia. Para los análisis por ICP las soluciones fueron analizadas en un ICP Varian 735ES y para los análisis por ICP-MS se usó el equipo ICP/MS Perkin Elmer Sciex ELAN 6000. Se corrió un blanco cada 40 muestras

La precisión y exactitud de estos análisis se presentan en el Apéndice 1 Tabla 23. La exactitud del método se evaluó aplicando los estándares de referencia MESS-3 y PACS-2 de sedimentos marinos (NRCC).

#### 6.4. Procesamiento estadístico de los datos granulométricos

A los datos granulométricos obtenidos, mediante la combinación de las técnicas de tamizado y de análisis láser, se les aplicó una corrección, ya que teóricamente el analizador láser no debería detectar partículas mayores a 1.4 mm ya que estas fueron retenidas en el último tamiz (1.4 mm,  $-0.5\phi$ ). Sin embargo, existe un margen de error en cada tamiz además de que se pueden presentar partículas con forma alargada, propiciando que algunas partículas de tamaños mayores logren pasar y sean registradas por el analizador láser, por lo que es necesario hacer una corrección de porcentaje de los pesos. Para el procesamiento de datos y para hacer esta corrección es necesario registrar el peso de la muestra que queda en la charola colectora. Cabe mencionar, que todo el material que entra en el analizador láser es considerado el 100% de la muestra, por lo que es necesario transformar el porcentaje de cada intervalo, obtenido del analizador al porcentaje real, para el material que fue retenido en la charola (tamaños menores a 1.4 mm). Una vez obtenido el porcentaje real para cada intervalo en ambas técnicas es necesario hacer la corrección de los intervalos que se traslapan (1.4, 1.68 y 2 mm) y esto se hace sumando para cada intervalo que se repite, de manera que el porcentaje original de los tamaños mayores a 1.4 mm se incrementa y el valor de los tamaños menores a 1.4 mm disminuye.

Una vez obtenidos los pesos en porcentaje de cada una de los tamaños de cada muestra, independientemente de las técnica(s) utilizada(s), se calcularon los parámetros estadísticos que nos brindan las características texturales de las muestras colectadas como son el tamaño medio, grado de selección y tendencia, por lo que se utilizó el Método de los Momentos (Krumbein y Pettijhon, 1938). Este método es computacional (no gráfico) y está basado en el análisis estadístico simple. Consiste en una serie de parámetros que permiten comparar diversos estadísticos entre sí. Las medidas estadísticas son la media, desviación estándar

y sesgo, y se utilizan como complemento de las representaciones gráficas, ya que al no dibujarse la curva no se consigue la sensibilidad suficiente y no se detectan bimodalidades, errores experimentales o mezcla de poblaciones. La ventaja del método de los momentos es que utiliza toda la distribución de frecuencia y no unos pocos valores (González-Yajimovich y Ledesma-Vázquez, 2001).

La media del sedimento nos indica el tamaño de partículas que predomina en la muestra. La desviación estándar es la expresión matemática del grado de selección del sedimento. El sesgo nos indica el grado de asimetría de la curva, si la muestra tiende a tener un sesgo positivo, nos dice que la curva tiende a los tamaños finos con respecto al valor medio y si la curva tiende hacia una distribución negativa nos indica una tendencia a los gruesos (Camacho, 2003; Boggs, 1995), cabe mencionar que este método utiliza la escala phi ( $\phi$ ) la cual es el logaritmo negativo base 2 del diámetro de la partícula.

#### 6.5. Procesamiento estadístico de la composición química de los sedimentos

Los parámetros estadísticos (mínimo, máximo, promedio y desviación estándar) se obtuvieron empleando el programa computacional STATISTICA 7 de StatSoft, generando las bases de datos para obtener los mapas de distribución espacial de las concentraciones de los componentes y elementos traza y ETR en los sedimentos de los diferentes ambientes sedimentarios.

Las distribuciones espaciales de las concentraciones de los elementos estudiados en los sedimentos superficiales de los diferentes ambientes de depósito se construyeron con el programa computacional SURFER 8.0 y COREL DRAW X4.

##### a) Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (PCA) es una herramienta estadística útil que permite explicar en pocos componentes la varianza de los datos. Además provee un análisis más profundo de la estructura de los datos y ayuda a alcanzar conclusiones que no son inmediatamente obvias (Basilevsky, 1994; Zitko, 1994).

Esta técnica ha sido utilizada por diversos autores para el estudio de la geoquímica en los sedimentos, como metales pesados en sedimentos (Berrow, 1991) o de metales en sedimentos y corales (Guzmán y Jiménez, 1992).

b) Cálculo del Índice de Geoacumulación

Se calculó el Índice de geoacumulación ( $I_{geo}$ ) de Müller (1979) con la siguiente fórmula:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_n}{1.5 * B_n}\right)$$

Donde  $C_n$  es la concentración del elemento “n”,  $B_n$  es el promedio de las concentraciones menores del valor promedio propuesto por Wedephol (1995), este promedio se multiplica por 1.5 para eliminar las variaciones con la granulometría. Con la siguiente escala de valor:

	$I_{geo} < 0$	No contaminado
	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado o moderadamente contaminado
	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
	$2 < I_{geo} < 3$	Moderadamente a fuertemente contaminado
	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
	$4 < I_{geo} < 5$	Fuertemente a muy fuertemente contaminado
	$5 < I_{geo} < 6$	Muy fuertemente contaminado
	$I_{geo} > 6$	Extremadamente contaminado

### c) Estimación del Factor de Enriquecimiento de los elementos

El factor de enriquecimiento (FE) es una técnica mediante una doble normalización que permite valorar la calidad de los sedimentos para identificar enriquecimientos en los elementos analizados (Shumilin *et al.*, 2002; Förstner y Wittman, 1979). Existen varios elementos que son usados como normalizadores (Al, Fe, Li, Mn, Ni, Sc, Ti y Zn, entre otros), con el objeto de encontrar el mejor normalizador para este trabajo se calcularon las ecuaciones de regresión lineal de la concentración de los elementos en las muestras contra las concentraciones de los normalizadores (Al, Co, Fe, Li, Mn, Sc, Th y Ti).

Este análisis nos puede indicar posibles contribuciones antropogénicas o la presencia de depósitos minerales. Para determinar este FE fue necesario emplear las concentraciones promedio para la corteza continental superior reportadas Wedpohl (1995). La fórmula para obtener el FE de cada elemento de las muestras de sedimento es la siguiente:

$$FE = \frac{\left(\frac{[El_{sedimento}]}{[Co_{sedimento}]}\right)}{\left(\frac{[El_{corteza}]}{[Co_{corteza}]}\right)}$$

Donde:

FE = factor de enriquecimiento

$El_{sedimento}$  = concentración del elemento en los sedimentos

$Co_{sedimento}$  = concentración del cobalto en los sedimentos

$El_{corteza}$  = concentración del elemento en la corteza continental superior

$Co_{corteza}$  = concentración del cobalto en la corteza continental superior

De acuerdo a los intervalos de los valores del FE que se muestran a continuación se puede conocer si las concentraciones de los elementos analizados se encuentran enriquecidos en el área de estudio respecto a las concentraciones promedio de la corteza continental superior:

1 < FE	No enriquecido
1 < FE < 2	Enriquecimiento mínimo
2 < FE < 5	Enriquecimiento moderado
5 < FE < 20	Enriquecimiento significativo
20 < FE < 100	Enriquecimiento muy alto
FE > 100	Enriquecimiento extremadamente alto

#### d) Normalización de los elementos de tierras raras

Con la finalidad de establecer la variabilidad natural del elemento, en el caso del grupo de las tierras raras (ETR) se efectuó una normalización con las concentraciones promedio determinadas para la lutita norteamericana (North American Shale Composite, NASC) por Ross y McLennan (1985) en base a la siguiente ecuación:

$$N = \frac{El_{sedimentos}}{El_{lutita}}$$

Donde:

N = valor normalizado del elemento

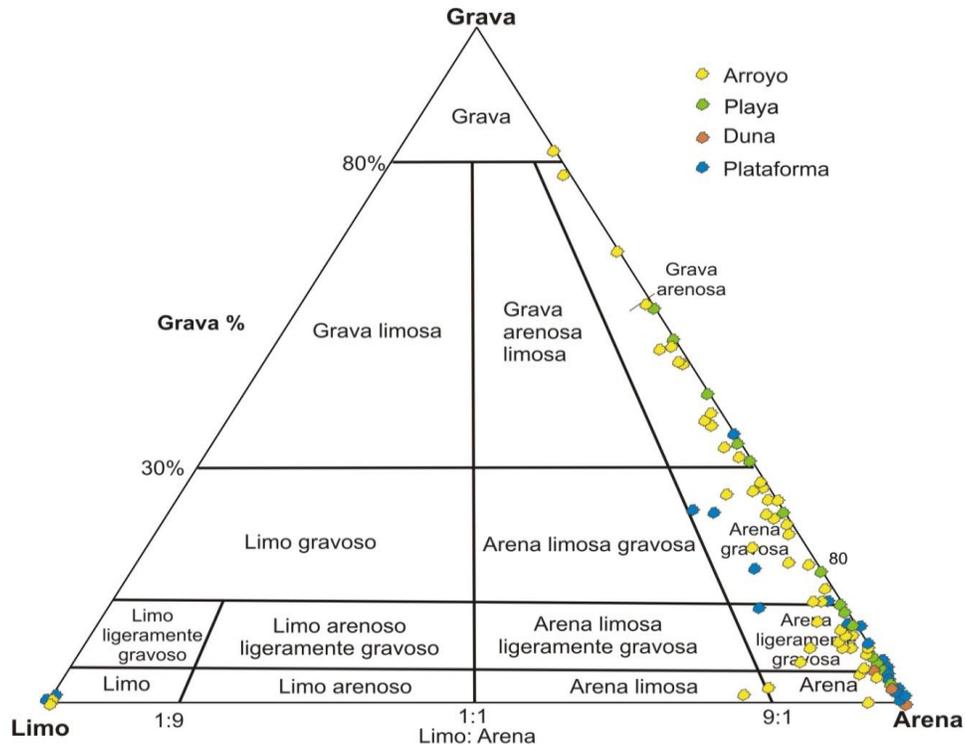
$El_{sedimento}$  = concentración del elemento en los sedimentos

$El_{lutita}$  = concentración del elementos en la lutita norteamericana

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Características granulométricas de los sedimentos

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico, mediante la aplicación del diagrama ternario de Folk (1974) muestran que el tamaño medio de los sedimentos de los grupos texturales encontrados son principalmente arenas ligeramente gravosas, arenas gravosas y gravas arenosas. Solamente una muestra está compuesta principalmente por gravas y otra más es de arena limosa. Los tipos de sedimentos presente en los diferentes ambientes de depositación son los siguientes; (1) en los arroyos dominan las arenas gravosas, las arenas ligeramente gravosas y las gravas arenosas; (2) en las playas encontramos grava, grava arenosa, arena gravosa, en la mayoría arena y arena ligeramente gravosa, y (3) en la plataforma dominan la grava arenosa, arena gravosa, arena ligeramente gravosa y arena (Figura 3). Los datos completos se muestran en el Apéndice 1 Tablas 12, 13, 14 y 15.

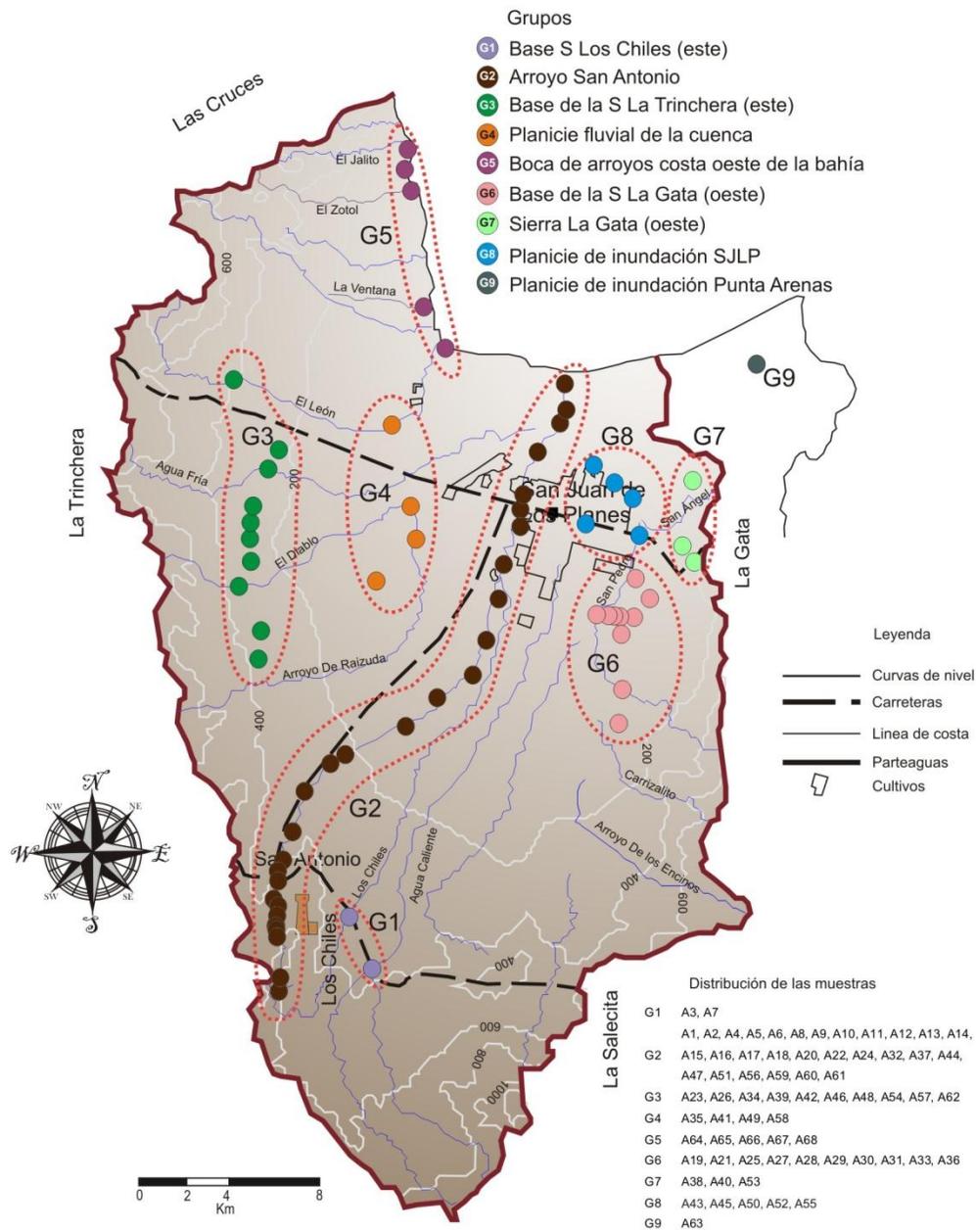


**Figura 3.** Diagrama ternario de clasificación de los grupos texturales del material sedimentario de los diferentes ambientes de depósito (Folk, 1974).

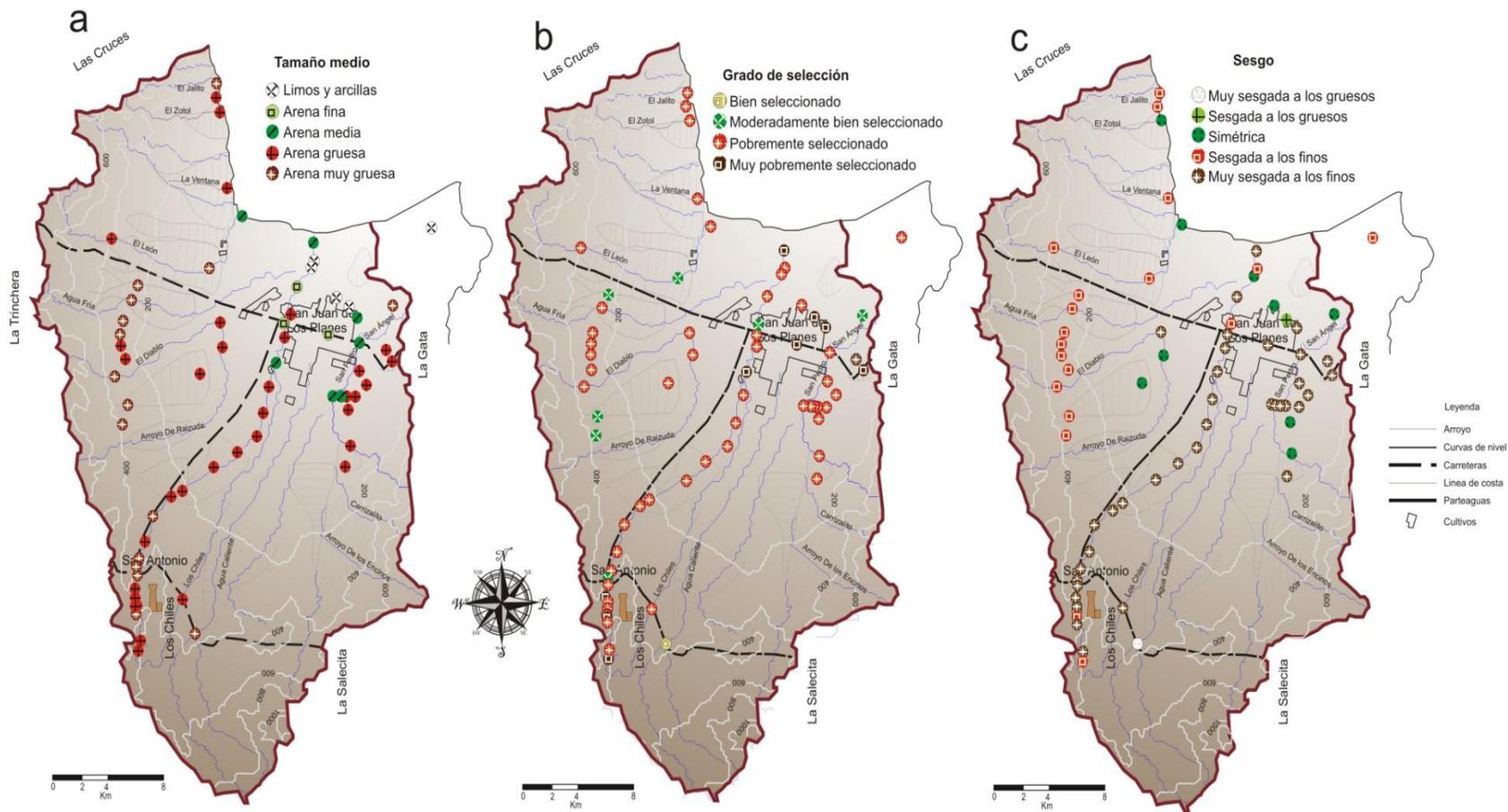
### 7.1.1. Sedimentos de arroyos

Las características texturales de los sedimentos de arroyos, colectados en la cuenca de San Juan de Los Planes, se presentan por grupos de muestras (Figura 4). Estos grupos fueron integrados de acuerdo a su región geográfica, asociada a su vez al ambiente de depositación dentro de la cuenca. Es por esto que se realizó un agrupamiento de las muestras analizadas, en tal clasificación se consideró la geomorfología y red de drenaje en el área de estudio, se consideró una muestra (G9) está fuera de los límites de la cuenca de San Juan de Los Planes pero se encuentra dentro del área de influencia de la Bahía La Ventana.

A continuación se describen las características granulométricas de los sedimentos superficiales de los arroyos para cada uno de estos grupos (Figura 4).



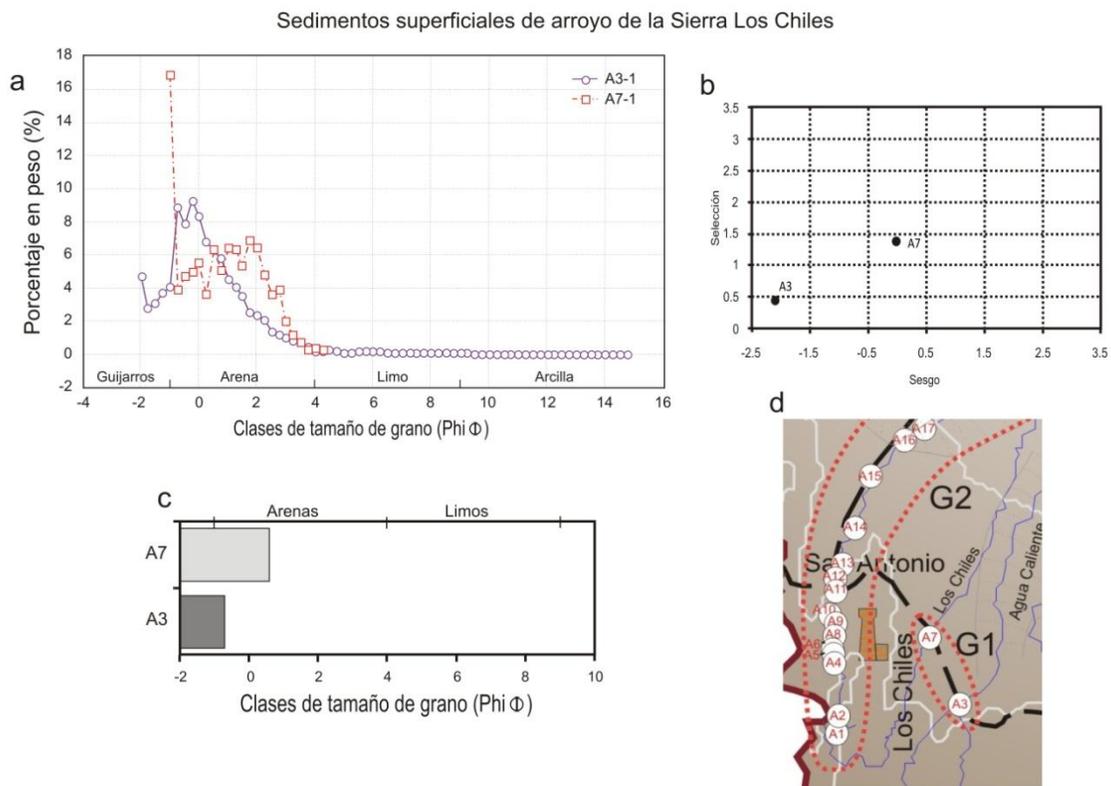
**Figura 4.** Grupos de muestras de sedimentos superficiales de los arroyos y planicies de inundación.



**Figura 5.** Distribución de (a) tamaño medio, (b) grado de selección y (c) sesgo de los sedimentos fluviales y planicies de inundación muestreados en la Cuenca de San Juan de Los Planes

a) Base de la Sierra Los Chiles (G1)

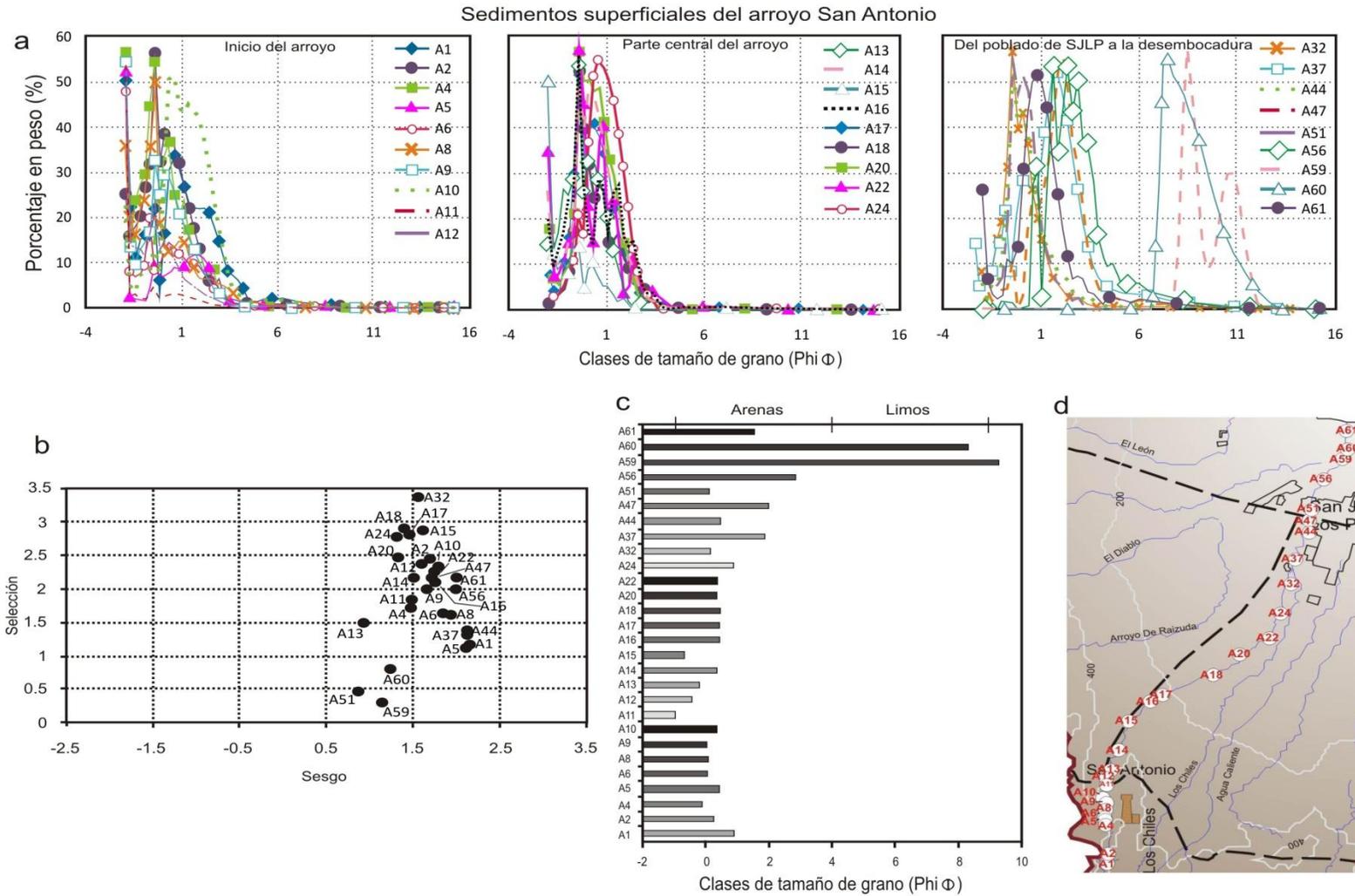
El grupo G1, ubicado al suroeste de la Cuenca de San Juan de Los Planes (Figura 4 y 6d), está compuesto por las muestras A3 y A7. La primera de estas se encuentra sobre el lecho del Arroyo Agua Caliente tiene un tamaño medio de grano de arena muy gruesa bien seleccionada y muy sesgada a los gruesos (Figuras 6b y 6c), en tanto A7 está ubicada dentro del Arroyo Grande, con un tamaño medio de arena gruesa, presenta una pobre selección y distribución simétrica (Figuras 5a, 6b y 6c). Ambas muestras son bimodales y presentan aproximadamente el 2% de arenas y guijarros en su mayoría como se observa en la Figura 6a.



**Figura 6.** Granulometría de sedimentos del grupo G1: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano (phi Φ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

## b) Arroyo San Antonio (G2)

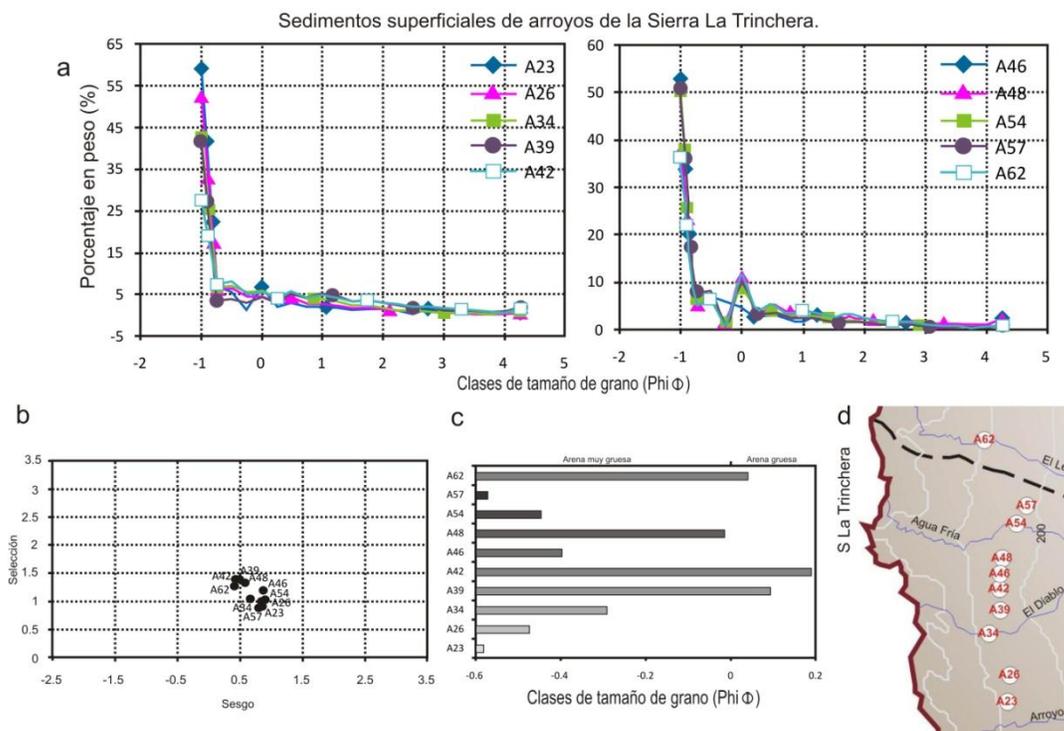
De acuerdo a la distribución textural de las muestras a lo largo del arroyo (grupo G1), el rango de tamaños varía desde arena muy gruesa hasta arcillas (Figuras 5, 7a y 7c), hay muestras unimodales y bimodales, solo las estaciones A59 y A60 (en La Bocana) contienen el 100% de limos (Figura 7c). El diagrama de dispersión muestra que en algunas estaciones la selección varía, en la Figura 7b se puede observar que la mayor parte de las muestras se encuentran muy sesgadas a los finos con una selección muy pobre. A diferencia de las muestras A13, A51 (con selección moderada), A59 y A60 (pobrementemente seleccionada) que se encuentran sesgadas a los finos (Figura 7b).



**Figura 7.** Granulometría de los sedimentos del grupo G2: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano (phi  $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

c) Base de La Sierra la Trinchera (G3)

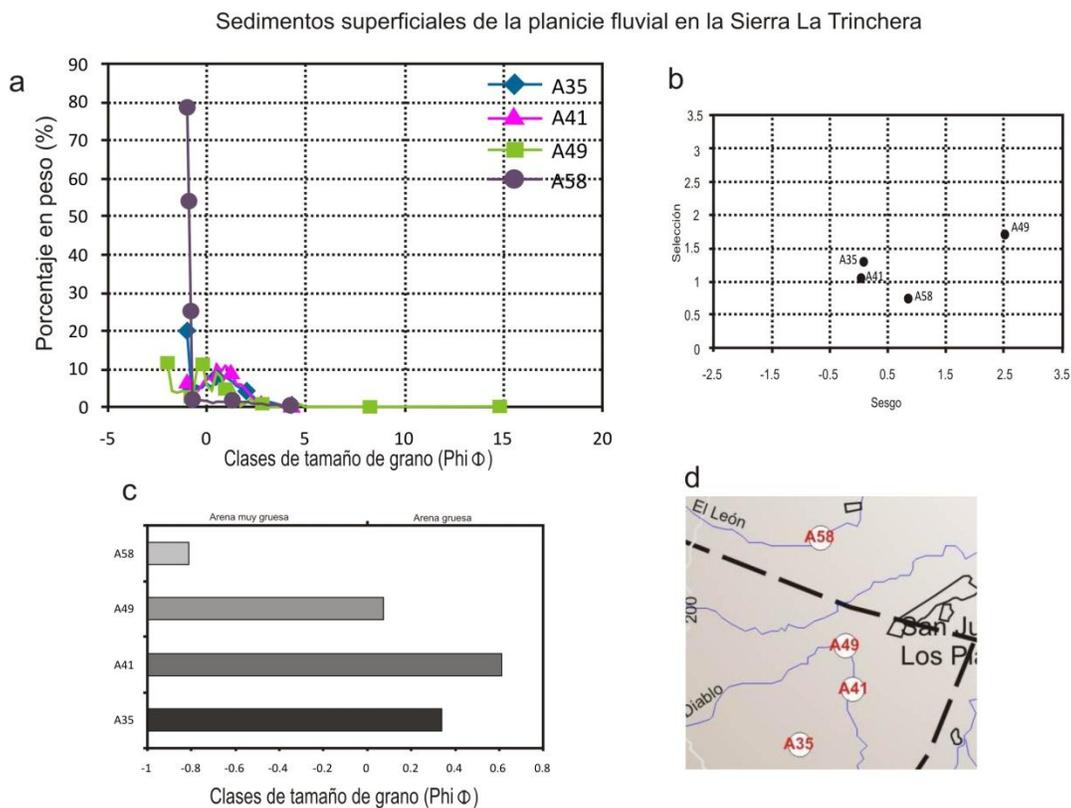
Este grupo (G3) está conformado por diez muestras ubicadas en la porción este de la base de la sierra de la Trinchera (Figura 8d). Sus sedimentos tienen una distribución bimodal, con una pequeña variación en el tamaño medio que varía entre arena gruesa y muy gruesa, en donde el 95% de peso de las muestras son arenas gruesas (Figura 8c). La mayoría de las muestras presenta un sesgo hacia los finos y una selección de entre pobremente seleccionada y moderadamente seleccionada (Figura 8b).



**Figura 8.** Granulometría de los sedimentos del grupo G3: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

d) Planicie fluvial occidental de la cuenca (G4)

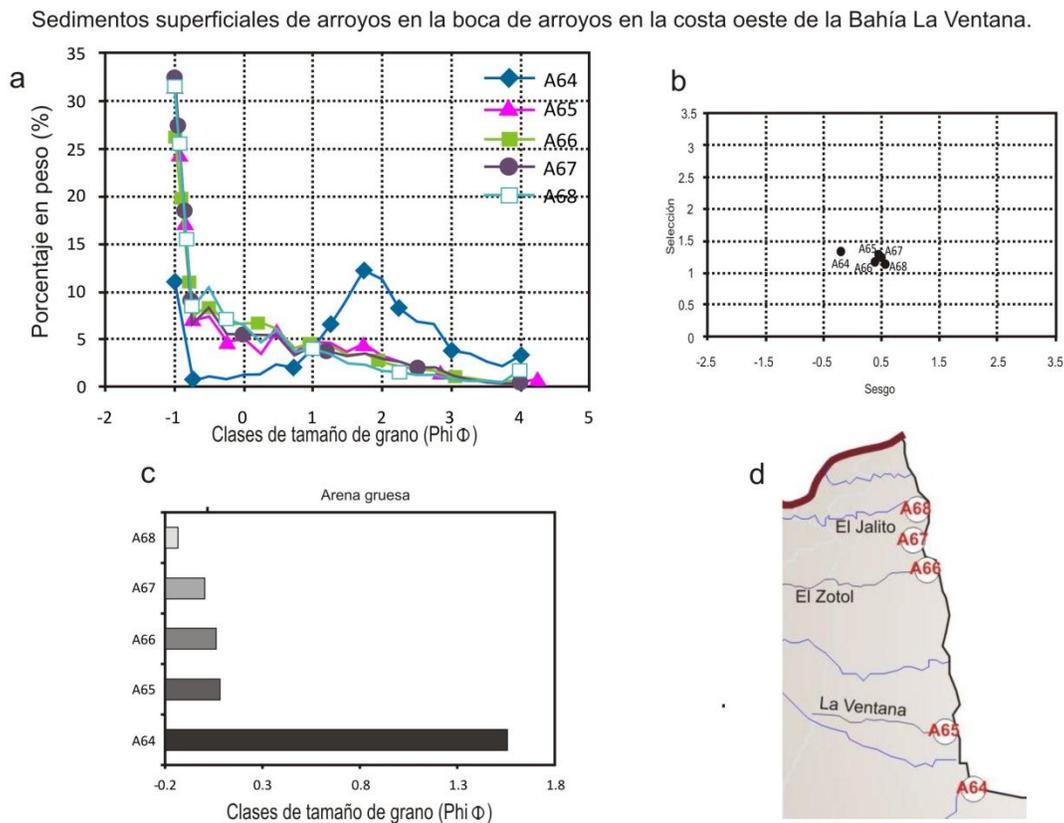
Los sedimentos fluviales provenientes de la sierra la Trinchera son depositados en la planicie fluvial ubicada en la parte occidental del centro de la Cuenca de San Juan de Los Planes y corresponden al grupo G4, con cuatro muestras (Figura 9d). El Tamaño medio de dichos sedimentos se encuentran en el rango de las arenas gruesas, aunque en el caso de la muestra A58, localizada en el arroyo El León cae en las arenas muy gruesas (Figura 9a y 9c). La muestra A49, localizada en el cruce de los arroyos El Diablo y La Cañada, se encuentra muy sesgada a los finos con una selección muy pobre. Las muestras A41 y A35 (al sur del grupo) son simétricas con una pobre selección, y A58 está sesgada hacia los finos con una selección moderada (Figura 9b).



**Figura 9.** Granulometría de los sedimentos del grupo G4: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

e) Boca de los Arroyos Costa Oeste de Bahía La Ventana (G5)

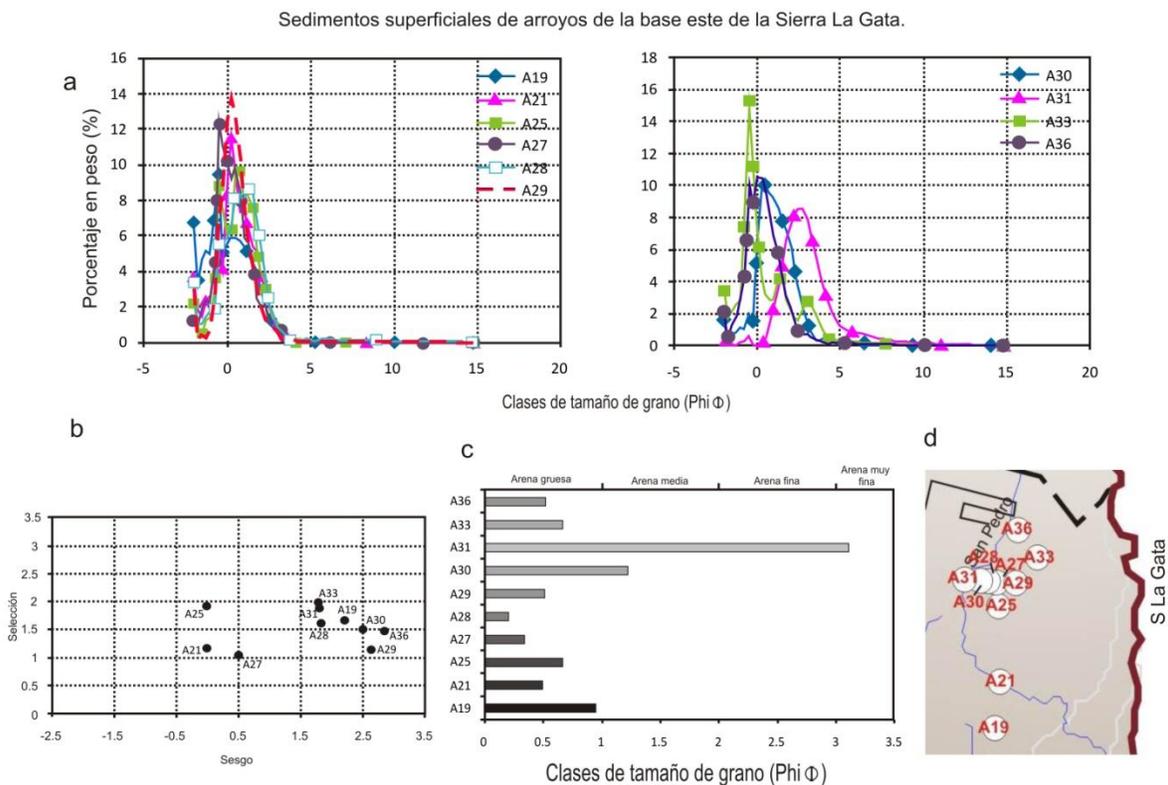
La Sierra de Las Cruces nutre de material sedimentario a los arroyos que desembocan en la costa oeste de Bahía La Ventana, clasificados como grupo G5, el cual incluye cinco muestras tomadas en las desembocaduras de los arroyos. Los sedimentos tienen una distribución polimodal y dominan los tamaños en el rango de las arenas (Figuras 10a, 10c y 10d). Están sesgados a los finos, excepto A64 la cual esta sesgada a los gruesos, todas tienen una selección pobre (Figura 10b).



**Figura 10.** Granulometría de los sedimentos del grupo G5: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano (phi  $\Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

f) Base de La Sierra La Gata (G6)

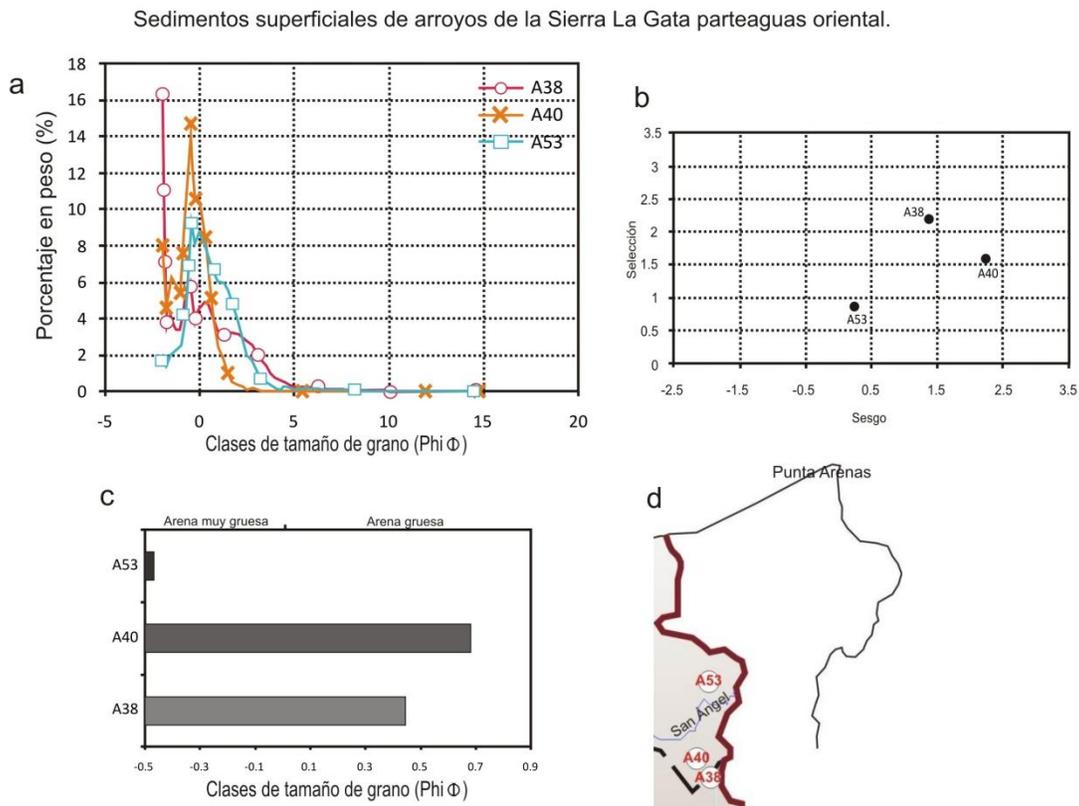
El material sedimentario en las muestras pertenecientes al grupo G6, ubicado en tierras bajas del margen oriental de la Cuenca de San Juan de Los Planes (Figura 11d). Los sedimentos de este grupo tienen una distribución polimodal y el tamaño medio que predomina es arena gruesa (Figuras 11a y 11c) con un sesgo hacia los finos. La mayoría de las muestras tienen una muy pobre selección, únicamente la muestras A27, presenta selección moderada, A21 y A25, se encuentran muy bien seleccionadas (Figura 11b).



**Figura 11.** Granulometría de los sedimentos del grupo G6: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi \Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

g) Sierra La Gata (G7)

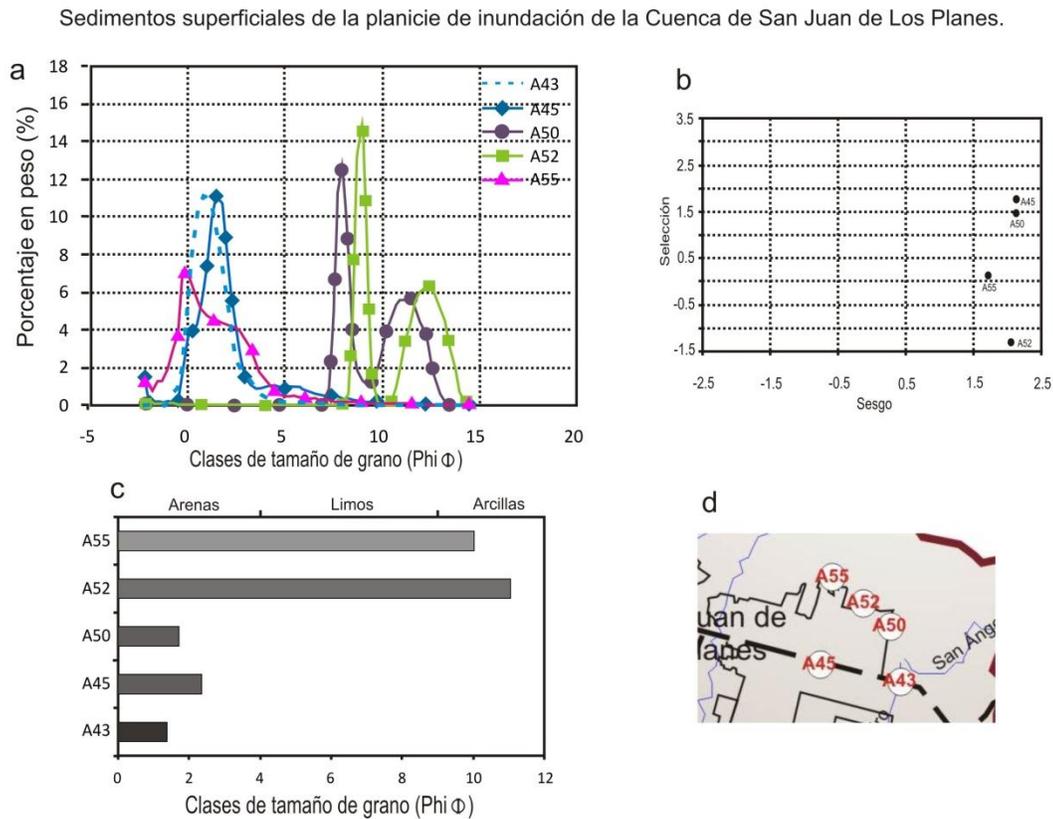
Las tres muestras de sedimentos fluviales que componen el grupo G7, están ubicados en el parteaguas oriental de la Cuenca de San Juan de Los Planes (Figura 12d), tienen distribución polimodal, con un tamaño medio del sedimento en el rango de las arenas gruesas para A38 y A40 y arena muy gruesa para A53 (Figuras 12a y 12c). Se encuentran muy sesgados hacia los finos A40 con pobre selección y A38 con una muy pobre selección, y la muestra A53 es simétrica con una selección moderada (Figura 12b).



**Figura 12.** Granulometría de los sedimentos del grupo G7: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano (phi Φ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

## h) Planicie de inundación SJLP (G8)

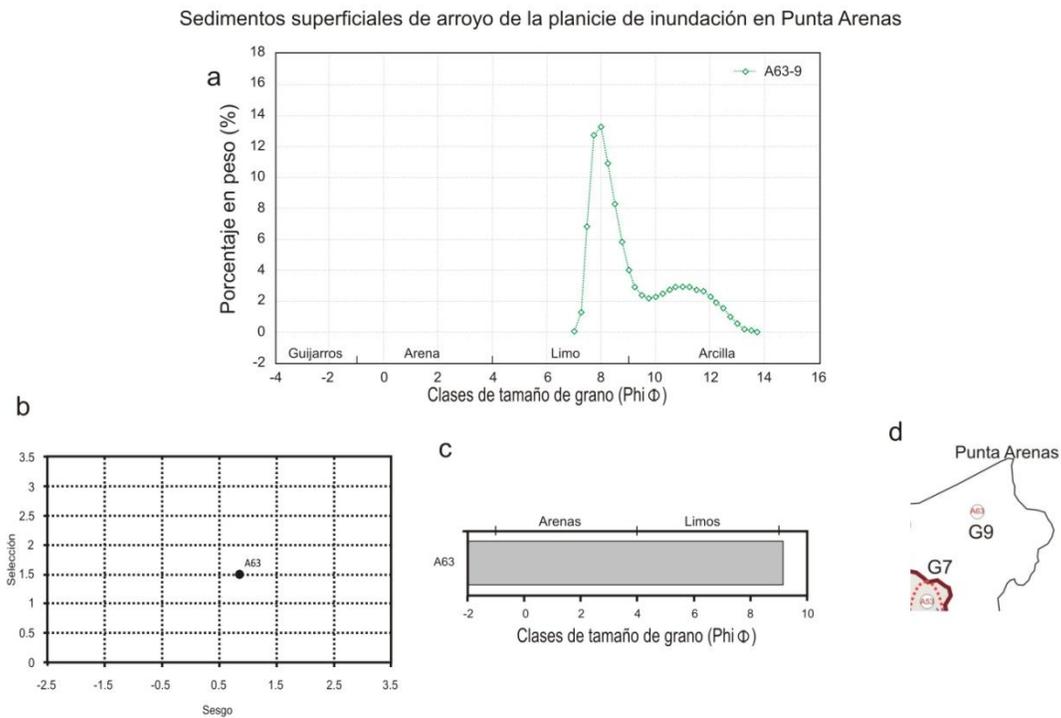
Las cinco muestras de sedimentos del grupo G8, se localizan en la planicie de inundación ubicada en la porción centro-norte de la Cuenca de San Juan de Los Planes (Figura 13d). Los sedimentos de las muestras A43, A50 y A52 tienen distribución unimodal y bimodal, un tamaño medio compuesto por arenas, con sesgo hacia los finos y pobre selección. Las muestras A55 y A52 tienen tamaños medios con rango en limo-arcillas, compuestas por limos con un porcentaje menor de arcillas, están sesgadas hacia los finos con una pobre selección (Figuras 13a y 13c).



**Figura 13.** Granulometría de los sedimentos del grupo G8: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

a) Granulometría de los sedimentos superficiales de la planicie de inundación en Punta Arenas (G9).

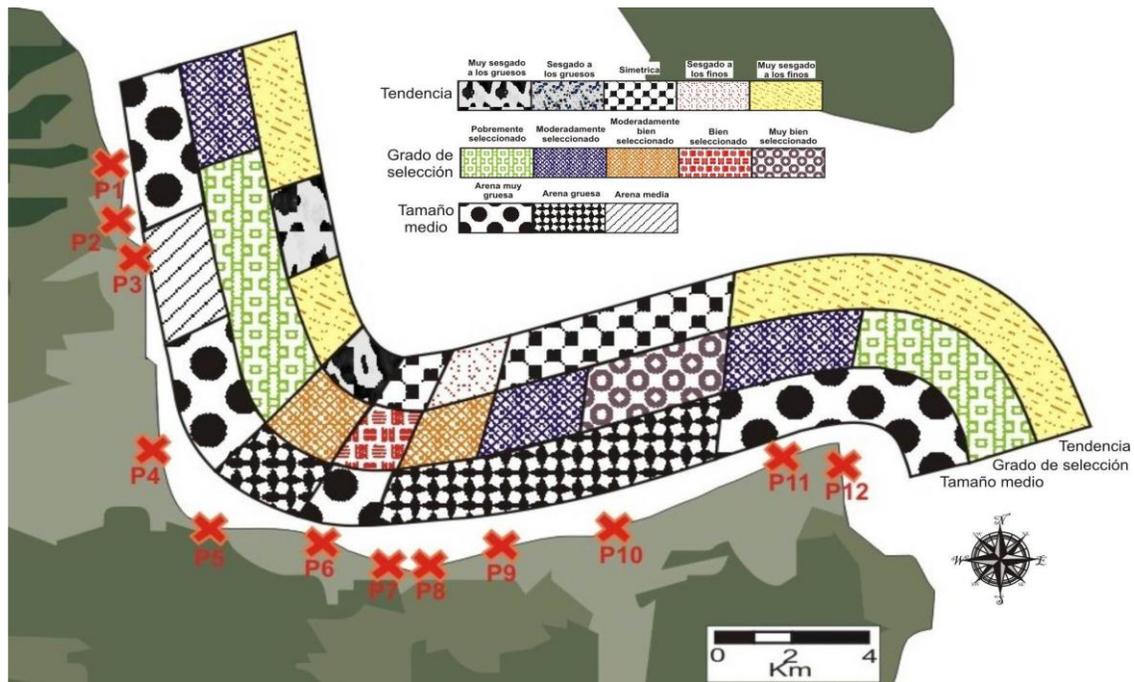
El grupo G9 incluye la muestra A63 ubicada al noroeste de la Cuenca de San Juan de Los Planes sobre una planicie de inundación. Esta muestra es polimodal (Figuras 14d), tiene un tamaño medio de limo-arcilla (Figura 14c), se encuentra sesgada a los finos y esta pobremente seleccionada (Figuras 14b).



**Figura 14.** Granulometría de los sedimentos del grupo G9: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano (phi Φ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

### 7.1.2. Sedimentos de playa

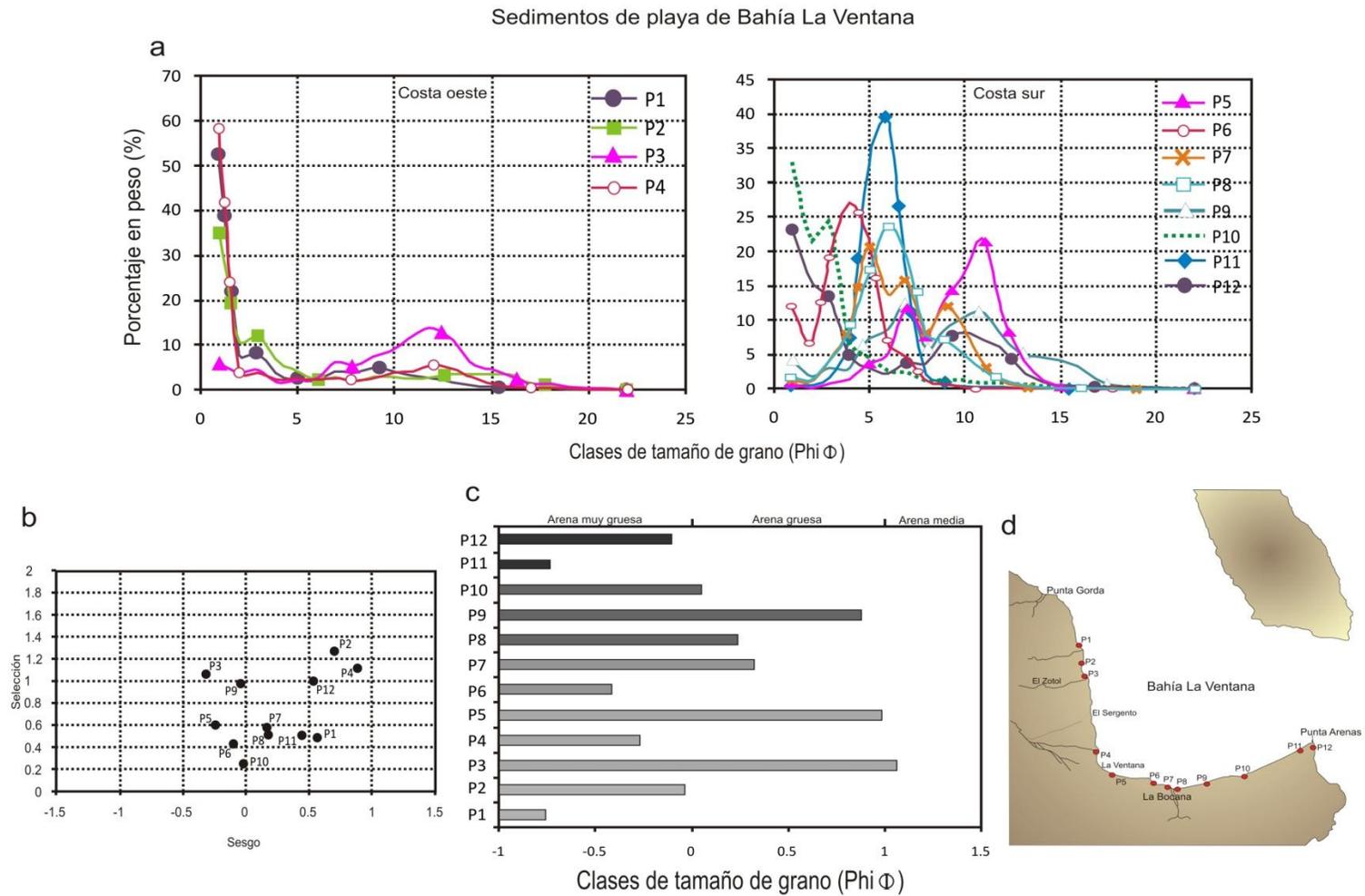
La línea de costa tiene dos orientaciones principales (a) costa oeste, orientada norte-sur (de P1 a P4) con playas angostas en la base de escarpes en depósitos de abanicos aluviales antiguos y con desarrollo de abanico-delta modernos; y (b) costa sur, orientada oeste-este (de P5 a P12) las playas son angostas en la porción amplia hasta Punta Arenas, en la trasplaya de esta porción se presenta un cordón de duna frontal (Figura 15).



En las playas de la costa oeste la distribución del tamaño de grano es unimodal y bimodal. El tamaño de grano que domina es de arenas gruesas (Figuras 16a y 16b), las muestras P1, P2 y P4 se encuentran muy sesgadas hacia los finos, mientras que P3 (ubicada en la porción del arroyo El Zotol) tiene un sesgo hacia los gruesos, P1 presenta una buena selección a diferencia de P2, P3 y P4, las cuales están pobremente seleccionadas.

Para las playas de la costa sur, los sedimentos tienen un tamaño medio de arena (Figuras 16a y 16c), el sesgo para P5 es hacia los gruesos, para P6, P9 y

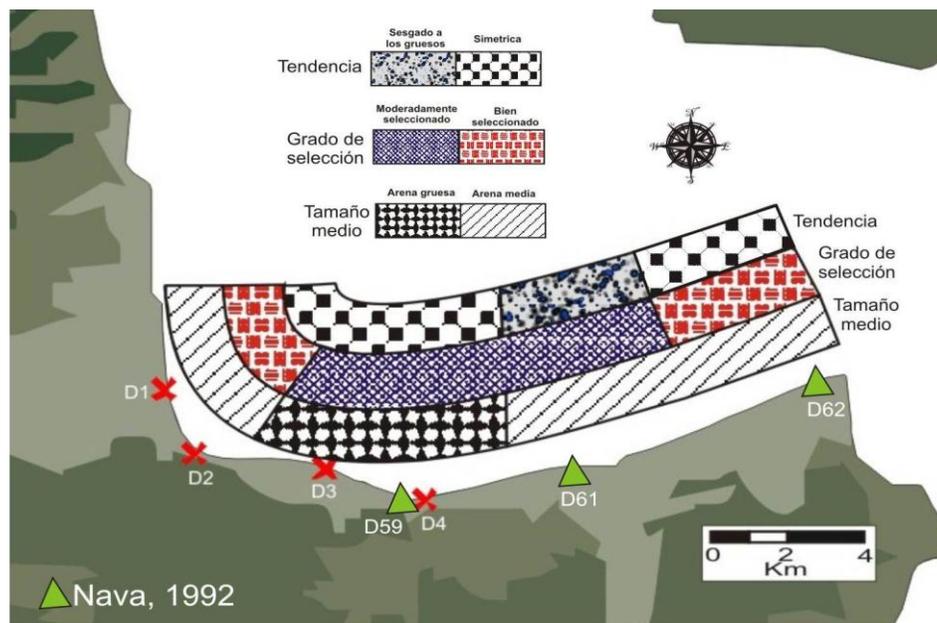
P10 es simétrico, P7 y P8 tienen una tendencia hacia los finos y para P11 y P12 esta tendencia es mayor a los finos, está muy marcada. La selección en esta porción de la playa es muy amplia, encontramos muestras desde pobremente seleccionadas (P12), moderadamente seleccionadas (P5, P7, P8, P9 y P11), bien seleccionada (P6) y muy bien seleccionada (P10) (Figura 16b).



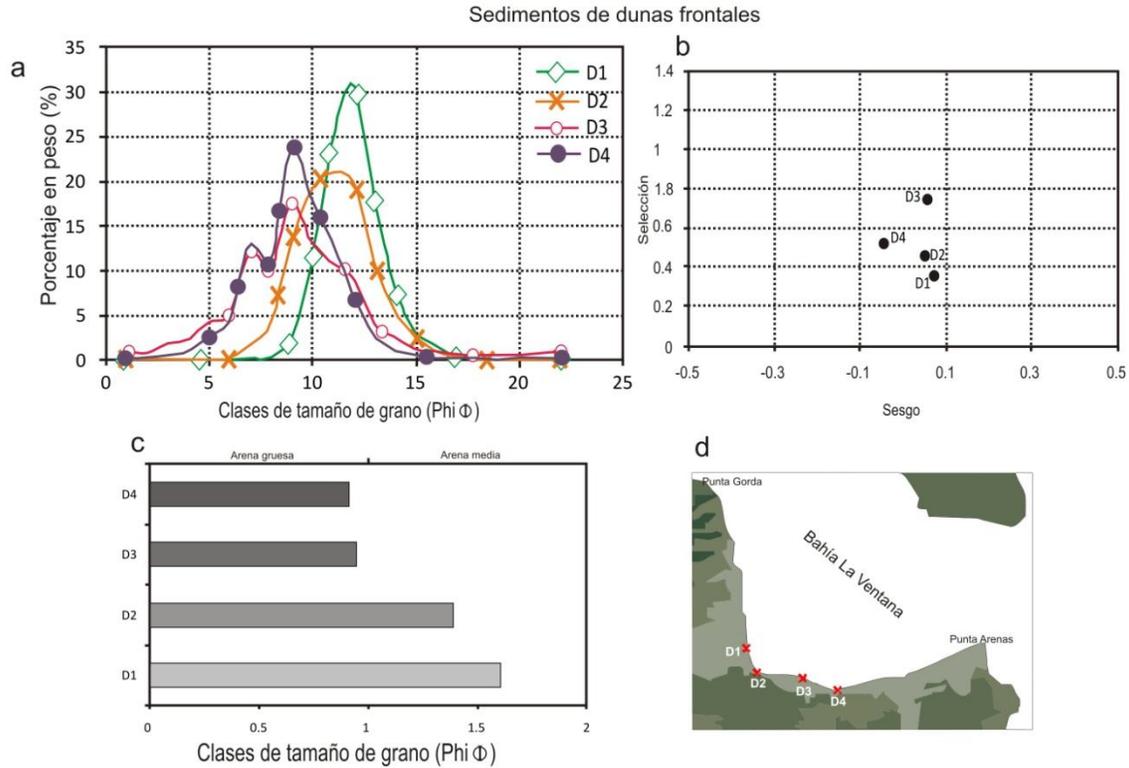
**Figura 16.** Granulometría de los sedimentos de playa de Bahía La Ventana: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

### 7.1.3. Sedimentos de dunas frontales

El cordón de dunas frontales de la costa sur de Bahía La Ventana no se muestreo en su totalidad, por lo que con el fin de cubrir la porción faltante y para tener un mejor análisis, se incluyeron las muestras D59, D61 y D62 analizadas por Nava Sánchez (1992), ubicadas en la parte este del cordón, y se utilizó a D59 del muestreo de Nava Sánchez, cercana a la muestra D4 para realizar comparaciones. Los sedimentos de dunas (Figura 17) de Bahía La Ventana, D1 y D2, localizadas en la parte oeste tienen distribución unimodal, D3 y D4, en el lado este de la costa, presentan distribución bimodal. El tamaño de grano de los sedimentos de dunas (Figuras 18a y 18b) que se encuentran al oeste (D1 y D2) está compuesto de arenas medias, presentan un sesgo simétrico y una selección moderada. En la parte este, el tamaño medio del material sedimentario en D3 y D4 está compuesto por arenas gruesas. En general, las muestras tienen un sesgo simétrico y presentan desde una buena selección (D1 y D2) a una moderada selección (D3 y D4) (Figura 18b).



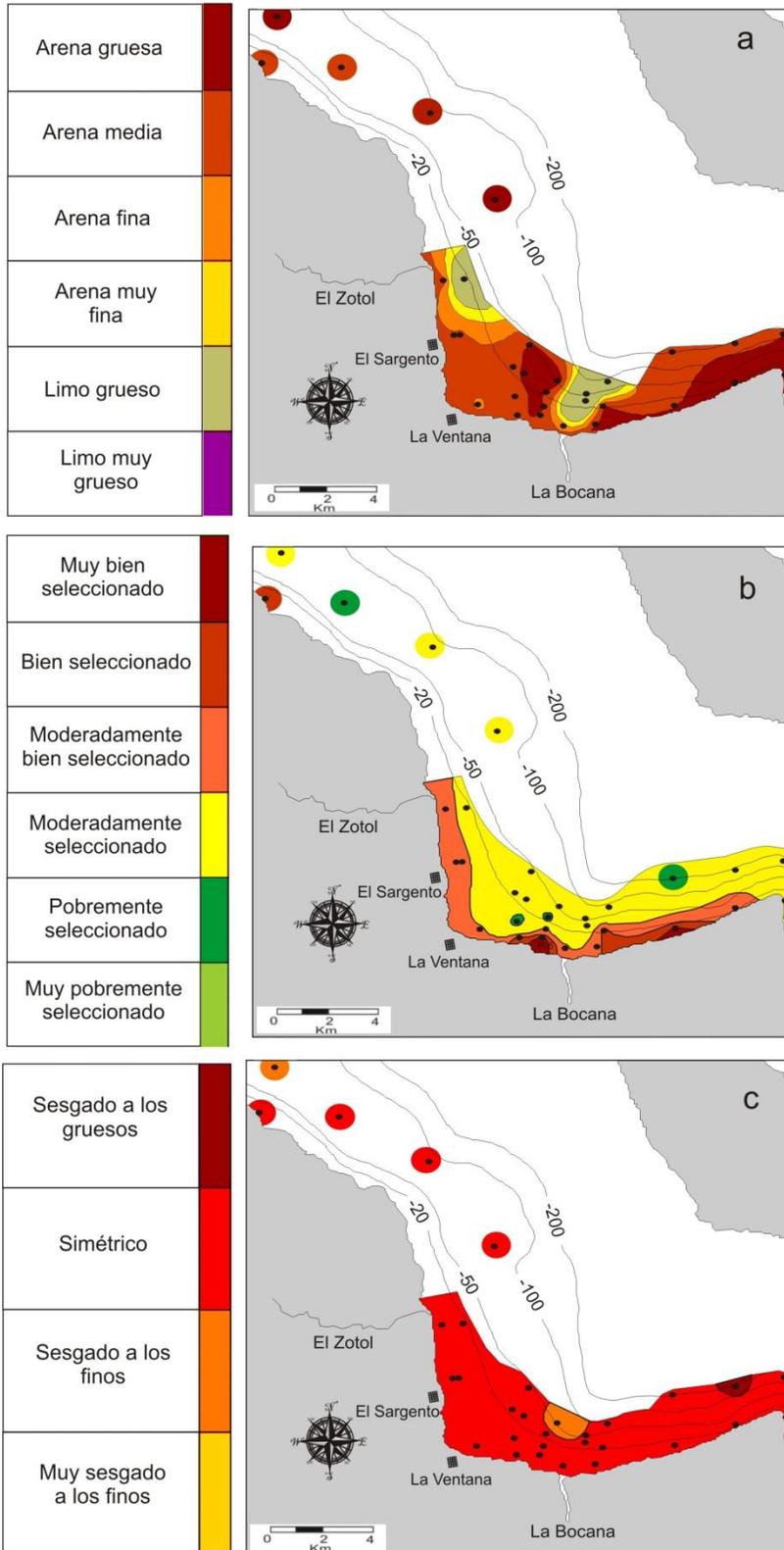
**Figura 17.** Mapa de localización y características granulométricas de los sedimentos de playa; tamaño medio, grado de selección y sesgo de los sedimentos de dunas frontales



**Figura 18.** Granulometría de los sedimentos de dunas frontales ubicadas en la porción sur de Bahía La Ventana: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi \Phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

#### 7.1.4. Sedimentos de la plataforma continental

El tamaño de grano del sedimento en la plataforma tiene distribución unimodal y polimodal, con tamaños desde limos hasta arena muy gruesa (Figura 19a y Apéndice 2 Figuras 60, 61 y 62). Los tamaños de limos los encontramos frente a la desembocadura del arroyo El Zotol y frente a la laguna La Bocana.



**Figura 19.** Distribución de a) el tamaño medio b) grado de selección y c) sesgo del sedimento de la plataforma continental de Bahía La Ventana.

El material sedimentario se encuentra pobremente seleccionado a profundidades mayores de 50 m, mientras que cerca de la costa se presentan con una mejor selección (Figura 19b). La mayor parte de las muestras presentan una distribución simétrica, y frente a La Bocana encontramos una tendencia hacia los finos (Figura 19c).

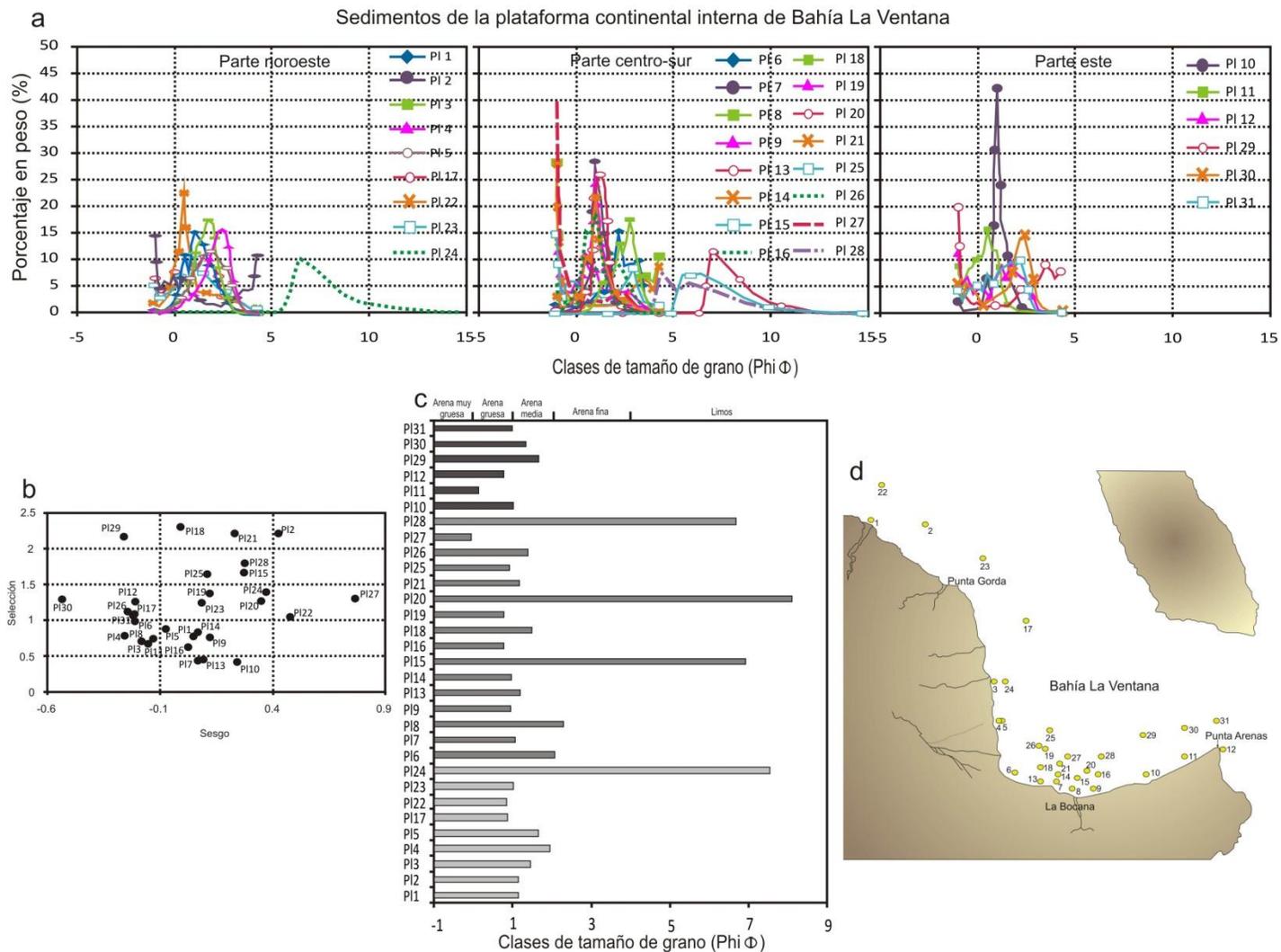
Con el objeto de visualizar mejor los resultados de la granulometría de los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana y por la misma naturaleza del muestreo, se presentan a continuación la división por grupos de las muestras: (a) plataforma norte, en donde el muestreo no fue intensivo, pero suficiente para ser representativo de esta porción; (b) plataforma centro-sur, aquí el muestreo fue intensivo debido que se encuentran las desembocaduras de los arroyos que drenan principalmente de la parte central de la Cuenca de San Juan de Los Planes y (c) plataforma sureste en donde el muestreo no fue intensivo, no obstante el flujo de la corriente litoral es de norte a sur durante todo el año jugando un papel importante en la distribución del tamaño de los sedimentos, y dado que Punta Arenas está ubicada en la parte sur y más estrecha de la bahía los sedimentos que son transportados desde la porción norte podrían quedar atrapados aquí.

Las muestras en la porción noroeste (a) de la plataforma continental de la bahía contienen sedimentos dominados por arenas gruesas, con excepción de la muestra PI24 la cual contiene en su mayoría limos (Figura 20a). En la porción centro-sur (b) de la plataforma continental en la bahía, la mayor parte de las muestras están compuestas principalmente por tamaños de arenas medias (Figura 20c), sólo PI15, PI20 y PI26 se ubican en el rango de los limos. Para la porción sureste (c) el tamaño medio de las partículas es arena gruesa, PI29 y PI30 presentan tamaños de arenas medias (Figuras 20c).

La mayor parte de las muestras se encuentran pobremente seleccionadas, únicamente las estaciones cercanas a la costa se encuentran con buena selección. En la porción noroeste (Figura 20c) la selección esta de pobremente seleccionada a muy pobremente seleccionada, el sesgo de los sedimentos de esta

porción es hacia los gruesos a fuertemente hacia los finos en el caso de PI2. En la porción centro-sur (Figura 20c) tenemos el mismo sesgo que en la porción noroeste, en las estaciones PI7 y PI13 y como se mencionó anteriormente los sedimentos más costeros se encuentran bien seleccionados a diferencia de los que se encuentran alejados. En la porción sureste (Figura 20c) los sedimentos de la plataforma continental se encuentran sesgados hacia los gruesos, con excepción de la muestra PI10 con tendencia hacia los finos, los sedimentos con una mejor selección son aquellos que se encuentran cercanos a la línea de playa (PI10 y PI11) menos la muestra PI12 la cual está fuera de la bahía y está más expuesta a la corriente litoral.

Los resultados obtenidos de la granulometría muestran que el material sedimentario en los arroyos está compuesto principalmente por: (i) arenas ligeramente gravosas, (ii) arenas gravosas y (iii) grava arenosa. El grado de selección en arroyos presenta una variación amplia donde la mayoría de las muestras son moderadamente seleccionadas a muy pobremente seleccionadas. La tendencia es hacia los finos. En los sedimentos de playa dominan las partículas gruesas, con una amplia variación en la selección y el sesgo. Los sedimentos de duna son arenas medias y gruesas, de bien seleccionadas a moderadamente seleccionadas con tendencia predominantemente simétrica. En los sedimentos de la plataforma continental predominan las arenas medias, con excepción de Punta Arenas donde encontramos arenas gruesas y en áreas donde las descargas continentales son dominantes predominan las partículas finas (arroyo El Zotol y Laguna la Bocana).



**Figura 20.** Granulometría de los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana: a) porcentaje en peso (%) contra la clase del tamaño de grano ( $\phi$ ); b) grafica de sesgo contra selección; c) distribución de la media de cada muestra; d) localización de las muestras.

## 7.2. Composición general de los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y plataforma continental

### 7.2.1. Concentración y distribución espacial de los componentes ( $C_{org}$ , $CaCO_3$ ) elementos mayoritarios y traza, en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y plataforma continental

Los resultados de los componentes, elementos mayoritarios y traza obtenidos a partir de los diferentes análisis (EAA, ICP, ICP-MS, IR y COUL), en las muestras de sedimentos provenientes de los diferentes ambientes de depósito muestreados dentro del área del estudio se presentan en el Apéndice 1 Tablas de la 16 a la 22. A partir de estos datos se agruparon las muestras de los desechos de minería y fundición de San Antonio, las muestras de arroyo de la Cuenca de San Juan de Los Planes y las muestras de la plataforma continental de Bahía La Ventana. Para cada grupo se obtuvieron las concentraciones mínimas, máximas, promedio y desviación estándar de los elementos. Estos datos se muestran en la Tabla 1, para componentes y elementos mayoritarios, y en la Tabla 2 para elementos traza. Estas tablas a su vez incluyen la abundancia promedio de los elementos en la corteza continental superior (Wedepohl, 1995), con el objeto de hacer una comparación con los valores obtenidos para cada grupo. En las tablas también se incluyen otros elementos, además de los considerados como de importancia ambiental, debido a que se usaron para identificar el mejor elemento normalizador de las concentraciones de los elementos en el caso del FE y los ETR para definir un posible origen ya que no se cuenta con análisis petrográfico y mineralógico. Si bien estos datos evidencian que el Al, Ba, Be, Fe, Mg y otros elementos sobrepasan a los valores de la corteza continental superior (resaltados en negritas), para este trabajo solo se describirán los  $CaCO_3$ ,  $C_{org}$ , y los elementos de importancia ambiental como son As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn.

**Tabla 1.** Comparación de la abundancia promedio de los componentes y elementos mayoritarios (%) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de los componentes mayoritarios en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

Componente y elementos mayoritarios	Desechos de minería y fundición	Arroyos	Plataforma continental	Corteza continental superior <sup>1</sup>
CaCO <sub>3</sub>	-	-	$\frac{0.4 - 27}{12 \pm 8}$	-
C <sub>org</sub>	-	-	$\frac{0.02 - 0.8}{0.3 \pm 0.2}$	-
Al	$\frac{1 - 9}{5 \pm 3}$	$\frac{3 - 9}{7 \pm 1}$	$\frac{0.2 - 2}{0.6 \pm 0.4}$	7.7
Ca	$\frac{1 - 17}{6 \pm 7}$	$\frac{1 - 5}{2 \pm 1}$	$\frac{2 - 17}{9 \pm 5}$	2.9
Fe	$\frac{1 - 12}{7 \pm 4}$	$\frac{0.3 - 24}{4 \pm 4}$	$\frac{0.2 - 3}{0.9 \pm 0.8}$	3
K	$\frac{0.2 - 2}{1 \pm 0.5}$	$\frac{0.2 - 2}{1 \pm 0.4}$	$\frac{1 - 2}{1 \pm 0.3}$	2.8
Mg	$\frac{0.5 - 4}{2 \pm 1}$	$\frac{0.08 - 3}{1 \pm 0.9}$	$\frac{4 - 9}{6 \pm 1}$	1.3
Na	$\frac{0.4 - 2}{1 \pm 0.6}$	$\frac{1 - 3}{2 \pm 0.5}$	$\frac{1.5 - 3}{2 \pm 0.6}$	2.5
P	$\frac{0.03 - 0.1}{0.05 \pm 0.03}$	$\frac{0.008 - 0.1}{0.05 \pm 0.03}$	$\frac{0.01 - 0.08}{0.3 \pm 0.02}$	0.6
S	$\frac{0.005 - 6}{1 \pm 2}$	$\frac{0.005 - 1}{0.08 \pm 0.2}$	$\frac{0.04 - 0.2}{0.1 \pm 0.07}$	0.9
Ti	$\frac{0.01 - 0.4}{0.1 \pm 0.2}$	$\frac{0 - 2}{0.2 \pm 0.2}$	$\frac{0.02 - 0.3}{0.1 \pm 0.1}$	0.3

<sup>1</sup>Wedepohl (1995)

**Tabla 2.** Comparación de la abundancia promedio de los elementos traza (mg kg<sup>-1</sup>, excepto Hg µg kg<sup>-1</sup>) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

Elemento traza	Desechos de minería y fundición	Arroyos	Plataforma continental	Corteza continental superior <sup>1</sup>
As	$\frac{4420 - 208000}{71682 \pm 76381}$	$\frac{0.1 - 118843}{2539 \pm 15892}$	$\frac{0.1 - 12}{2 \pm 3}$	2
Ba	$\frac{63 - 845}{489 \pm 293}$	$\frac{195 - 1340}{710 \pm 308}$	$\frac{392 - 1150}{807 \pm 212}$	668
Be	$\frac{0.2 - 1}{0.7 \pm 0.4}$	$\frac{1 - 2}{1 \pm 0.3}$	$\frac{0.9 - 2}{1.4 \pm 0.3}$	3.1

<sup>1</sup>Wedepohl (1995)

**Tabla 2 continuación.** Comparación de la abundancia promedio de los elementos traza ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto Hg  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

Elemento traza	Desechos de minería y fundición	Arroyos	Plataforma continental	Corteza continental superior <sup>1</sup>
<b>Cd</b>	$\frac{0.4 - 27}{10 \pm 10}$	$\frac{0.10 - 23}{1.4 \pm 3.5}$	$\frac{0.1 - 6}{0.8 \pm 1}$	0.102
<b>Co</b>	$\frac{8 - 103}{41 \pm 35}$	$\frac{1 - 27}{10 \pm 7}$	$\frac{0.4 - 8}{2 \pm 2}$	11.6
<b>Cr</b>	$\frac{36 - 171}{98 \pm 50}$	$\frac{5 - 164}{69 \pm 44}$	$\frac{4 - 60}{19 \pm 15}$	35
<b>Cs</b>	$\frac{0.5 - 8}{3 \pm 3}$	$\frac{1 - 8}{3 \pm 2}$	$\frac{0.7 - 4}{2 \pm 1}$	5.8
<b>Cu</b>	$\frac{25 - 337}{148 \pm 127}$	$\frac{0.7 - 459}{27 \pm 61}$	$\frac{0.6 - 37}{6 \pm 8}$	14.3
<b>Hf</b>	$\frac{0.05 - 0.5}{0.1 \pm 0.2}$	$\frac{0.05 - 1}{0.3 \pm 0.3}$	$\frac{0.05 - 0.6}{0.1 \pm 0.1}$	5.8
<b>Hg</b>	7*	$\frac{0.1 - 54}{11 \pm 12}$	$\frac{0.5 - 39}{6 \pm 9}$	56
<b>Li</b>	$\frac{2 - 26}{13 \pm 8}$	$\frac{5 - 40}{16 \pm 8}$	$\frac{7 - 36}{14 \pm 7}$	22
<b>Mn</b>	$\frac{185 - 865}{527 \pm 272}$	$\frac{66 - 1100}{359 \pm 322}$	$\frac{23 - 355}{106 \pm 91}$	527
<b>Mo</b>	$\frac{0.4 - 5}{2 \pm 1}$	$\frac{0.05 - 0.7}{0.2 \pm 0.2}$	$\frac{0.1 - 2}{0.3 \pm 0.4}$	1.4
<b>Ni</b>	$\frac{9 - 44}{24 \pm 13}$	$\frac{1 - 30}{15 \pm 10}$	$\frac{2 - 17}{6 \pm 4}$	18.6
<b>Pb</b>	$\frac{18 - 12100}{2654 \pm 4797}$	$\frac{3 - 3965}{124 \pm 539}$	$\frac{9 - 57}{14 \pm 9}$	17
<b>Rb</b>	$\frac{9 - 147}{74 \pm 56}$	$\frac{33 - 144}{70 \pm 27}$	$\frac{28 - 97}{54 \pm 18}$	110
<b>Sb</b>	$\frac{1.5 - 327}{102 \pm 147}$	$\frac{0.05 - 18}{2 \pm 5}$	$\frac{0.4 - 2}{0.8 \pm 0.4}$	0.31
<b>Sc</b>	$\frac{5 - 33}{19 \pm 10}$	$\frac{1 - 32}{14 \pm 9}$	$\frac{0.1 - 11}{3 \pm 3}$	7
<b>Se</b>	$\frac{0.05 - 7}{3 \pm 3}$	$\frac{0.1 - 0.7}{0.2 \pm 0.2}$	$\frac{0.2 - 0.9}{0.5 \pm 0.2}$	0.083
<b>Sr</b>	$\frac{165 - 470}{271 \pm 122}$	$\frac{108 - 770}{413 \pm 209}$	$\frac{569 - 1000}{915 \pm 124}$	316

<sup>1</sup>Wedepohl (1995)

\*Valor único

**Tabla 2 continuación.** Comparación de la abundancia promedio de los elementos traza ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto  $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

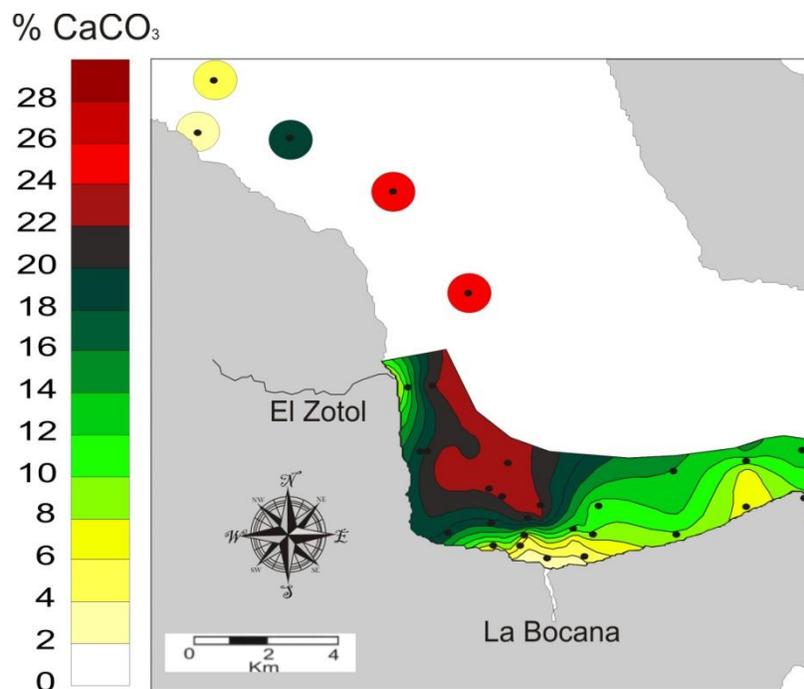
Elemento traza	Desechos de minería y fundición	Arroyos	Plataforma continental	Corteza continental superior <sup>1</sup>
Ta	$\frac{0.05 - 0.05}{0.05 \pm 0.05}$	$\frac{0.1 - 0.3}{0.1 \pm 0.1}$	$\frac{0.05 - 0.4}{0.2 \pm 0.09}$	1.5
Th	$\frac{0.6 - 7}{3 \pm 2}$	$\frac{0.6 - 14}{5 \pm 4}$	$\frac{0.5 - 9}{2 \pm 2}$	10.3
U	$\frac{0.1 - 2}{1 \pm 1}$	$\frac{0.2 - 3}{1 \pm 0.7}$	$\frac{0.3 - 3}{1 \pm 0.7}$	2.5
V	$\frac{75 - 259}{151 \pm 71}$	$\frac{17 - 162}{68 \pm 40}$	$\frac{0.5 - 74}{19 \pm 19}$	53
Y	$\frac{4 - 26}{14 \pm 8}$	$\frac{1 - 32}{13 \pm 8}$	$\frac{2 - 18}{6 \pm 4}$	20.7
Zn	$\frac{52 - 509}{233 \pm 180}$	$\frac{7 - 365}{53 \pm 51}$	$\frac{6 - 70}{25 \pm 18}$	52
Zr	$\frac{31 - 640}{268 \pm 258}$	$\frac{4 - 35}{14 \pm 8}$	$\frac{4 - 21}{8 \pm 4}$	237

<sup>1</sup>Wedepohl (1995)

### 7.2.1.1. Distribución espacial del contenido de $\text{CaCO}_3$ y $\text{C}_{\text{org}}$ en sedimentos de la plataforma continental

#### Carbonatos de calcio

Los valores de las concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  (Tabla 1) en sedimentos de la plataforma continental se encuentran entre 0.4 y 27% y en promedio tienen 12%. La distribución espacial del contenido de este componente en sedimentos de la plataforma continental (Figura 21) indica que la mayor presencia de carbonatos se encuentra en la parte norte más profunda de Bahía La Ventana, alejada de la línea de costa.

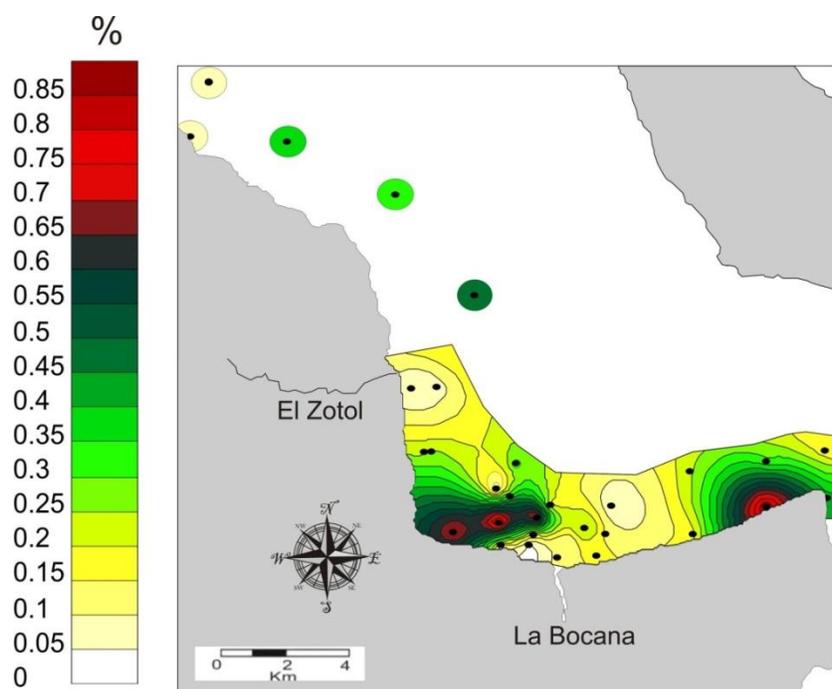


**Figura 21.** Distribución espacial del contenido de  $\text{CaCO}_3$  (%) en sedimentos de la plataforma continental en Bahía La Ventana.

#### Carbono orgánico

Las concentraciones de  $\text{C}_{\text{org}}$  (Tabla 1) en sedimentos de la plataforma son bajas, entre 0.02 y 0.87%, en promedio 0.2%. En la Figura 22 se presenta la distribución espacial de este componente, donde se puede observar que el mayor

contenido de carbono orgánico se encuentra cerca de Punta Arenas y del poblado La Ventana al oeste.



**Figura 22.** Distribución del contenido de C<sub>org</sub> (%) en sedimentos de la plataforma continental en Bahía La Ventana.

#### 7.2.1.2. Distribución espacial de las concentraciones de los elementos traza de importancia ambiental

Los resultados de las concentraciones de los elementos de importancia ambiental en los desechos de minería y fundición, así como en sedimentos de arroyos y de la plataforma continental del área de estudio, se presentan en forma resumida en la Tabla 3, de forma gráfica en mapas de distribución espacial en los diferentes ambientes de depósito y en histogramas que muestran la concentración promedio en los sedimentos a lo largo del arroyo San Antonio, que es el arroyo principal de la cuenca y es de gran importancia para este trabajo, debido a que inicia en la parte alta de la Sierra San Antonio, en donde se encuentra el área de fundición y están depositados los desechos de minería y fundición, además de que atraviesa los dos poblados principales de la cuenca San Antonio y San Juan de Los Planes, hasta su desemboca en Bahía La Ventana. También se presenta un

histograma con la concentración de los elementos en los sedimentos de arroyos a ambos lados (este y oeste) de la cuenca, así como sus contenidos en los desechos de minería y fundición.

**Tabla 3.** Comparación de la abundancia promedio de los elementos traza ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto Hg  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) de la corteza continental superior con los contenidos promedio de elementos traza de importancia ambiental en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

Elemento	Desechos de minería y fundición	Arroyos	Playa	Plataforma continental	Corteza continental superior <sup>1</sup>
<b>As</b>	4420 – 208000	0.1 – 11843	0.1 – 0.7	0.1 – 12	2
	$71682 \pm 76381$	$2539 \pm 15892$	$0.2 \pm 0.2$	$2 \pm 3$	
<b>Cd</b>	0.4 – 27	0.01 – 23	0.01 – 0.1	0.1 – 6	0.102
	$10 \pm 10$	$1.4 \pm 3.5$	$0.05 \pm 0.04$	$0.8 \pm 1$	
<b>Cu</b>	25 – 337	0.7 – 459	0.9 – 1	0.6 – 37	14.3
	$148 \pm 127$	$27 \pm 61$	$0.5 \pm 0.3$	$6 \pm 8$	
<b>Hg</b>	7*	0.1 – 54	1 – 206	0.5 – 39	56
		$11 \pm 12$	$24 \pm 57$	$6 \pm 9$	
<b>Pb</b>	18 – 12100	3 – 3965	2 – 6	9 – 57	17
	$2654 \pm 4797$	$124 \pm 539$	$4 \pm 1$	$14 \pm 9$	
<b>Sb</b>	1.5 – 327	0.05 – 18	-	0.4 – 2	0.31
	$102 \pm 147$	$2 \pm 5$		$0.8 \pm 0.4$	
<b>Zn</b>	52 – 509	7 – 365	2 – 31	6 – 70	52
	$233 \pm 180$	$53 \pm 51$	$11 \pm 8$	$25 \pm 18$	

<sup>1</sup> Wedepohl (1995)

\*Valor único

En la Tabla 3 se puede observar que el As y el Cd en los desechos de minería y fundición y arroyos, el valor mínimo, máximo están por arriba del valor de corteza continental superior, y en la plataforma solo están por arriba del valor máximo. Para el Hg el rango de los contenidos promedio en los diferentes ambientes de depósito están por debajo de la abundancia promedio de la corteza continental superior. El rango de las concentraciones de Pb y Zn para los desechos de minería y fundición sobrepasan el valor propuesto por Wedepohl (1995), mientras que los sedimentos de arroyos y plataforma continental están por debajo de dicho valor. El Sb, en los desechos de minería y fundición y en la plataforma continental se encuentra por arriba del valor promedio de la corteza continental superior, sin embargo en los sedimentos de los arroyos el valor máximo sobrepasa este valor.

## Arsénico

El valor promedio de arsénico (As) en la corteza continental superior es de  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  (Wedepohl, 1995). Los criterios de evaluación de la guía de calidad de los sedimentos para arsénico son: ERL ( $8.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y ERM ( $70 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Long *et al.*, 1995). La distribución espacial de las concentraciones promedio de arsénico (As) en los sedimentos de los diferentes ambientes de depósito del área de estudio se puede observar en la Figura 23, los niveles promedio de los desechos de minería y fundición ( $71682 \text{ mg kg}^{-1}$ ), los sedimentos de arroyo ( $2539 \text{ mg kg}^{-1}$ ), sedimentos de playa ( $0.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y los sedimentos de la plataforma continental ( $2 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

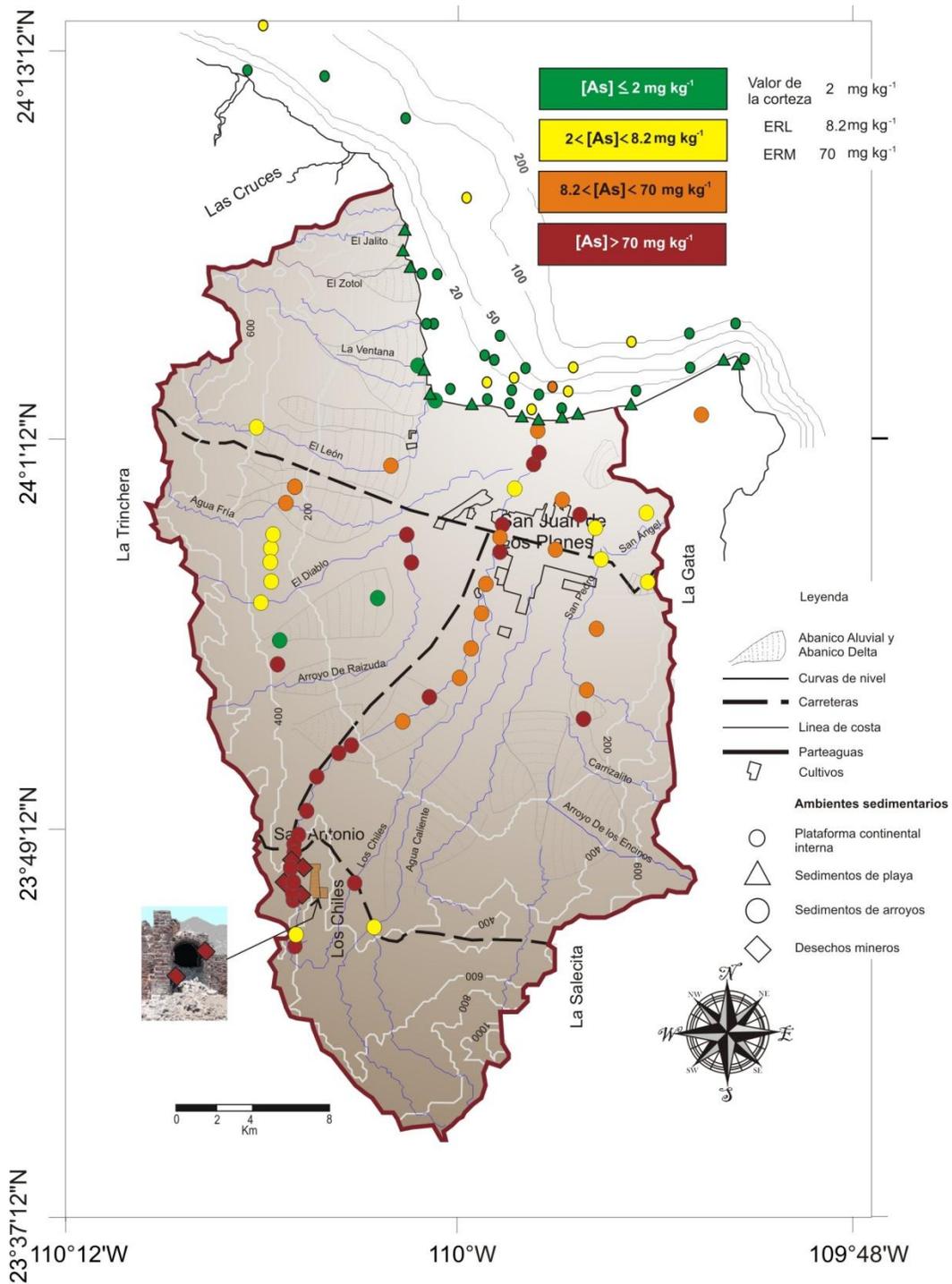
A lo largo del arroyo San Antonio (Figura 24a) los contenidos de este elemento en todas las estaciones se encuentran por encima de la abundancia promedio de este elemento en la corteza continental superior. Los contenidos más altos de As se presentan cerca del área de fundición (hasta  $10000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y en el poblado de San Antonio en la parte alta de la cuenca ( $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ ), y tienden a disminuir ligeramente aguas abajo hasta La Bocana cerca de la desembocadura, en donde se presenta una ligera elevación. Comparando estos valores con los criterios ERL y ERM, observamos que las estaciones A1, A4, A5, A6, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A17, A20, A37, A51, A59 y A60 sobrepasan el valor de ERM y el resto de las estaciones sobrepasa el valor ERL, con excepción de la estación A56 con un valor por debajo del ERL.

Para las muestras de sedimentos de los arroyos de la parte este y oeste de la cuenca (Figura 24b), los valores promedio están por debajo del promedio de la corteza continental superior, sin embargo hay estaciones con concentraciones mayores a los propuestos por Wedepohl (1995). En general se observa una amplia variación en las concentraciones, valores menores a los  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  (A26, A35, A64 y A65), entre  $2$  y  $8.2 \text{ mg kg}^{-1}$  (A34, A38, A39, A42, A43, A46, A48, A50, A53 Y A60), entre  $8.2$  y  $70 \text{ mg kg}^{-1}$  (A21, A29, A45, A54, A55, A57 y A58), y valores con concentraciones por arriba del valor de ERM (A19, A41, A45 y A52). En los arroyos Los Chiles (A7), De Raizuda (A23 y A41), El Diablo (A49) y El León

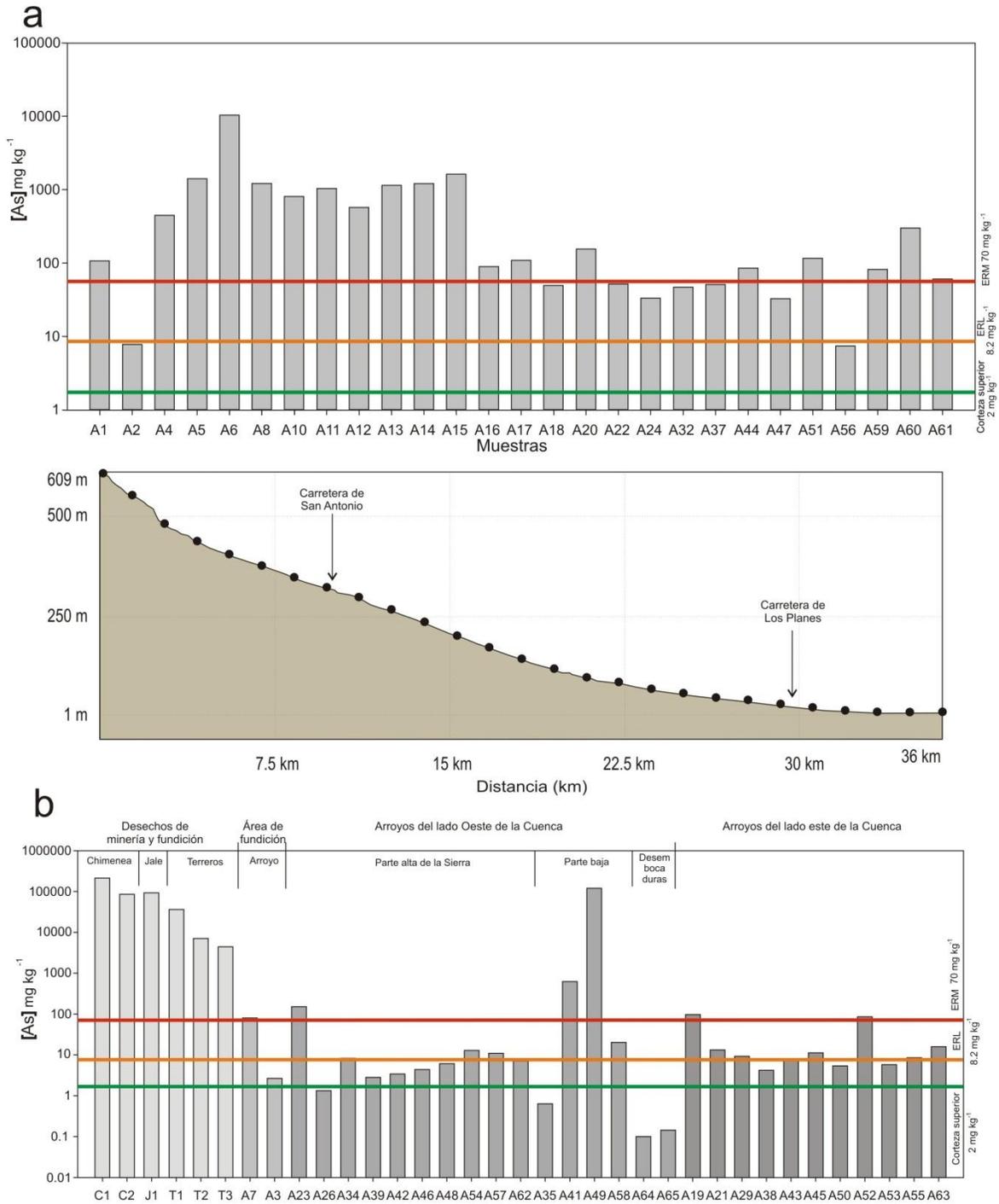
(A58), y en los arroyos de la parte Este de la cuenca se presentan valores mayores a los de la corteza continental superior.

Para los desechos de minería y fundición, todo el material (Figura 24b) presenta valores mayores a  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ , concentraciones muy por arriba de los promedios de la corteza continental superior y del valor ERM.

En los sedimentos de playa y de la plataforma continental (Figura 23) en general los valores de arsénico están por debajo del valor promedio de la corteza continental superior. En la plataforma continental, las estaciones PI8, PI16, PI17, PI18, PI21, PI22 y PI29 tienen valores mayores al valor promedio propuesto por Wedepohl (1995), el resto menor, y solamente la muestra PI20 presenta valores que sobrepasan el valor de ERL para As.



**Figura 23.** Distribución espacial de la concentración de As ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental



**Figura 24.** Histogramas de la concentración promedio de As ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM)

## Cadmio

El valor promedio de cadmio (Cd) en la corteza continental superior es de  $0.102 \text{ mg kg}^{-1}$  dado por Wedepohl (1995). Los criterios de evaluación de la guía de calidad de los sedimentos para este elemento son: ERL ( $1.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y ERM ( $9.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Long et al., 1995). Todas las muestras de sedimentos de los diferentes ambientes evidencian que los valores promedio de cadmio están por arriba del valor propuesto por Wedepohl (1995).

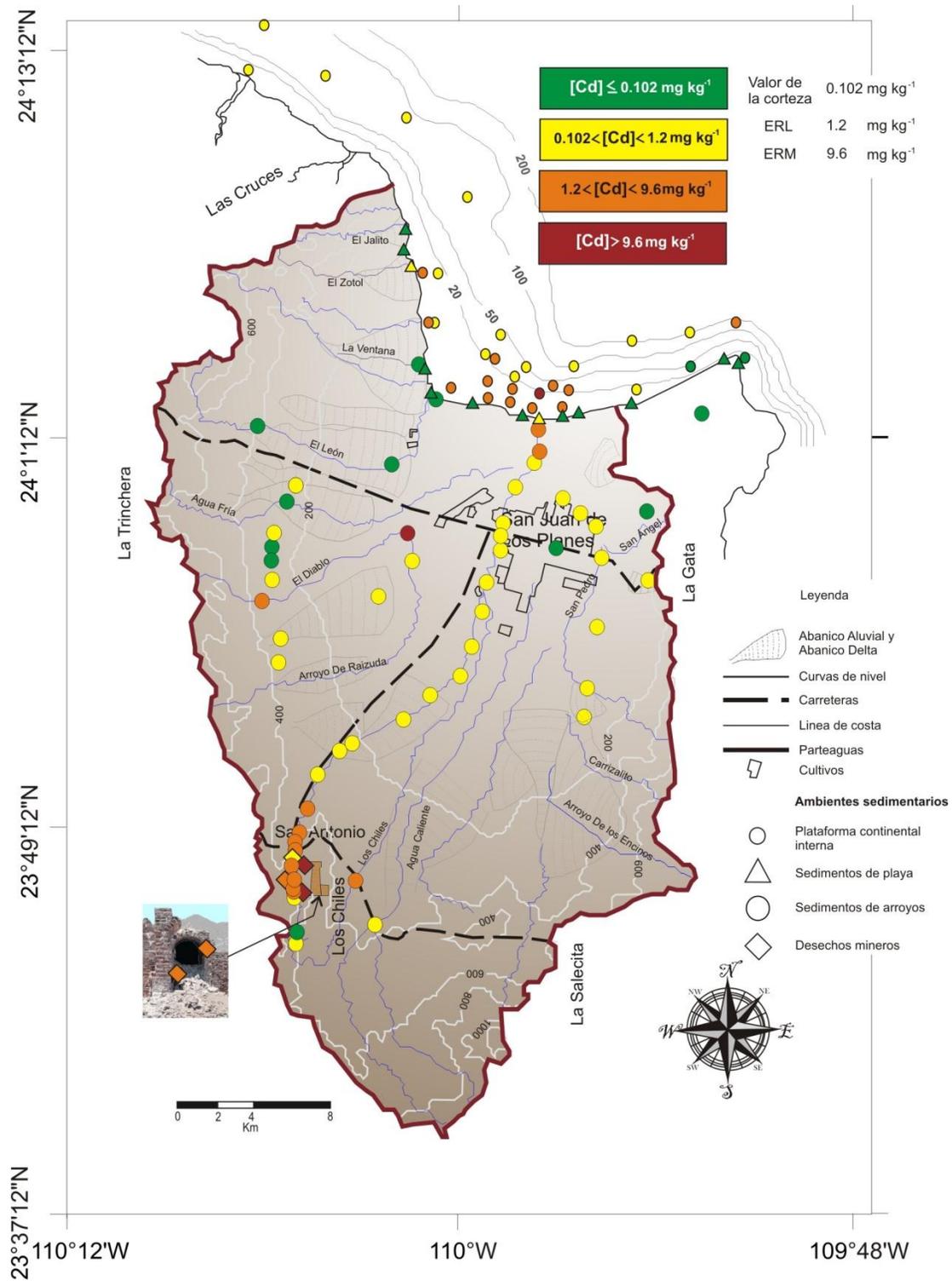
En la Figura 25 se observa la distribución espacial de estos valores. A lo largo del arroyo San Antonio (Figura 26b) los valores se encuentran elevados cerca del área de fundición hasta aproximadamente 5 km aguas abajo del arroyo, a partir de ahí los valores disminuyen drásticamente hasta antes de la desembocadura de este arroyo (La Bocana), donde nuevamente se encontraron concentraciones altas, similares a las observadas en el área de fundición. Los sedimentos de las estaciones cercanas al área de fundición (A5, A6 y A10), poblado de San Antonio (A11, A12, A13 y A14) y La Bocana (A60 y A61) se encuentran por arriba del criterio del ERL.

En los arroyos del lado oeste de la cuenca (Figura 26b) en la base de la Sierra La Trinchera los valores son cercanos al promedio de la corteza superior, y solo A34 en el arroyo El Diablo presenta valores de  $4 \text{ mg kg}^{-1}$  ( $>\text{ERL}$ ), mientras que en la parte baja A49 tiene valores de  $23 \text{ mg kg}^{-1}$  ( $>\text{ERM}$ ). Para los sedimentos en las desembocaduras de los arroyos en Bahía La Ventana y el arroyo El León los contenidos se encuentran por debajo de los  $0.102 \text{ mg kg}^{-1}$ . En los arroyos del lado este de la cuenca los sedimentos de la mayor parte de las estaciones tienen concentraciones ligeramente arriba del promedio y muy por debajo del criterio ERL.

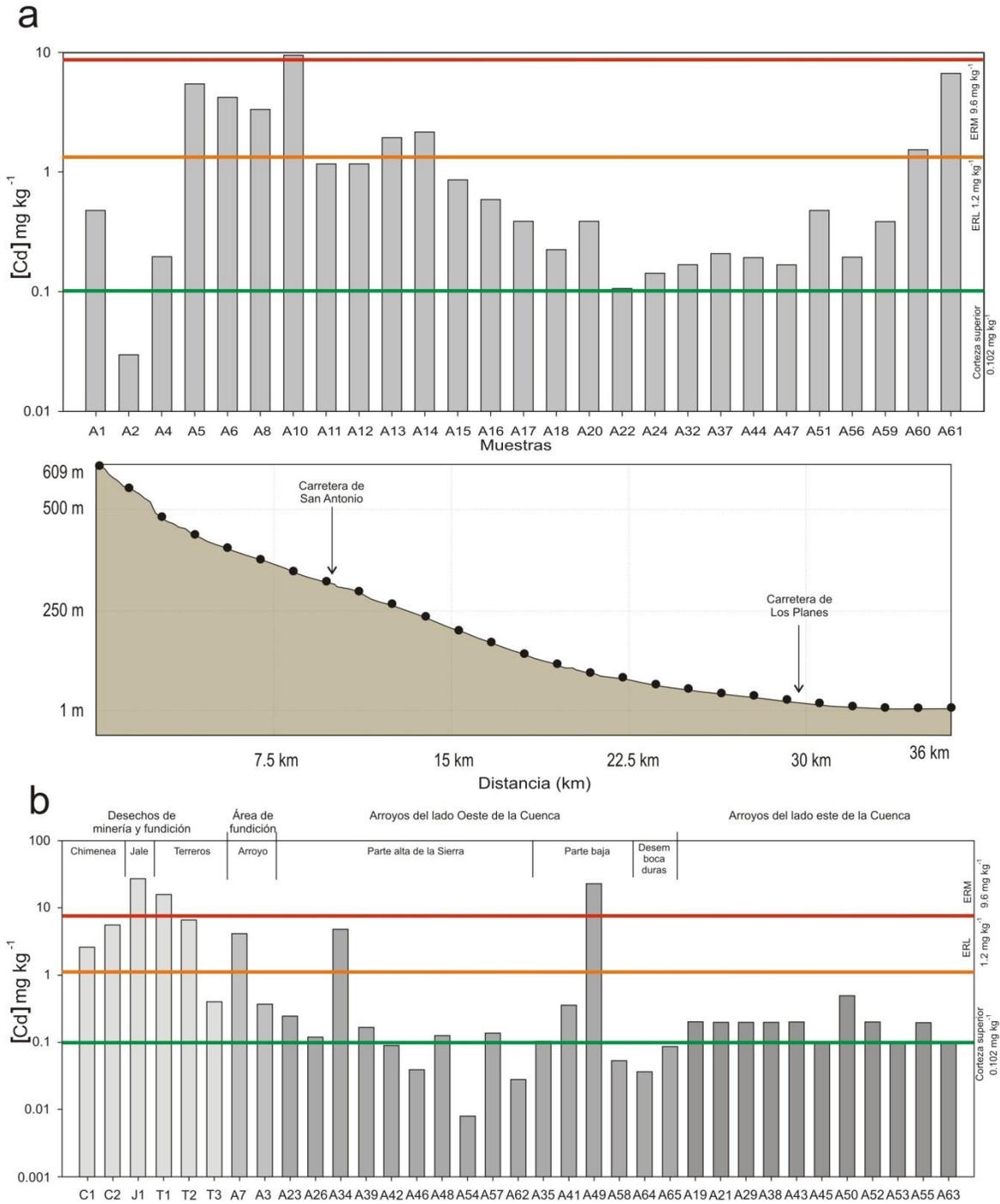
Para los sedimentos de los desechos de minería y fundición la muestra T3 presenta una concentración promedio de  $0.4 \text{ mg kg}^{-1}$ , y las muestras C1, C2 y T2 tienen valores entre los límites de los criterios de ERL y ERM, solamente las muestras J1 y T1 su contenido es mayor al ERM.

En los sedimentos de playa, la mayoría de las estaciones (Figura 57), los contenidos se encuentran por debajo del valor promedio de la corteza continental superior, solo las concentraciones en P3 y P8 son mayores a dicho valor.

En la plataforma continental de Bahía La Ventana los sedimentos, en general las concentraciones están por debajo de los promedios de la corteza continental superior. En la parte centro-sur de la bahía, frente a la desembocadura del arroyo San Antonio, y en la estación PI31 frente a Punta Arenas, la mayor parte se encuentra por arriba del criterio de ERL. En la costa frente a La Bocana se presenta un valor mayor al del criterio ERM, en la muestra PI15. Frente a Punta Arenas muy cerca de la línea de playa las concentraciones son menores al valor de la corteza continental superior.



**Figura 25.** Distribución espacial de la concentración de Cd ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental



**Figura 26.** Histogramas de la concentración promedio de Cd ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM)

## Cobre

El valor promedio de cobre (Cu) en la corteza continental superior es de 14.3 mg kg<sup>-1</sup>, dado por Wedepohl (1995). Los criterios de evaluación de la guía de calidad de los sedimentos para este elemento son: ERL (34 mg kg<sup>-1</sup>) y ERM (270 mg kg<sup>-1</sup>) (Long et al., 1995). Las concentraciones promedio para cobre en los sedimentos de los desechos de minería y fundición (148 mg kg<sup>-1</sup>), en los sedimentos de arroyos (27 mg kg<sup>-1</sup>), en la playa (0.5 mg kg<sup>-1</sup>) y los sedimentos de la plataforma continental (6 mg kg<sup>-1</sup>). De manera general en la Figura 27 se muestra la distribución espacial de las concentraciones promedio del Cu en los sedimentos de los diferentes ambientes de depósito del área de estudio.

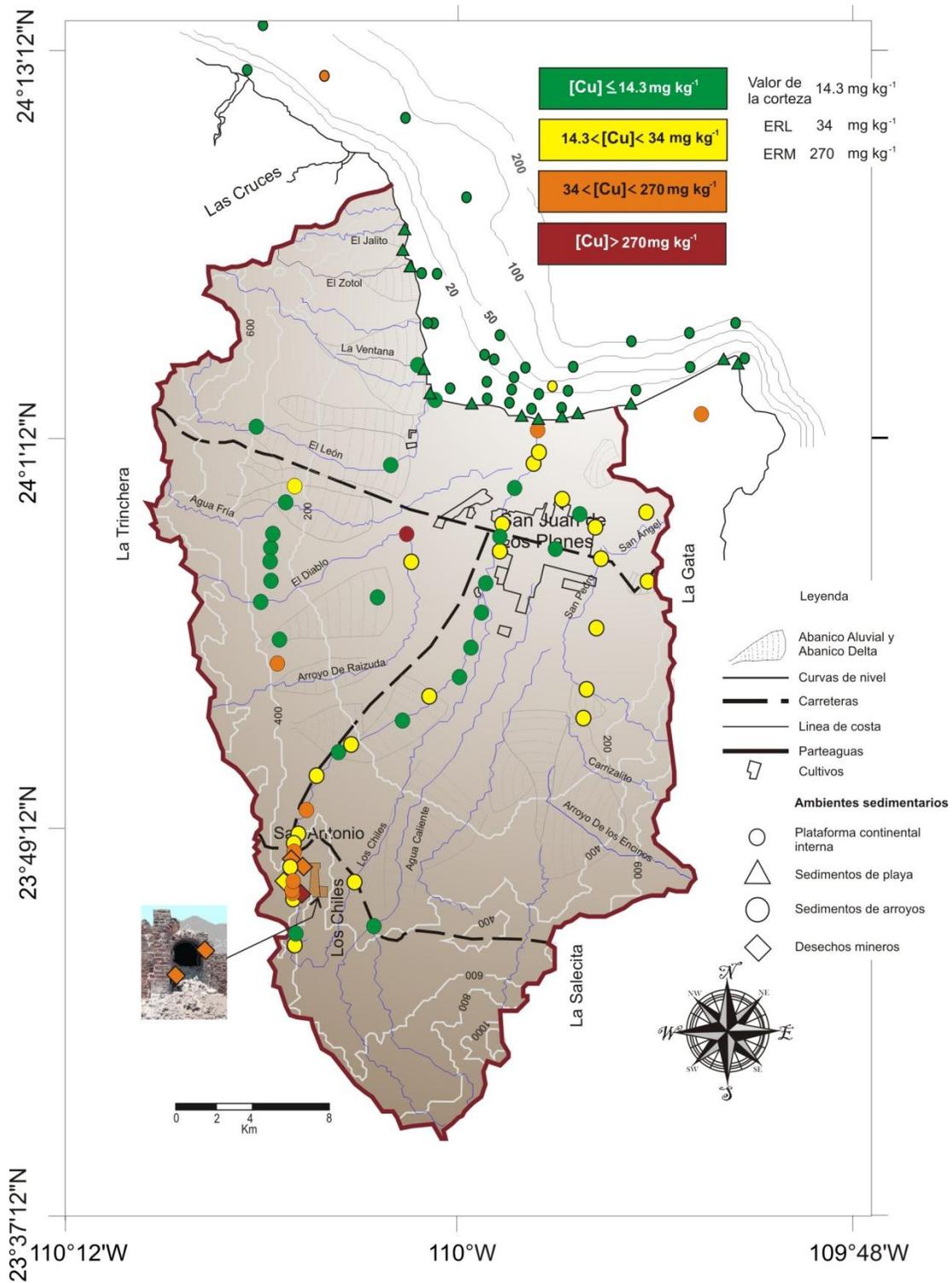
A lo largo del arroyo San Antonio la mayoría de las estaciones (Figura 28a) tienen concentraciones promedio de cobre mayores al valor de la corteza continental superior, y solo las muestras A5, A6 (cercanas al área de fundición) y A11 (localizada dentro del poblado de San Antonio) sobrepasan el criterio de ERL.

Las concentraciones de este elemento en los sedimentos de los arroyos de lado oeste (Figura 28b) de la cuenca, en la base de la sierra, muestra A23, sobrepasa el valor del ERL y la muestra A49 (en la parte baja de la Sierra) pasa el valor del ERM. Para los arroyos del lado este de la cuenca las concentraciones de Cu se encontraron por arriba del valor promedio de la corteza continental superior, y por debajo del valor de ERL. La estación A63, localizada en la planicie de inundación cerca de Punta Arenas (fuera de la Cuenca de San Juan de Los Planes) muestra valores de Cu por arriba del valor ERL.

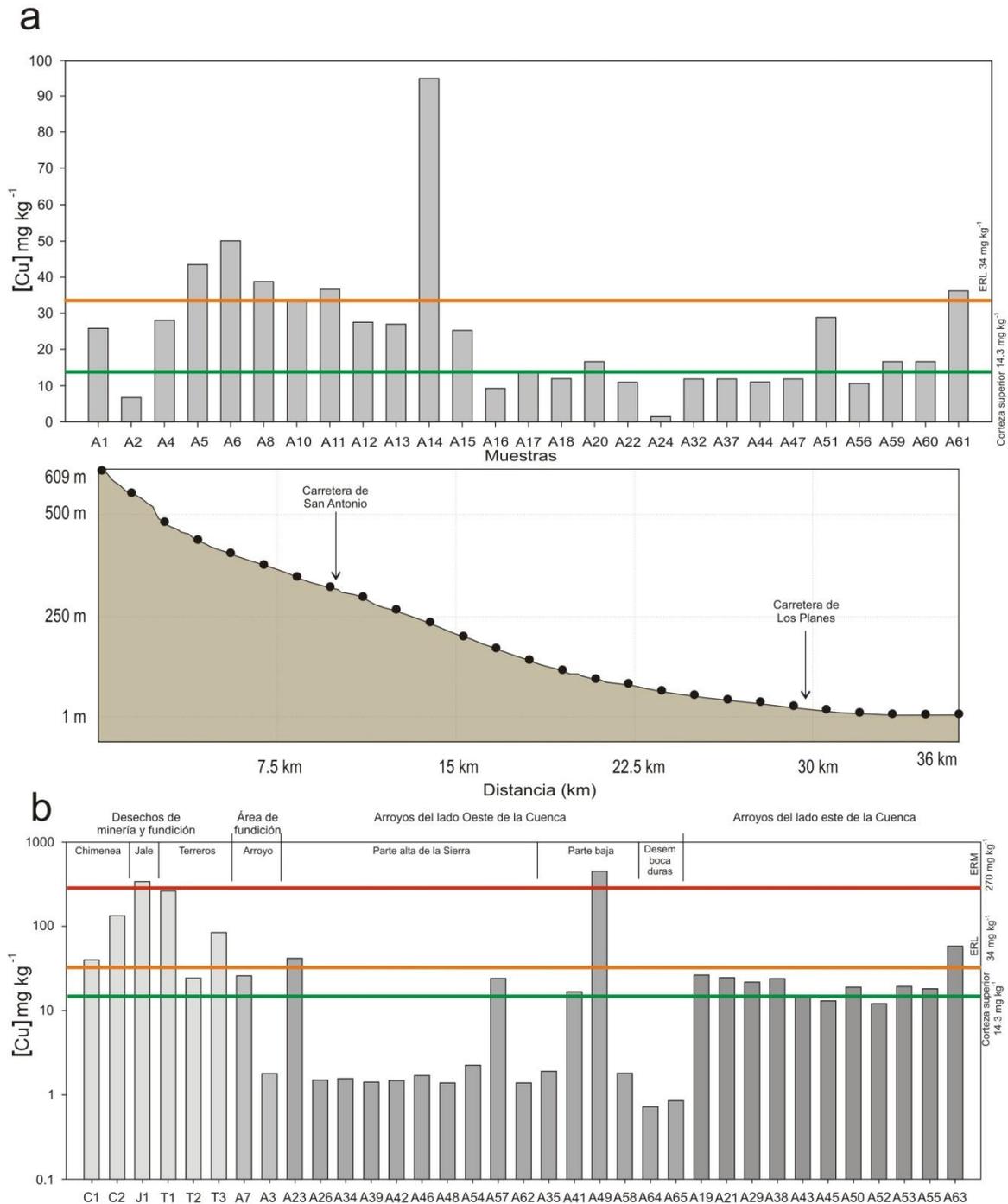
Las muestras del material sedimentario de los desechos de minería y fundición (Figura 28b) tienen valores de Cu mayores a los valores promedio de la corteza continental superior y mayores al criterio de ERL con excepción de la muestra J1 la cual mostró valores ligeramente mayores al ERM.

Para los sedimentos de playa y plataforma continental (Figura 27) los contenidos de Cu se encuentran por debajo del valor promedio de la corteza

continental superior, y solamente dentro de la plataforma PI2 (parte norte) y PI20 (porción centro-sur) se encuentran por arriba de dicho valor.



**Figura 27.** Distribución espacial de la concentración de Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental



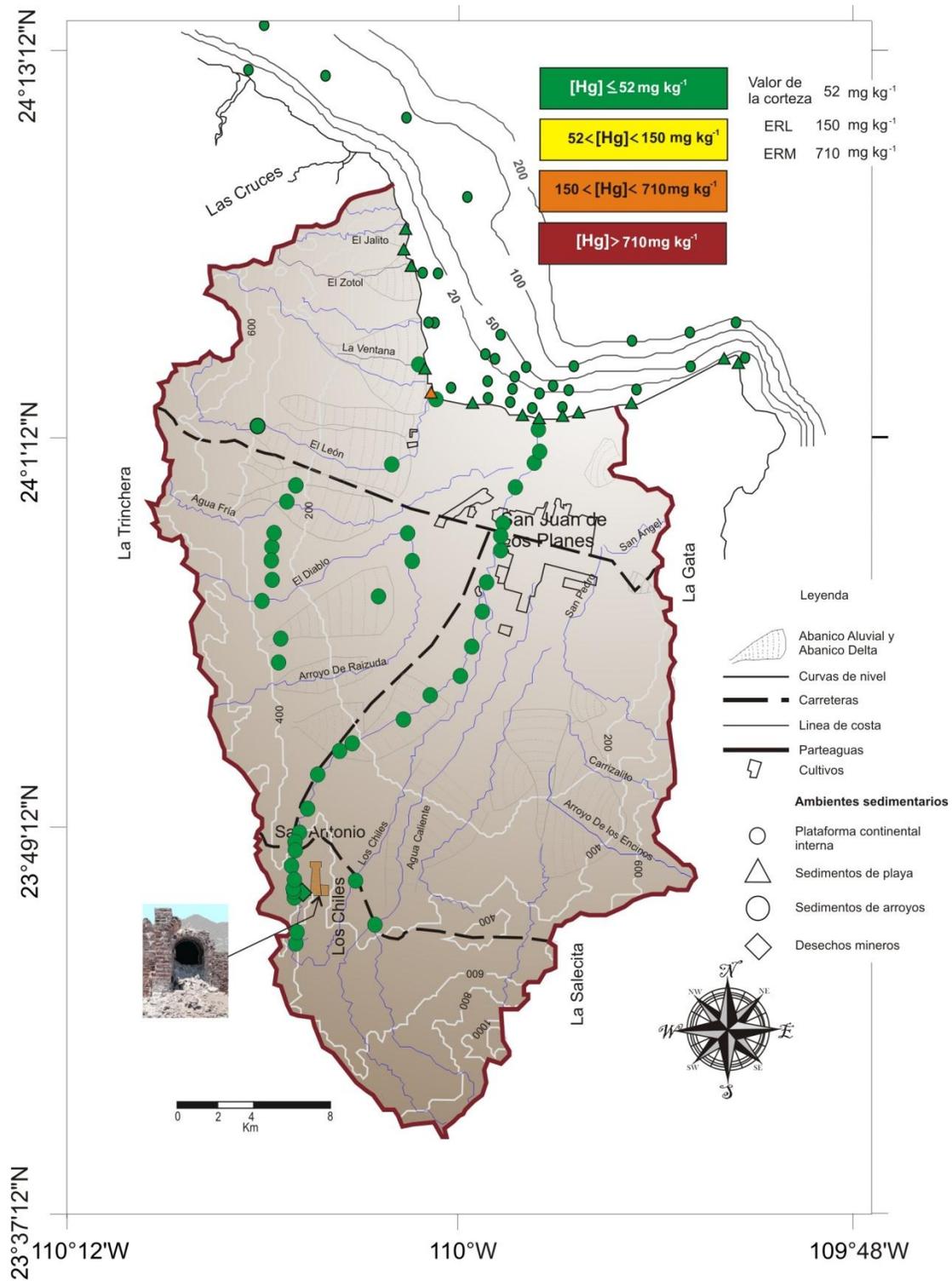
**Figura 28.** Histogramas de la concentración promedio de Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM)

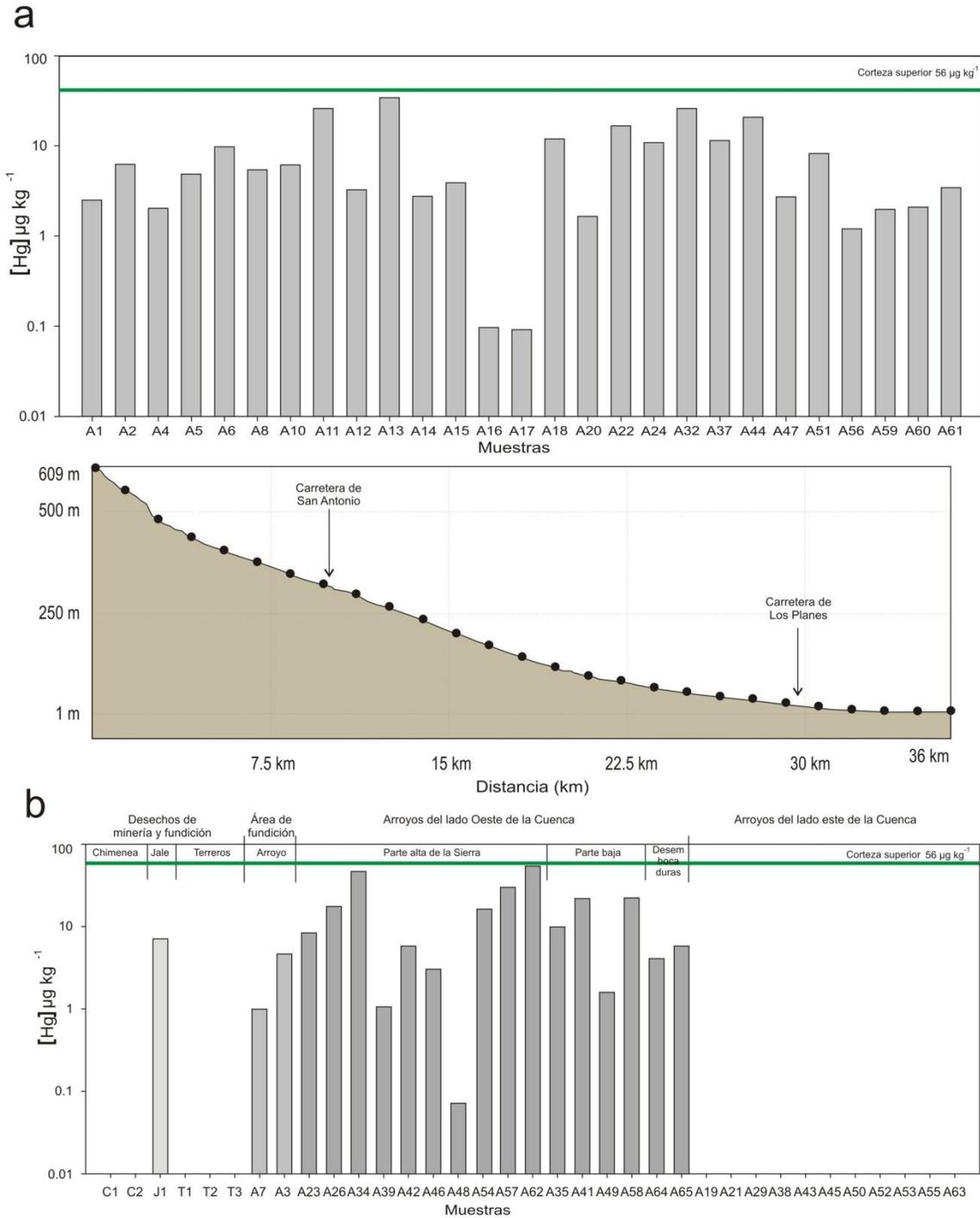
## Mercurio

El valor promedio de mercurio (Hg) en la corteza continental superior es de  $56 \mu\text{g kg}^{-1}$ , dado por Wedepohl (1995). Los criterios de evaluación de la guía de calidad de los sedimentos para este elemento son: ERL ( $150 \mu\text{g.kg}^{-1}$ ) y ERM ( $270 \mu\text{g.kg}^{-1}$ ) (Long *et al.*, 1995). Para los sedimentos de los diferentes ambientes se obtuvieron los valores promedio con excepción de los desechos de minería y fundición en donde solo se obtuvo un valor, el cual es  $7 \mu\text{g kg}^{-1}$ , en sedimentos de arroyos el promedio es de  $11 \mu\text{g kg}^{-1}$ , en sedimentos de playa  $24 \mu\text{g kg}^{-1}$  y en sedimentos de la plataforma continental  $6 \mu\text{g kg}^{-1}$ . De forma general en la Figura 29 se muestra la distribución espacial de este elemento en los sedimentos de los diferentes ambientes de depósito del área de estudio.

Los contenidos de este elemento en los sedimentos de los arroyos en general (Figura 30) se encuentran por debajo del promedio de la corteza superior, solo la estación A62 localizada en el arroyo El León (parte oeste de la cuenca) tiene valores ligeramente por arriba del promedio. No se cuenta con datos de los arroyos del lado este de la cuenca. En los sedimentos de los desechos de minería y fundición (Figura 30b) los valores del mercurio están por debajo del promedio de la corteza continental superior.

Los contenidos en los sedimentos de playa y de la plataforma continental de Bahía La Ventana tienen valores por debajo de los criterios establecidos por la NOAA (Long *et al.*, 1995), con excepción de la muestra de playa P5 la cual está por arriba del criterio de ERL.





**Figura 30.** Histogramas de la concentración promedio de Hg ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM)

## Plomo

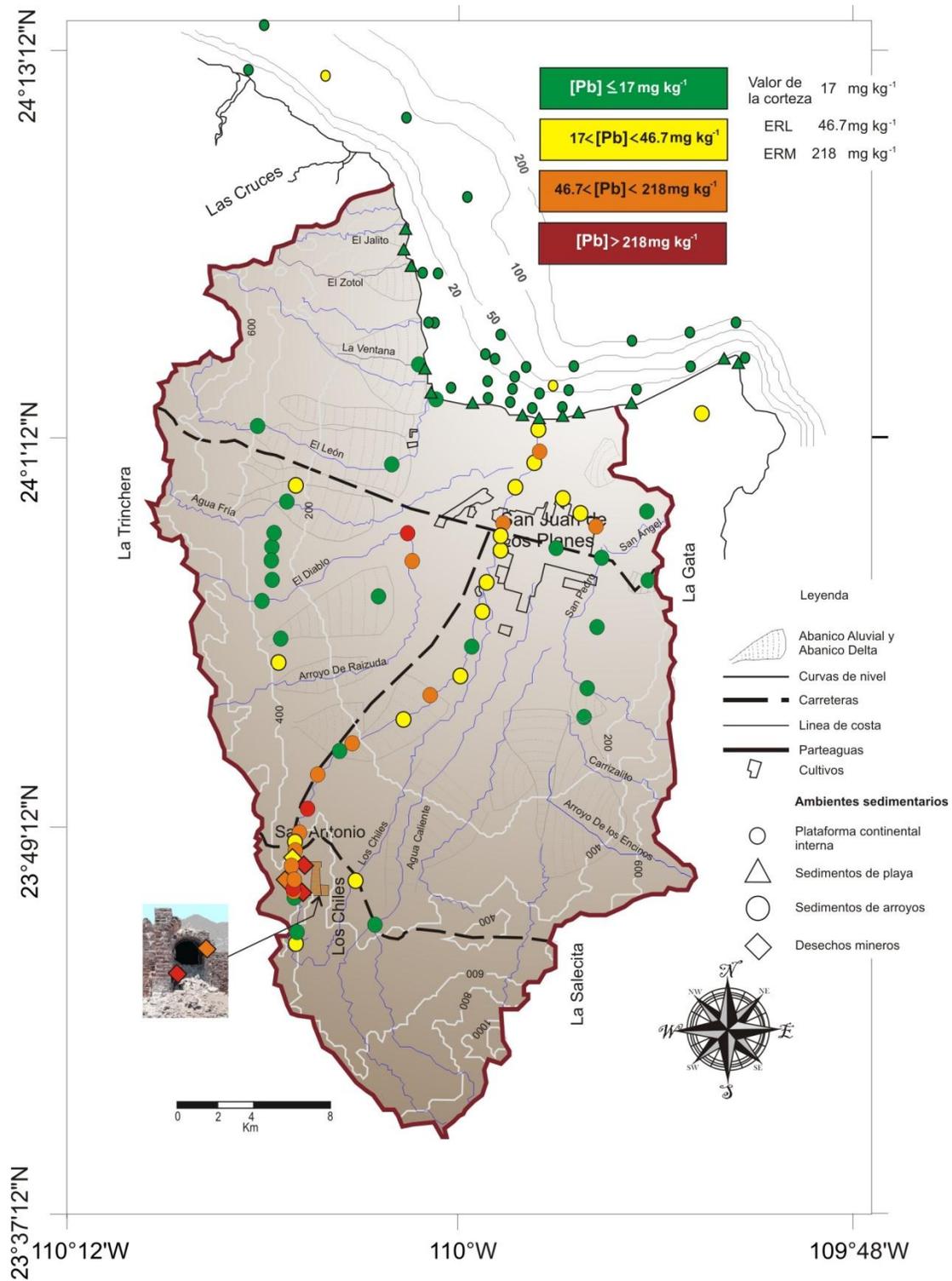
El valor promedio de plomo (Pb) en la corteza continental superior es de  $17 \text{ mg kg}^{-1}$ , dado por Wedepohl (1995). Los criterios de evaluación de calidad de los sedimentos para este elemento son: ERL ( $46.7 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) y ERM ( $218 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) (Long et al., 1995). La concentración promedio en sedimentos de los desechos de minería y fundición ( $2654 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y los sedimentos de arroyos ( $124 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se encuentran muy por encima del valor promedio de la corteza continental superior, mientras que los sedimentos de playa ( $4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y plataforma continental tienen valores menores ( $14 \text{ mg kg}^{-1}$ ). La Figura 31 muestra la distribución espacial de las concentraciones de este elemento en los diferentes ambientes de depósito.

En su mayoría, las muestras de los sedimentos en el arroyo San Antonio (Figura 32a) tienen concentraciones promedio mayores al valor de la corteza continental superior. Las muestras A5 (cercana al área de fundición), A10, A11, A13 (cerca del poblado de San Antonio), A14, A15, A51 y A60 se encuentran por arriba del ERL y solo la muestra A6 (cercana al área de fundición) sobrepasa el valor de ERM.

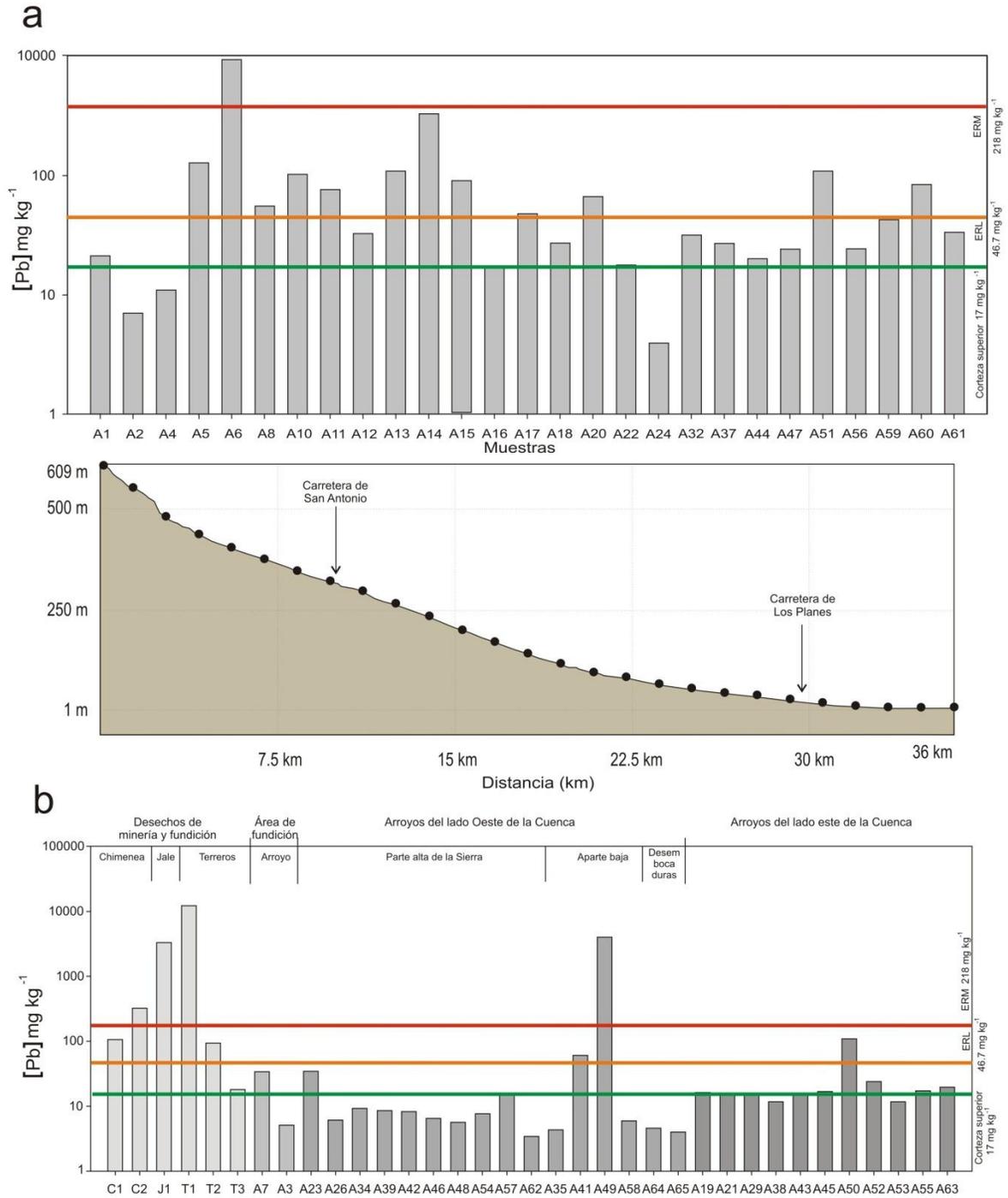
Los sedimentos de los arroyos del lado (Figura 32b) oeste de la cuenca tienen concentraciones de plomo por debajo del valor de la corteza continental superior, solo la estación A52 se encuentra ligeramente por arriba. Las muestras A41 y A50 tienen valores mayores al criterio de ERL y A49 mayor al ERM.

Para los desechos de minería y fundición las concentraciones (Figura 32b) presentan valores mayores al ERL en las estaciones C2 y T2, y mayores al valor de ERM en las estaciones C2, J1 y T2.

En su mayoría las estaciones de los sedimentos en la playa y la plataforma continental tienen concentraciones de Pb por debajo del valor de la corteza continental interna (Figura 31), solo las estaciones PI2 y PI10, en la plataforma continental, tienen contenido mayores al valor de la corteza continental superior.



**Figura 31.** Distribución espacial de la concentración de Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental



**Figura 32.** Histogramas de la concentración promedio de Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM)

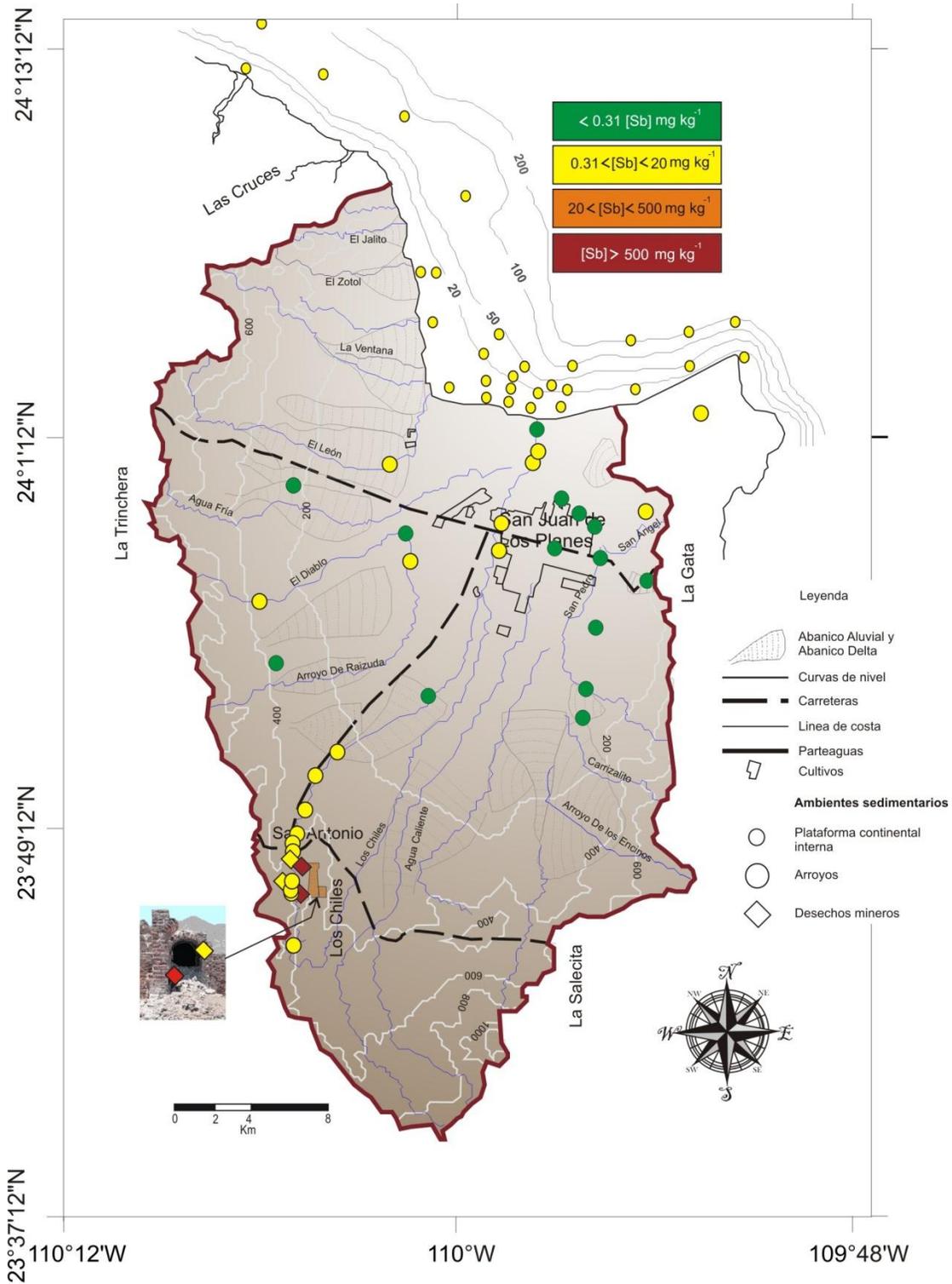
## Antimonio

El valor promedio de antimonio (Sb) en la corteza continental superior es de  $0.31 \text{ mg kg}^{-1}$  dado por Wedepohl (1995). Para este elemento no se tienen valores calculados para los criterios de ERL y ERM. La concentración promedio de Sb en los sedimentos de los desechos de minería y fundición ( $1194 \text{ mg kg}^{-1}$ ), sedimentos de arroyos ( $2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y sedimentos de la plataforma continental ( $0.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ), se muestran en la Figura 33 y Tabla 4. Las concentraciones muestran que una gran mayoría de las estaciones sobrepasan el valor promedio de la corteza continental superior, sobre todo los sedimentos de los desechos de minería y fundición.

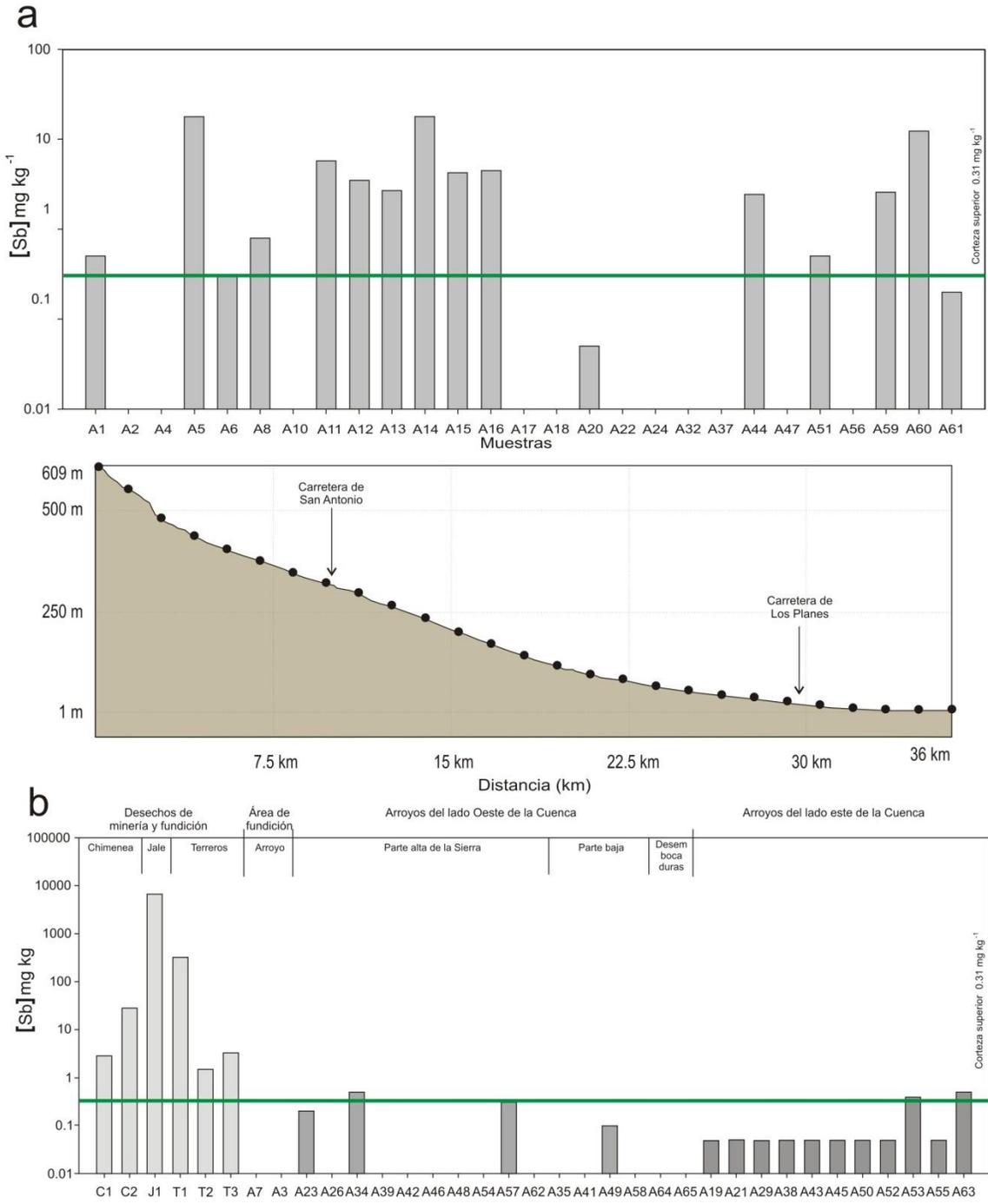
Los valores a lo largo del arroyo San Antonio (Figura 34a) se encuentran ligeramente por arriba del valor promedio de la corteza continental superior. Los contenidos en la estación A5 son mayores a los  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  y en la estación A61 ubicada en La Bocana los niveles disminuyen. En los arroyos del lado este y oeste (Figura 34b) las concentraciones están por debajo del valor promedio de la corteza continental superior, y únicamente las estaciones A34, A53, A57 y A63 tienen valores ligeramente por arriba (Figura 34b).

Para los sedimentos de los desechos de minería y fundición los contenidos de antimonio se encuentran altos, muy por encima de la corteza continental superior, y otros como J1 y T1 tienen contenidos mayores a los  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 34b).

Los sedimentos de playa y plataforma continental de Bahía La Ventana los contenidos promedio están ligeramente por arriba del valor promedio de la corteza continental superior.



**Figura 33.** Distribución espacial de la concentración de Sb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental



**Figura 34.** Histogramas de la concentración promedio de Sb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos (a) del arroyo San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca

## Zinc

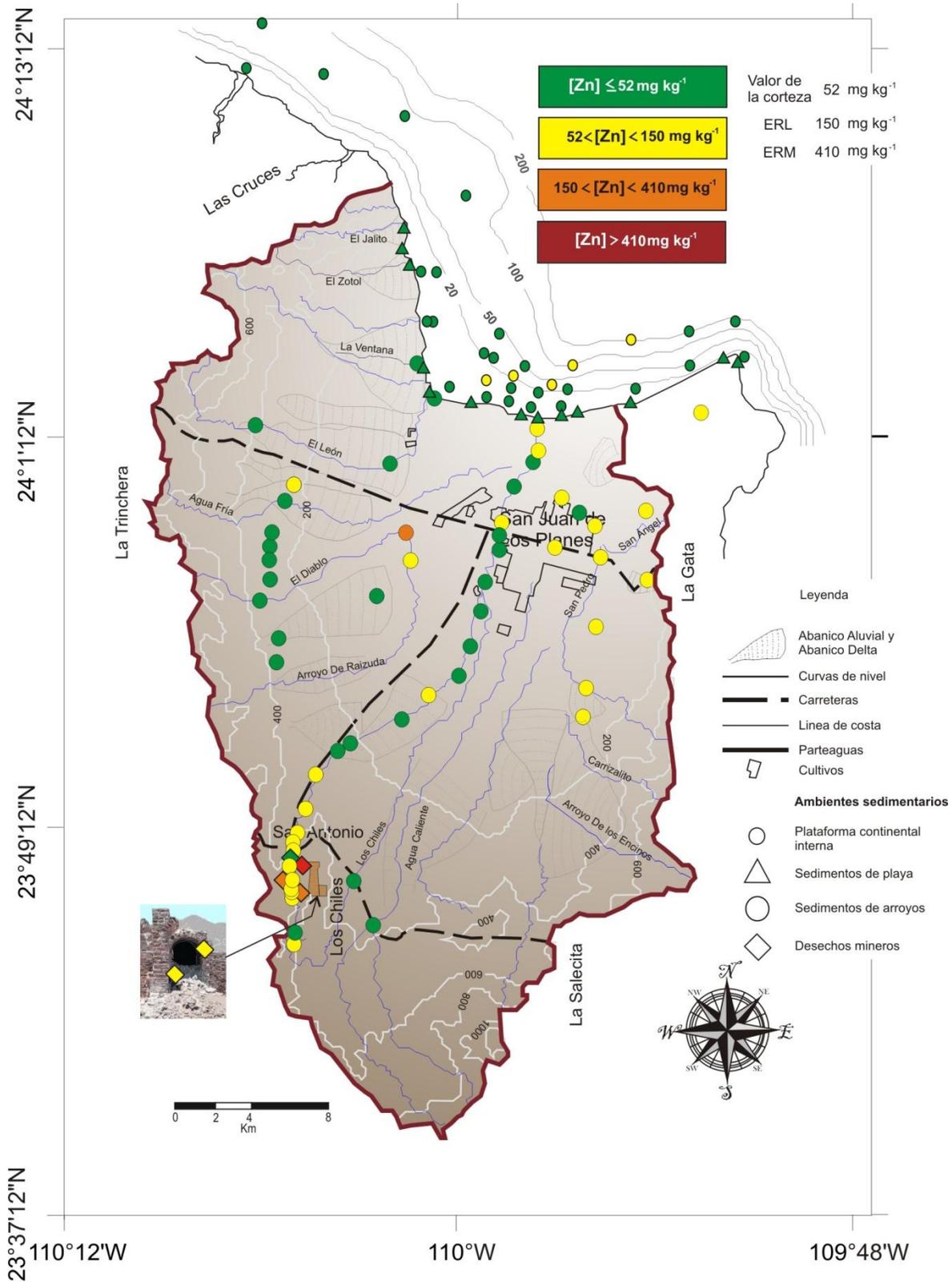
El valor promedio de zinc (Zn) en la corteza continental superior es de  $52 \text{ mg kg}^{-1}$ , dado por Wedepohl (1995). Los criterios de evaluación de la guía de calidad de los sedimentos para este elementos son: ERL ( $150 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) y ERM ( $410 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) (Long *et al.*, 1995). Las concentraciones promedio en los sedimentos de los desechos de minería y fundición ( $233 \text{ mg kg}^{-1}$ ), sedimentos de arroyos ( $53 \text{ mg kg}^{-1}$ ), de playa ( $11 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y de la plataforma continental ( $25 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se pueden observar en la Tabla 4. La distribución espacial de la concentración de Zn en los sedimentos del área de estudio se muestra en la Figura 35.

En el arroyo San Antonio las concentraciones de zinc en los sedimentos se encuentran elevados (Figura 36a) cerca del área de fundición y el poblado San Antonio. Arroyo abajo de este poblado los contenidos disminuyen ligeramente hasta La Bocana, donde aumentan ligeramente. Las concentraciones de este elemento en las zonas, donde se encuentra elevado sobrepasan los valores de la corteza continental superior.

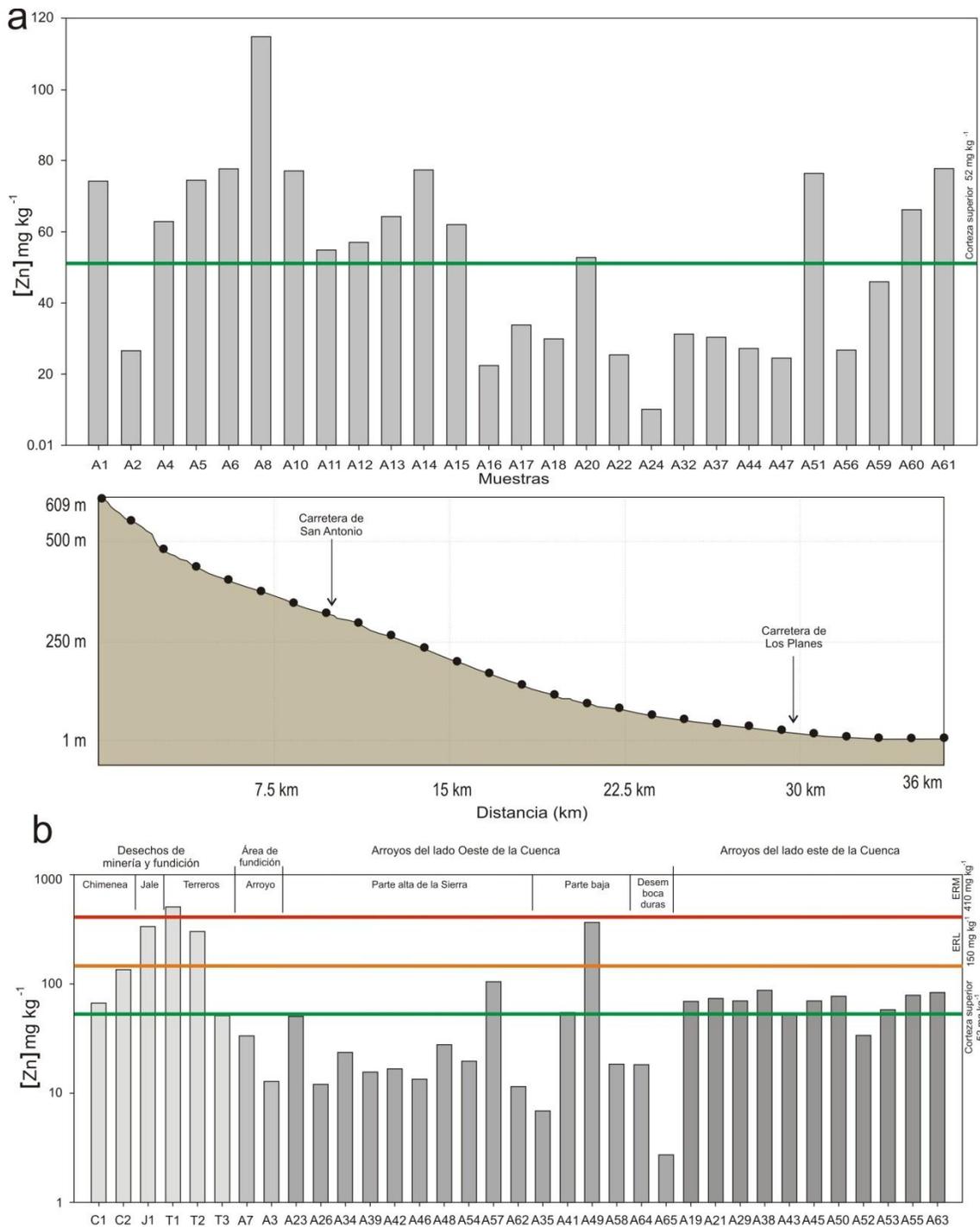
Los contenidos de zinc en los sedimentos de los arroyos ubicados en la parte oeste de la cuenca (Figura 36b) se encuentran por debajo del valor promedio de la corteza continental superior. En la parte baja de la Sierra La Trinchera las muestras de sedimento del arroyo De Raizuda (A41) se encuentra por arriba de la corteza continental superior, la estación A49 en el arroyo El Diablo esta por arriba del valor criterio de ERL. La mayoría de los sedimentos de los arroyos del lado este de la cuenca tienen contenidos con valores mayores a los de la corteza continental superior.

El material sedimentario en los desechos de minería y fundición (Figura 36b) tiene concentraciones de zinc en T3 ligeramente por debajo del valor de la corteza continental superior, las estaciones C1 y C2 están por arriba de dicho valor. Los contenidos promedio de J1 y T2 sobrepasan el valor de ERL y solamente T1 rebasa el valor de ERM.

Para los sedimentos de playa y de la plataforma continental de Bahía La Ventana (Figura 35) sólo las estaciones PI 18, PI 20, PI 21, PI 28 y PI 29 en la plataforma continental tienen concentraciones al valor promedio de la corteza continental superior.



**Figura 35.** Distribución espacial de la concentración de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos, playa y de la plataforma continental



**Figura 36.** Histogramas de la concentración promedio de Zn (mg kg<sup>-1</sup>) en sedimentos (a) del arroyos San Antonio, (b) de los desechos de minería y fundición y arroyos de la parte oeste y este de la cuenca, comparados con los valores promedio de la corteza continental superior y los criterios de calidad de los sedimentos (ERL y ERM)

### 7.3. Normalización de los elementos del grupo de tierras raras de los diferentes ambientes de depósito

Los elementos del grupo de las tierras raras (ETR) son generalmente considerados como indicadores de fuentes terrígenas, este grupo está constituido por 14 elementos, que a su vez se subdividen en tierras raras ligeras (La, Ce, Pr y Nd), tierras raras intermedias (Sm, Eu, Gd y Tb) y tierras raras pesadas (Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu). Los datos obtenidos sobre las concentraciones de los ETR de los diferentes ambientes de depósito se presentan en forma resumida con los rangos mínimo-máximo, promedios y desviación estándar en la Tabla 4.

Debido al comportamiento de los ETR durante el desgaste de rocas por acción del viento, su transporte vía fluvial y su alta resistencia a la movilización química (Taylor y McLennan, 1985) la normalización de los lantánidos es una técnica que permite identificar variaciones en la composición de los ETR, excluyendo la influencia de diferentes abundancias (Grajeda Muños, 2005) y son generalmente considerados como indicadores de fuentes terrígenas (Cornell, 1993).

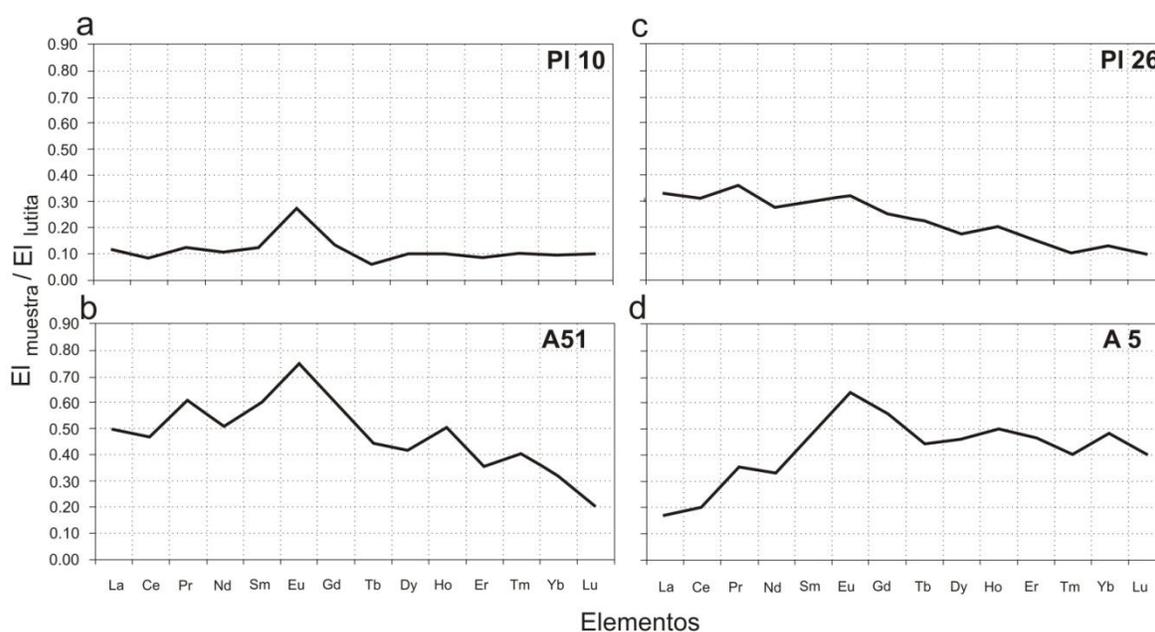
Las concentraciones de los ETR en sedimentos de arroyos son más altas que en los contenidos de los desechos de minería y fundición, y los ETR ligeros y pesados en los sedimentos de la plataforma continental son ligeramente mayores al valor de la lutita norteamericana, mientras que los intermedios se encuentran por debajo.

**Tabla 4.** Comparación de la concentración de ETR normalizados ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental con los valores de la lutita norteamericana

ETR	Desechos de minería y fundición	Arroyos	Plataforma continental	NASC*
La	$\frac{0.05 - 25}{9.5 \pm 8.9}$	$\frac{3.2 - 36}{16.3 \pm 9.4}$	$\frac{2.5 - 23}{8.7 \pm 5}$	32
Ce	$\frac{5.8 - 55}{26 \pm 17}$	$\frac{5 - 76}{35 \pm 20}$	$\frac{3.6 - 52}{18 \pm 13}$	73
Pr	$\frac{0.9 - 7.4}{3.9 \pm 2.3}$	$\frac{0.7 - 10.3}{5 \pm 2.7}$	$\frac{0.6 - 6.6}{2.4 \pm 1.5}$	7.9
Nd	$\frac{3.7 - 25}{14.3 \pm 8.1}$	$\frac{2.1 - 34}{17.5 \pm 8.9}$	$\frac{2.1 - 23}{8.2 \pm 5.16}$	33
Sm	$\frac{0.9 - 5.1}{3.2 \pm 1.7}$	$\frac{0.4 - 7.1}{3.7 \pm 1.8}$	$\frac{0.4 - 4.6}{1.64 \pm 1.05}$	5.7
Eu	$\frac{0.26 - 1.24}{0.87 \pm 0.39}$	$\frac{0.25 - 1.45}{0.93 \pm 0.35}$	$\frac{0.24 - 0.97}{0.45 \pm 0.19}$	1.2
Gd	$\frac{0.9 - 5}{3.1 \pm 1.6}$	$\frac{0.3 - 6.5}{3.5 \pm 1.7}$	$\frac{0.4 - 4.2}{1.5 \pm 0.9}$	5.2
Tb	$\frac{0.1 - 0.7}{0.4 \pm 0.3}$	$\frac{0.05 - 0.9}{0.48 \pm 0.25}$	$\frac{0.05 - 0.6}{0.2 \pm 0.15}$	0.9
Dy	$\frac{0.8 - 4.7}{2.6 \pm 1.4}$	$\frac{0.2 - 5.7}{2.8 \pm 1.5}$	$\frac{0.3 - 3.6}{1.24 \pm 0.85}$	5.8
Ho	$\frac{0.2 - 1}{0.5 \pm 0.3}$	$\frac{0.05 - 1.1}{0.54 \pm 0.29}$	$\frac{0.05 - 0.7}{0.2 \pm 0.17}$	1.0
Er	$\frac{0.4 - 2.7}{1.5 \pm 0.8}$	$\frac{0.1 - 3.2}{1.5 \pm 0.8}$	$\frac{0.2 - 1.8}{0.64 \pm 0.43}$	3.4
Tm	$\frac{0.05 - 0.4}{0.2 \pm 0.1}$	$\frac{0.05 - 0.5}{0.21 \pm 0.12}$	$\frac{0.05 - 0.3}{0.08 \pm 0.07}$	0.5
Yb	$\frac{0.4 - 2.4}{1.3 \pm 0.7}$	$\frac{0.05 - 2.9}{1.3 \pm 0.7}$	$\frac{0.10 - 1.6}{0.5 \pm 0.4}$	3.1
Lu	$\frac{0.05 - 0.3}{0.18 \pm 0.11}$	$\frac{0.05 - 0.4}{0.19 \pm 0.1}$	$\frac{0.05 - 0.2}{0.07 \pm 0.05}$	0.5

\* NASC (North American Shale Composite, por sus siglas en inglés) valores promedio de la lutita norteamericana

Se encontró que los contenidos de ETR normalizados con respecto a la lutita norteamericana de las muestras analizadas de toda el área de estudio presentaron los patrones siguientes: (i) elementos con anomalía positiva de Eu, (ii) enriquecimiento de elementos ligeros y empobrecimiento de elementos pesados, (iii) enriquecimiento de elementos ligeros con anomalía positiva de Eu y (iv) enriquecimiento de elementos pesados con anomalía positiva de Eu. En la Figura 37 se incluyen algunas muestras con los patrones de ETR anteriormente descritos, y las Figuras 38 y 39 muestran la distribución espacial de estos patrones para las estaciones donde se obtuvieron valores ETR.



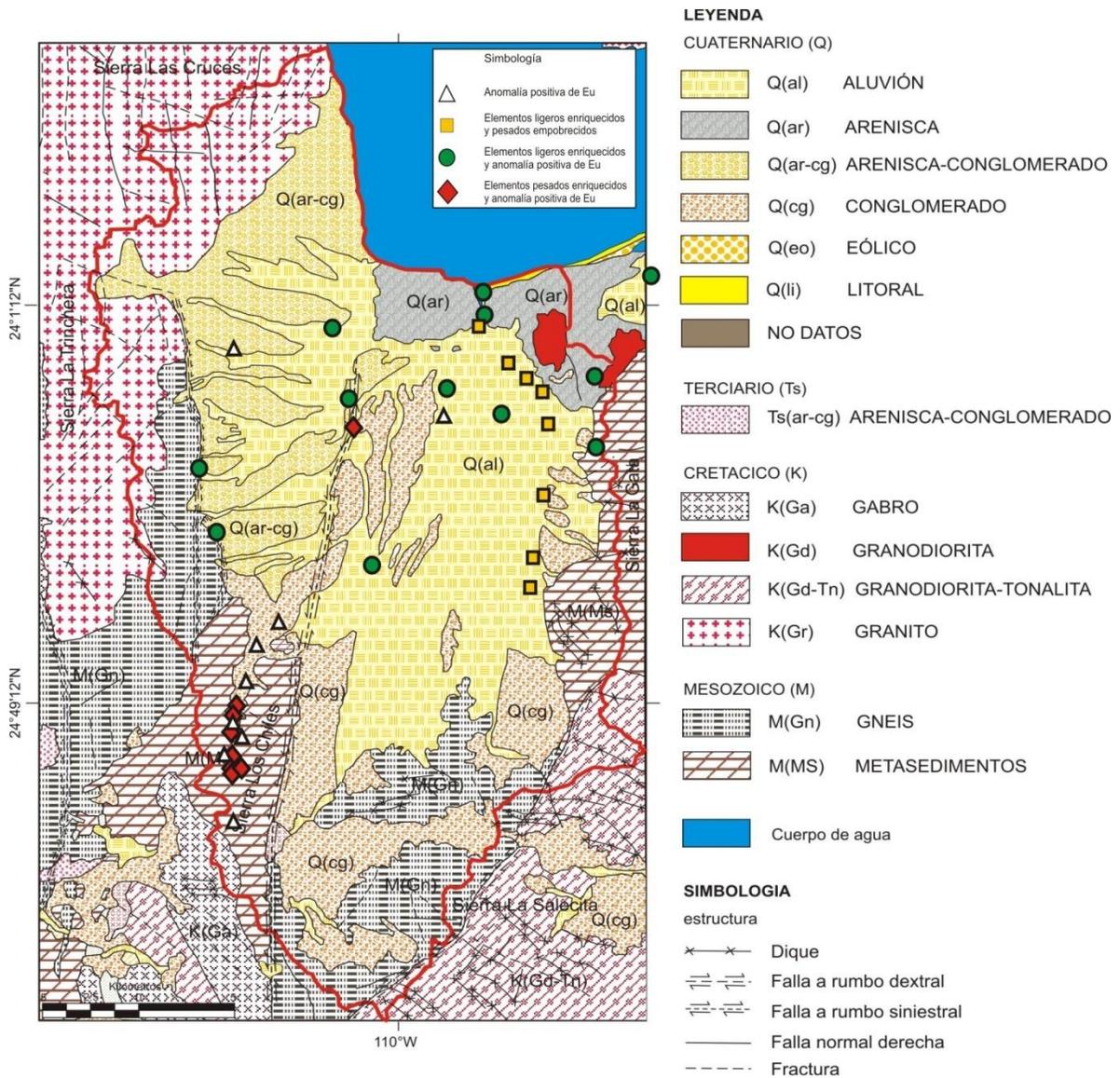
**Figura 37.** Patrones de las características de los ETR normalizados en algunas muestras de sedimentos de arroyos y plataforma continental, a) ETR con anomalía positiva de Eu, b) enriquecimiento de ETR ligeros, c) ETR ligeros enriquecidos y pesados empobrecidos y d) ETR pesados enriquecidos con anomalía positiva de Eu.

(i) *ETR con anomalía positiva de Eu* (Figura 37a): Las estaciones que presentaron este patrón se encuentran localizadas en arroyos de las partes altas de la cuenca (A1, A11, A14, A15, A16, A23, A44 y A57), desechos de minería (C1, C2 y T1) (Figura 38) y en la plataforma continental de la bahía (PI1, PI2, PI3, PI9, PI10, PI11, PI12, PI14, PI15, PI23, PI28 y PI31) (Figura 39).

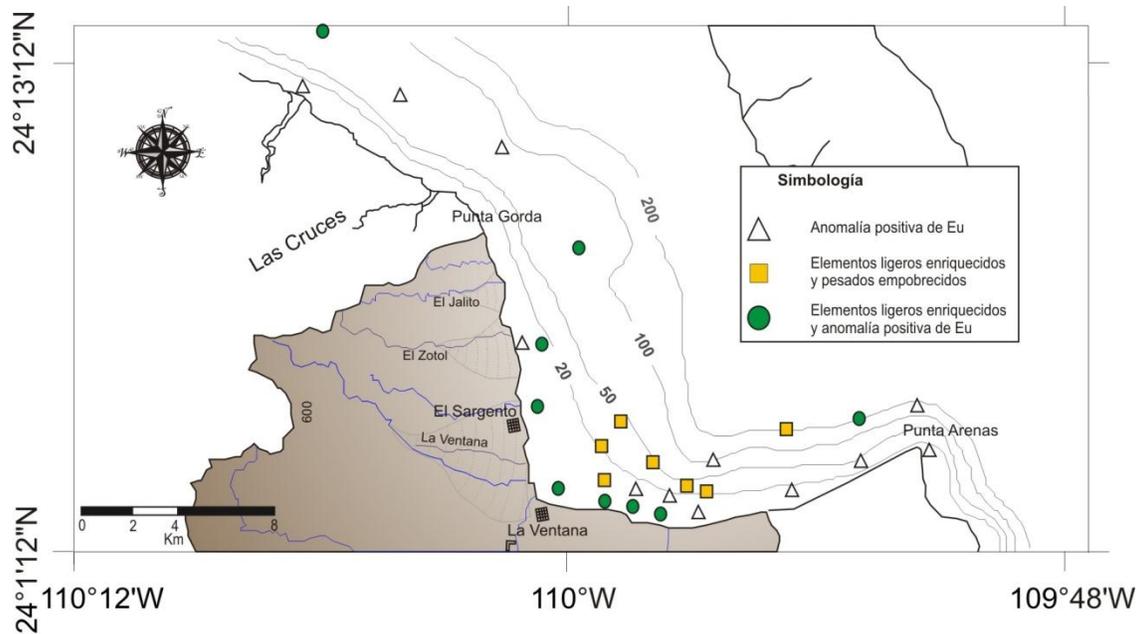
(ii) *Enriquecimiento de elementos ligeros y empobrecimiento de elementos pesados* (Figura 37c): Este patrón lo observamos en la mayoría de los arroyos del lado este de la cuenca (A19, A21, A29, A50, A52 y A55) y en La Bocana (A59) (Figura 38), en los sedimentos de la plataforma continental (PI16, PI18, PI20, PI25, PI26, PI27 y PI29) (Figura 39).

(iii) *Enriquecimiento de elementos ligeros con anomalía positiva de Eu* (Figura 37b): En los arroyos del lado este de la Cuenca de San Juan de Los Planes observamos este patrón (A20, A34, A38, A45, A49, A51, A53, A58, A60, A61 y A63) (Figura 38). En los sedimentos de la plataforma continental encontramos estas características en la porción centro-sur muy cerca de la línea de costa y en la parte norte alejado de la costa, esto probablemente se deba a la circulación por corrientes (PI5, PI6, PI7, PI8, PI13, PI17, PI22 y PI24) (Figura 39).

(iv) *Enriquecimiento de elementos pesados con anomalía positiva de Eu* (Figura 37d): Este patrón se encontró en desechos de minería y fundición (J1 y T3), y en arroyos (A4, A5, A8, A12, A13 y A41) (Figura 38). Este patrón no se encontró en sedimentos de la plataforma continental.



**Figura 38.** Distribución espacial de los patrones de las concentraciones de los ETR normalizados con Lutita norteamericana de los sedimentos de desechos de minería y fundición y arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes



**Figura 39.** Batimetría y distribución de los patrones de las concentraciones de los ETR normalizados con Lutita norteamericana de los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana.

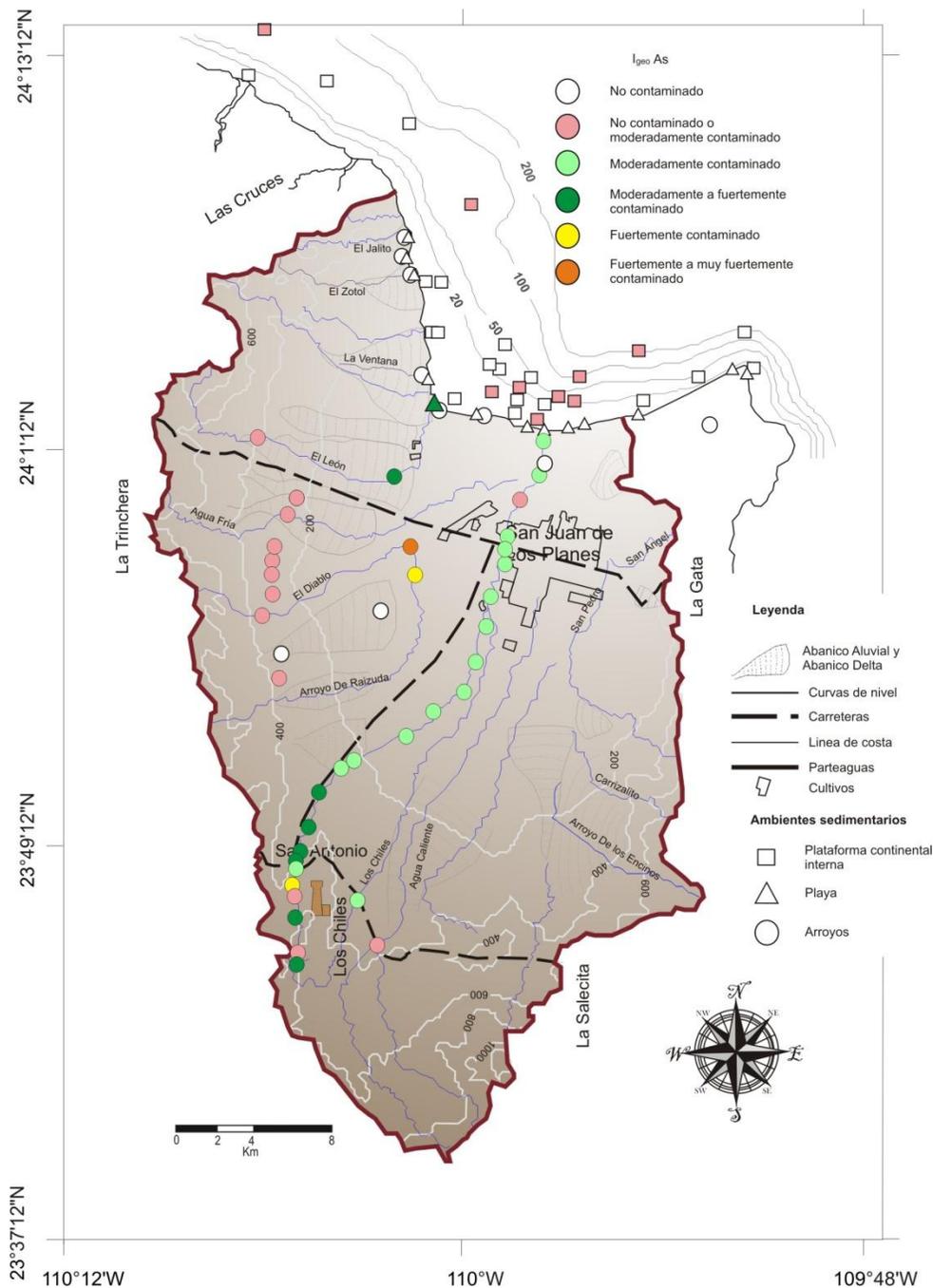
#### 7.4. Índice de geoacumulación de As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn

En esta parte solo se incluyen los resultados de las concentraciones de As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn de los sedimentos de arroyos, sedimentos de playa y sedimentos de la plataforma.

##### Arsénico

En la distribución espacial del  $I_{geo}$  para As (Figura 40) podemos observar que a lo largo del arroyo San Antonio los sedimentos se encuentran moderadamente contaminados en la porción sur, moderadamente a fuertemente contaminados en la parte norte y solamente el sedimento de la estación A6, cercana al área minera está fuertemente contaminada. En las muestras del lado oeste de la Cuenca de San Juan de Los Planes se observó que los arroyos están moderadamente contaminados en las estaciones A23, A35 y A49, fuertemente contaminados en la muestra A43 y las estaciones restantes no presentaron contaminación.

Dentro de Bahía La Ventana en los sedimentos de playa la estación P5, en la parte más interna de la bahía se encuentra moderadamente contaminada. Para los sedimentos de la plataforma continental no se presentó contaminación por arsénico (Figura 40).



**Figura 40.** Distribución espacial del índice de geoacumulación para As en los sedimentos de arroyos, playa y plataforma continental

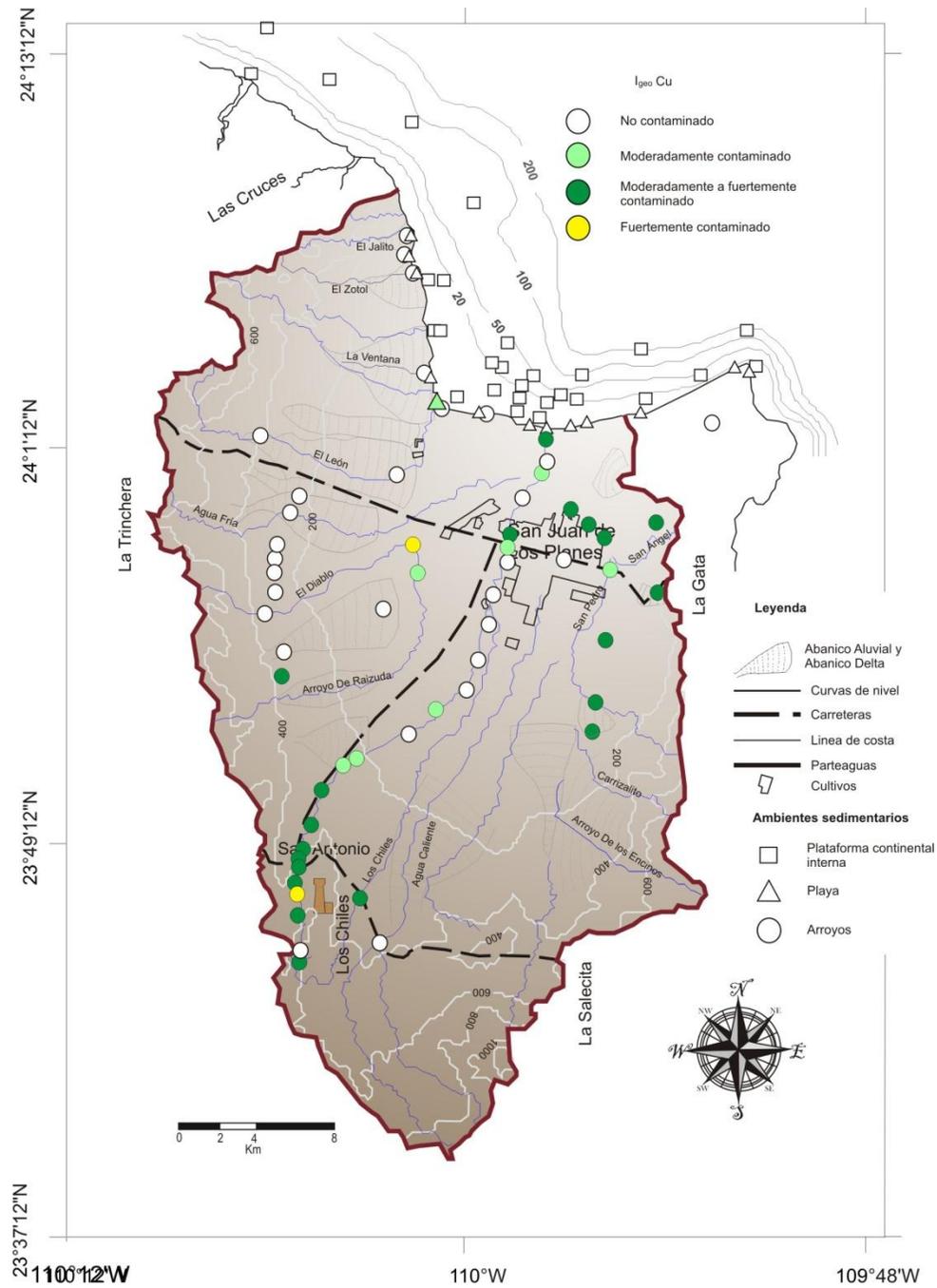
## Cadmio

Los resultados del  $I_{geo}$  para Cd, tanto en los sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes, así como en los sedimentos de playa y plataforma continental de Bahía La Ventana evidencian que no se encuentran contaminados de acuerdo a los del  $I_{geo}$ , con excepción de las muestras A49, T1, J1 con valores entre el rango de no contaminado a moderadamente contaminado.

## Cobre

La distribución espacial del  $I_{geo}$  para Cu (Figura 41), muestra que los sedimentos del arroyo San Antonio y de los arroyos de la parte oriental de la cuenca presentan contaminación moderada, mientras que los sedimentos de la estación A5 de la parte alta del arroyo San Antonio y la A49 del arroyo El Diablo se encuentran fuertemente contaminados.

En los sedimentos de playa y plataforma continental no se encontró contaminación por cobre de acuerdo a este criterio, a excepción de la muestra de playa P5, al suroeste de la bahía en la parte más interna, la cual presenta contaminación moderada.



**Figura 41.** Distribución espacial del índice de geoacumulación para Cu en los sedimentos arroyos, playa y plataforma continental

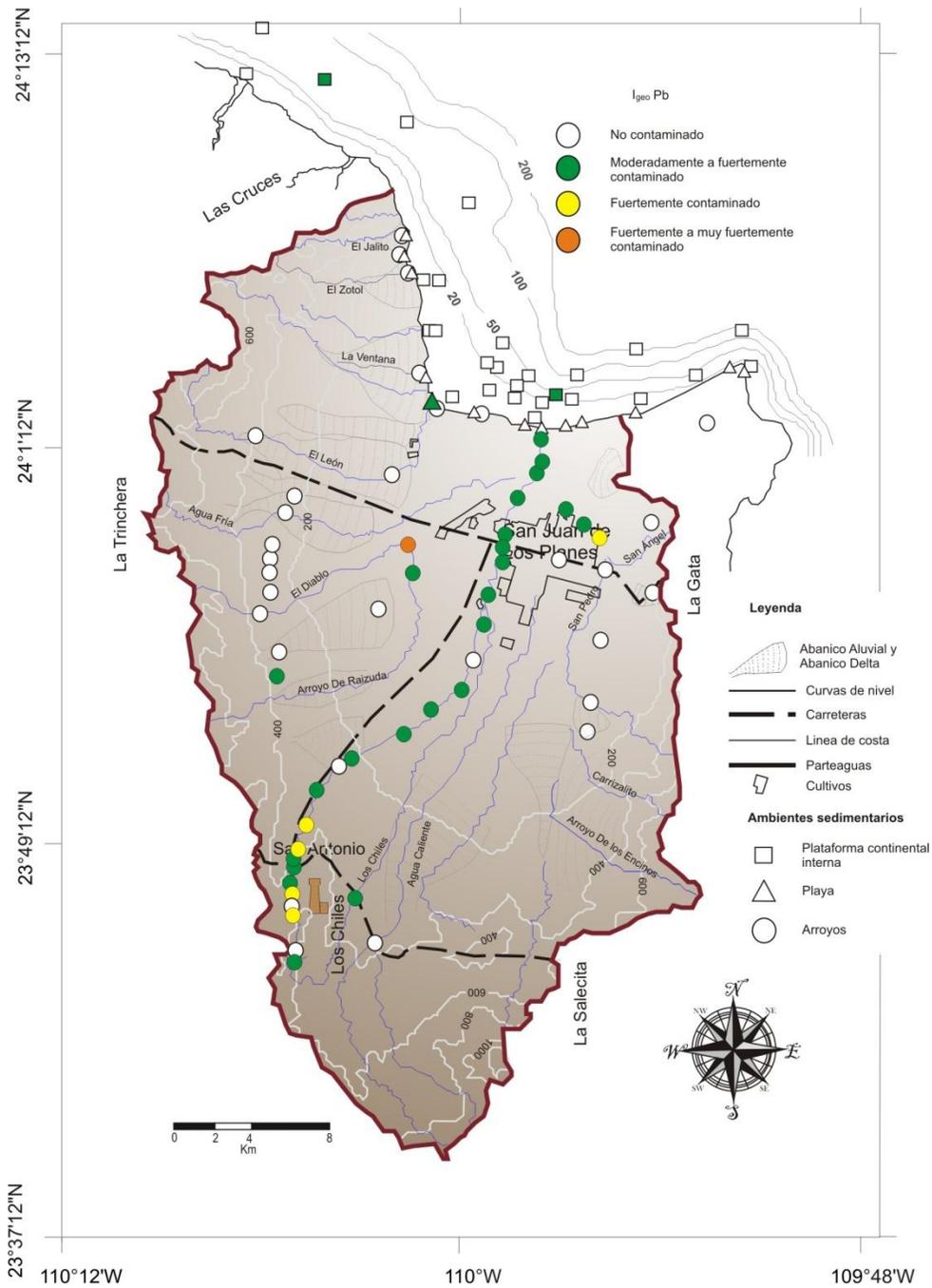
## Mercurio

En general, los sedimentos de arroyo de la Cuenca de San Juan de Los Planes, de playa y de la plataforma continental de Bahía La Ventana no presentan contaminación, solo en la estación P5 de los sedimentos de la playa en la parte más interna de la bahía se encontró contaminación moderada.

## Plomo

La mayoría de los sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes se encuentran, de acuerdo a los valores del  $I_{geo}$  del plomo, moderadamente contaminados (Figura 42). Sin embargo existe fuerte contaminación para los sedimentos del arroyo San Antonio cercanos al área minera (A4 y A6), en el poblado de San Antonio (A12 y A13) y en arroyos del lado este de la cuenca (A50). Del lado oeste de la cuenca, los sedimentos de arroyo El Diablo (A49) presenta fuerte contaminación por Pb.

Los sedimentos de playa y de la plataforma continental de Bahía La Ventana, la mayoría de las muestras no presentan contaminación por plomo. La estación en los sedimentos de playa P5 al suroeste de la bahía y las estaciones en la plataforma continental PI2, en la porción norte fuera de la bahía, y PI20 frente a La Bocana, se encuentran moderadamente contaminadas (Figura 42).

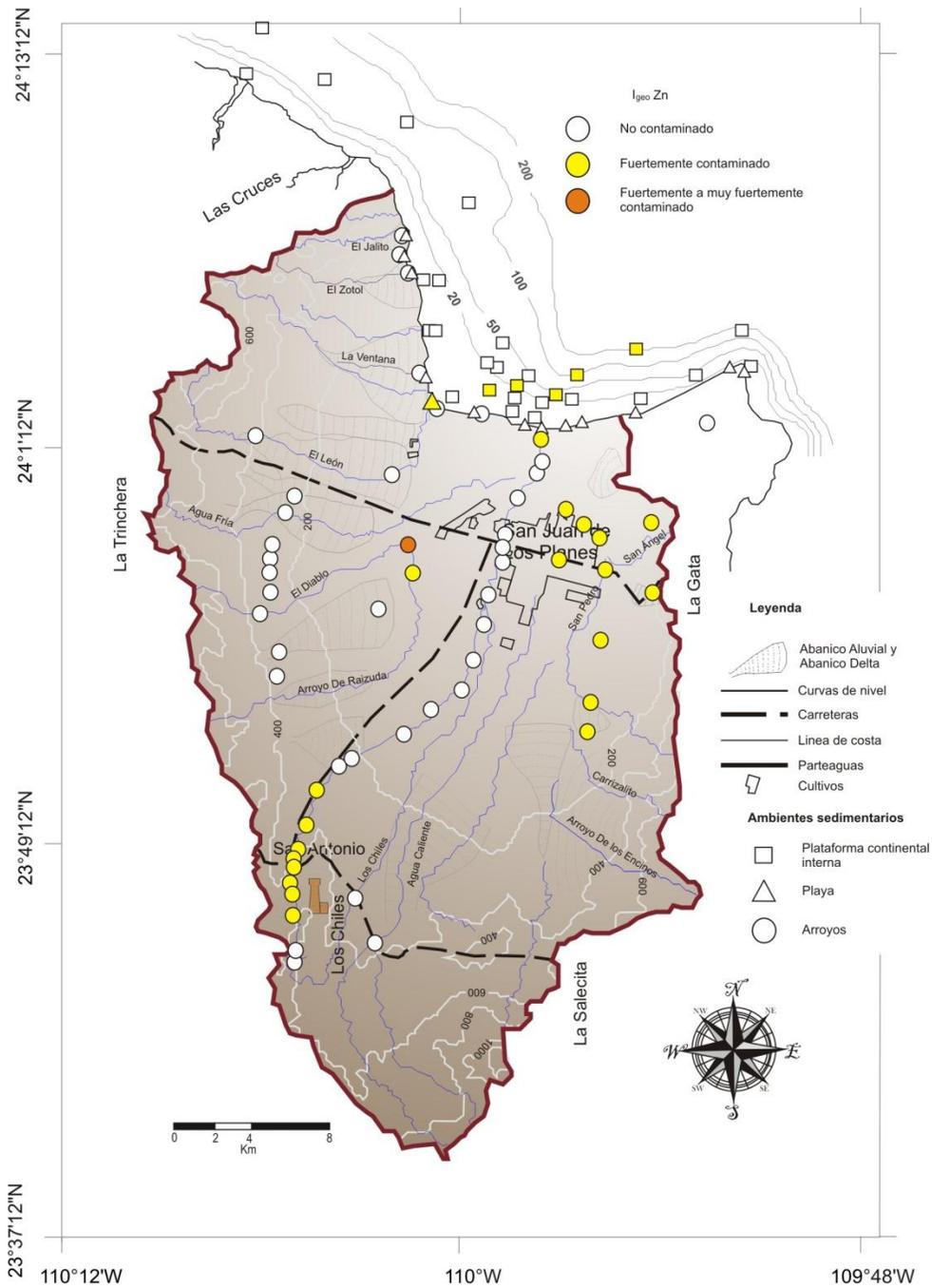


**Figura 42.** Distribución espacial del índice de geoacumulación para Pb en los sedimentos arroyos, playa y plataforma continental

## Zinc

En la Figura 43 se observa que, la mayor parte de los sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes, no presentan contaminación. Los sedimentos del arroyo San Antonio las estaciones cercanas al área minera y al poblado de San Antonio, así como la última estación en la desembocadura se encuentran fuertemente contaminadas. Todas las muestras de las estaciones del lado este de la cuenca presentan fuerte contaminación por Zn, mientras que en los sedimentos de arroyos del lado oeste solamente la muestra A41 en el arroyo De Raizuda se encuentra fuertemente contaminada y la estación A49 en el arroyo El Diablo esta de fuertemente contaminada a muy fuerte contaminada.

Con respecto a los sedimentos de playa, únicamente la estación P5, al igual que en los otros elementos se encuentra fuertemente contaminada por este elemento. Para los sedimentos de la plataforma continental, la mayoría de las estaciones no muestran contaminación por zinc, excepto algunas muestras (PI18, PI20, PI21, PI28 y PI29) en la parte centro-sur de Bahía La Ventana.



**Figura 43.** Distribución espacial del índice de geoacumulación para Zn en los sedimentos de arroyos, playa y plataforma continental

## 7.5. Factores de enriquecimiento de los componentes mayoritarios y elementos traza

Para eliminar los efectos del tamaño de grano, mineralogía y dilución por componentes inertes tales como carbonatos de calcio, cuarzo y sílice se calcularon los factores de enriquecimiento (FE) de los elementos (Rubio *et al.*, 2000; Loring, 1991; Salomons y Förstner, 1984). Los constituyentes que más han sido utilizados son Al, C<sub>org</sub>, Co, Fe, Li, Ni, Ti, Sc (Rubio *et al.*, 2001; Balls *et al.*, 1997; Covelli y Fontolan, 1997; Finney y Huh, 1989; Ryan y Windom, 1988; Sinex y Wright, 1988), entre otros. En este estudio se realizó una búsqueda para encontrar el mejor normalizador. Los resultados en forma integrada se presentan en el Apéndice 1 Tablas 24 y 25. Se observó, que para los sedimentos de arroyos los mejores normalizadores son el Co, Mn y Sc, y para los sedimentos de la plataforma fueron el Co, Th y Ti. Para una mejor comparación de los resultados sobre los FE de los ET en los diferentes ambientes, se decidió usar al Co como.

Los valores de los FE en los diferentes materiales sedimentarios se presentan en forma general (rangos, promedio, desviación estándar) en la Tabla 5. Los valores promedio de los FE en forma logarítmica se muestran en el Apéndice 2 Figura 63 y en las Figuras de la 44 a la 51. Se puede observar en esta figura un amplio rango de valores promedio de los FE para los diferentes elementos obtenidos en este trabajo desde extremadamente enriquecidos hasta empobrecidos, dependiendo del elemento y del tipo de material sedimentario. Para desechos de minería y fundición los elementos extremadamente enriquecidos (FE >100) son As y Ba, mientras que Cd, Pb, S y Se presentan enriquecimiento muy alto ( $20 < FE \leq 100$ ) y solamente el Cu muestra enriquecimiento moderado ( $2 < FE \leq 5$ ) (Tabla 6). Para los sedimentos de arroyos solamente el As presenta enriquecimiento muy alto, el Cd y Sb muestran enriquecimiento significativo ( $5 < FE \leq 20$ ) y Al, Ba y Cr mostraron enriquecimiento moderado (Tabla 6). Finalmente, en los sedimentos de la plataforma existen mayor número de elementos que están enriquecidos, comparados con los materiales antes mencionados. Así, entre los elementos de los sedimentos de la plataforma continental con alto grado de

enriquecimiento se encuentran Ba, Ca, Cd, Mg, Na, Sb, Sc, Se y Sr, con enriquecimiento significativo son As, K, Li, Pb y S, y con enriquecimiento moderado se encuentran el Be, Ce, Cr, Cs, Cu, Dy, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Ni, P, Pr, Rb, Sm, Tb, U, V, Y, Yb y Zn (Tabla 5).

De los tres ambientes se observa que sobresalen, por sus altos valores de FE el As, Cd y Sb. La distribución espacial de los factores mencionados anteriormente se presenta de forma individual en las Figuras 44 a 51 y en el Apéndice 2 Figura 63.

Podemos ver las tres secuencias de acuerdo a los FE en forma logarítmica de los diferentes ambientes de depositación:

(i). As (2478) > Sb (214) > Cd (47) > Pb (31) > Se (19) > S (15) > Cu (5) para los desechos de minería y fundición en San Antonio

(ii) As (85) > Sb (8) > Cd (5) > Ba (4) > Pb (3) > Al (3) > Cr (2) para sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

(iii) Cd (73) > Se (55) > Mg (53) > Sr (34) > Sb (29) > Ca (29) > Ba (15) > Na (13) > S (10) > Pb (9) > As (8) > Li (6) > K (5) para sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

De los elementos que más destacaron y que en orden de importancia son As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb, Zn, se presenta a continuación su distribución espacial dentro de los desechos de minería y fundición en San Antonio, sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes y sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana.

**Tabla 5.** Valores de los factores de enriquecimiento (FE) de los componentes mayoritarios y elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

FE	Desechos de minería y fundición	Arroyo	Plataforma continental
Al	0.06 – 0.4	0.1 – 14	0.2 – 1.6
	$0.3 \pm 0.1$	$2.6 \pm 3.9$	$0.6 \pm 0.4$
As	450 – 6905	1.4 – 770	0.3 – 31
	$2478 \pm 2453$	$85 \pm 146$	$8 \pm 9$
Ba	0.1 – 0.4	0.1 – 25	0.9 – 48
	$0.2 \pm 0.1$	$3.9 \pm 7.3$	$15 \pm 14$
Be	0.03 – 0.1	0.1 – 6.7	0.7 – 12
	$0.9 \pm 0.4$	$1.2 \pm 1.8$	$5 \pm 3.5$
Ca	0.09 – 6.3	0.4 – 7.4	2.4 – 92
	$1.3 \pm 2.4$	$1.7 \pm 1.9$	$29 \pm 23$
Cd	0.08 – 182	0.9 – 14	4.5 – 578
	$47 \pm 67$	$5.4 \pm 4.1$	$73 \pm 122$
Ce	0.03 – 0.3	0.1 – 2	0.8 – 9.5
	$0.1 \pm 0.1$	$0.7 \pm 0.5$	$2 \pm 1.6$
Cr	0.2 – 2.8	1.3 – 5	1.9 – 9.5
	$1.4 \pm 1$	$2.3 \pm 0.8$	$4.3 \pm 2.2$
Cs	0.1 – 0.3	0.05 – 2.4	1 – 4
	$0.2 \pm 0.1$	$0.79 \pm 0.6$	$2 \pm 0.9$
Cu	0.6 – 16	0.5 – 7.3	0.7 – 30
	$4.7 \pm 5.8$	$1.5 \pm 1.1$	$2.9 \pm 5.5$
Dy	0.1 – 0.6	0.3 – 3	1.3 – 9
	$0.4 \pm 0.2$	$1.2 \pm 0.6$	$3 \pm 2$
Eu	0.1 – 0.6	0.3 – 5	1 – 13
	$0.4 \pm 0.2$	$1.5 \pm 1.2$	$4.4 \pm 3$
Fe	0.3 – 2.6	0.9 – 3	1.2 – 3
	$0.9 \pm 0.8$	$1.3 \pm 0.4$	$1.7 \pm 0.4$
Gd	0.1 – 0.7	0.4 – 5	1.6 – 13
	$0.4 \pm 0.2$	$1.6 \pm 0.9$	$4 \pm 2.5$
Hf	0.02 – 0.02	0.02 – 0.2	0.03 – 0.5
	$0.01 \pm 0.01$	$0.08 \pm 0.06$	$0.2 \pm 0.1$
Hg	0.8*	0.003 – 8	0.02 – 9.7
		$1 \pm 2.26$	$1.2 \pm 2.2$
Ho	0.1 – 0.5	0.3 – 3	1 – 9
	$0.4 \pm 0.2$	$1 – 0.5$	$2.9 – 1.7$
K	0.06 – 0.2	0.04 – 8.3	0.6 – 14
	$0.1 \pm 0.05$	$1.5 \pm 2.3$	$5.4 \pm 4$
La	0.002 – 0.3	0.1 – 2	0.8 – 10
	$0.1 \pm 0.1$	$0.7 \pm 0.5$	$2.2 \pm 1.7$

\* Valor único

**Tabla 5 continuación.** Valores de los factores de enriquecimiento (FE) de los componentes mayoritarios y elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

FE	Desechos de minería y fundición	Arroyo	Plataforma continental
Li	$\frac{0.06 - 0.5}{0.2 \pm 0.2}$	$\frac{0.1 - 6.6}{1.3 \pm 1.4}$	$\frac{1.8 - 12}{5.6 \pm 3}$
Lu	$\frac{0.04 - 0.5}{0.3 \pm 0.2}$	$\frac{0.3 - 5}{1.2 \pm 1.3}$	$\frac{0.7 - 11}{4 \pm 3}$
Mg	$\frac{0.07 - 1.2}{0.5 \pm 0.4}$	$\frac{0.6 - 2.4}{1 \pm 0.3}$	$\frac{5.6 - 157}{53 \pm 43}$
Mn	$\frac{0.09 - 0.7}{0.4 \pm 0.2}$	$\frac{0.9 - 2}{1.2 \pm 0.3}$	$\frac{0.8 - 2.5}{1.3 \pm 0.4}$
Mo	$\frac{0.17 - 0.8}{0.4 \pm 0.2}$	$\frac{0.03 - 3.5}{0.4 \pm 0.7}$	$\frac{0.3 - 6.5}{1.7 \pm 1.6}$
Na	$\frac{0.1 - 0.2}{0.2 \pm 0.1}$	$\frac{0.1 - 15}{2.8 \pm 4.5}$	$\frac{1.2 - 34}{13 \pm 10}$
Nd	$\frac{0.05 - 0.3}{0.2 \pm 0.1}$	$\frac{0.2 - 3}{0.9 \pm 0.6}$	$\frac{0.9 - 10}{2.5 \pm 1.8}$
Ni	$\frac{0.1 - 0.8}{0.6 \pm 0.3}$	$\frac{0.6 - 1.5}{0.9 \pm 0.2}$	$\frac{0.9 - 5}{2 \pm 1}$
P	$\frac{0.1 - 0.8}{0.4 \pm 0.2}$	$\frac{0.5 - 2.6}{1 - 0.5}$	$\frac{1 - 11}{3.9 \pm 2.2}$
Pb	$\frac{0.2 - 132}{31 \pm 51}$	$\frac{0.2 - 9.6}{2.9 \pm 2.7}$	$\frac{1.3 - 28}{8.4 \pm 6.5}$
Pr	$\frac{0.1 - 0.4}{0.2 \pm 0.1}$	$\frac{0.2 - 3}{1 \pm 0.7}$	$\frac{1 - 13}{3 \pm 2.3}$
Rb	$\frac{0.1 - 0.4}{0.2 \pm 0.1}$	$\frac{0.01 - 7}{1.4 \pm 1.8}$	$\frac{1 - 12}{5 \pm 3}$
S	$\frac{0.03 - 86}{15 \pm 35}$	$\frac{0.1 - 27}{1.5 \pm 4.8}$	$\frac{1 - 32}{10 \pm 7}$
Sb	$\frac{1.6 - 1107}{214 \pm 440}$	$\frac{0.2 - 33}{7.3 \pm 9.3}$	$\frac{2.5 - 75}{29 \pm 23}$
Sc	$\frac{0.2 - 2}{1 \pm 0.5}$	$\frac{1 - 3}{2.2 \pm 0.5}$	$\frac{1.5 - 5.5}{2.8 \pm 0.9}$
Se	$\frac{0.4 - 60}{19 \pm 23}$	$\frac{1 - 16}{4.8 \pm 4.7}$	$\frac{14 - 175}{55 \pm 38}$
Sm	$\frac{0.1 - 0.4}{0.3 \pm 0.1}$	$\frac{0.2 - 3}{1 \pm 0.6}$	$\frac{1 - 10}{3 \pm 2}$
Sr	$\frac{0.1 - 0.7}{0.4 \pm 0.2}$	$\frac{0.3 - 31}{4.8 \pm 9}$	$\frac{3 - 92}{34 \pm 26}$
Ta	$\frac{0.01 - 0.09}{0.04 \pm 0.03}$	$\frac{0.03 - 2}{0.3 \pm 0.4}$	$\frac{0.2 - 3.9}{1.2 \pm 1}$
Tb	$\frac{0.1 - 0.6}{0.3 \pm 0.2}$	$\frac{0.3 - 3}{1.2 \pm 0.6}$	$\frac{1.3 - 12}{3 \pm 2}$

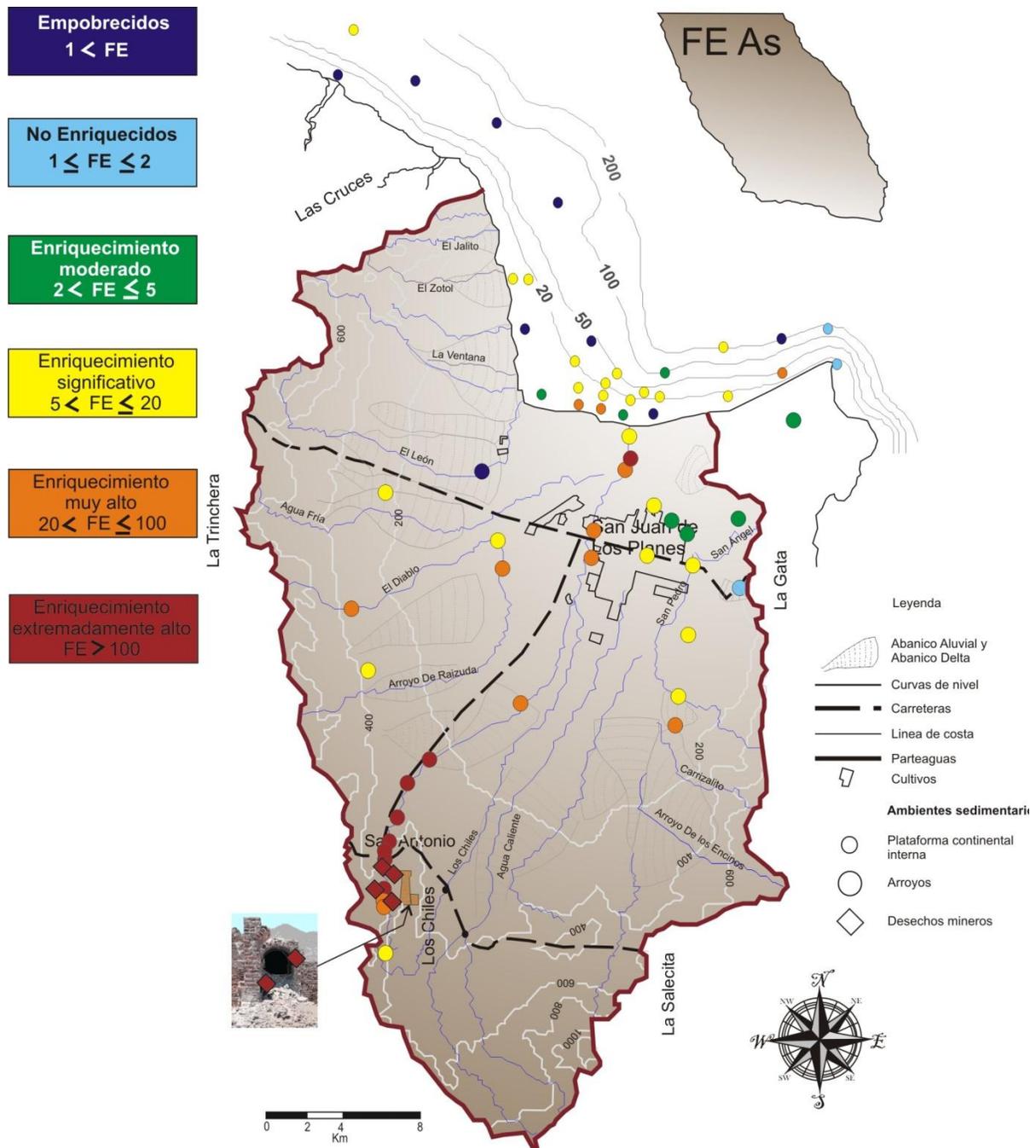
**Tabla 5 continuación.** Valores de los factores de enriquecimiento (FE) de los componentes mayoritarios y elementos traza en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, arroyos y plataforma continental

<b>FE</b>	<b>Desechos de minería y fundición</b>	<b>Arroyo</b>	<b>Plataforma continental</b>
<b>Th</b>	$0.03 - 0.2$	$0.1 - 1.9$	$0.5 - 3.9$
	$0.09 \pm 0.07$	$0.7 \pm 0.5$	$1.5 \pm 0.9$
<b>Ti</b>	0	$0.2 - 2.4$	$1 - 5.3$
		$0.9 \pm 0.6$	$2 \pm 0.8$
<b>U</b>	$0.06 - 0.2$	$0.05 - 17$	$0.7 - 7.4$
	$0.1 \pm 0.05$	$1.2 \pm 3$	$3.4 \pm 1.9$
<b>V</b>	$0.3 - 2.2$	$0.8 - 7$	$0.4 - 4.4$
	$1.2 \pm 0.7$	$2 \pm 1.5$	$2 \pm 1$
<b>Y</b>	$0.1 - 0.5$	$0.2 - 3$	$1 - 7$
	$0.3 \pm 0.1$	$0.8 \pm 0.5$	$2.5 \pm 1.3$
<b>Yb</b>	$0.1 - 0.5$	$0.4 - 3$	$1 - 8$
	$0.3 \pm 0.2$	$1 \pm 0.5$	$3 \pm 1.5$
<b>Zn</b>	$0.2 - 4.5$	$0.6 - 7.6$	$2 - 7$
	$1.8 \pm 1.4$	$1.7 \pm 1.3$	$3 \pm 1$
<b>Zr</b>	$0.03 - 4$	$0.03 - 0.3$	$0.1 - 0.7$
	$1 \pm 1.5$	$0.09 \pm 0.07$	$0.3 \pm 0.2$

## Arsénico

El material sedimentario de desechos de minería y fundición se encuentra altamente enriquecido con As (Figura 44). De este mismo elemento sobre el arroyo San Antonio, los sedimentos muestreados antes del área de fundición presentan enriquecimiento significativo (A1) y enriquecimiento muy alto (A4 y A5) hasta aumentar a un enriquecimiento extremadamente alto muy cerca del área de fundición hasta la estación A16 aproximadamente 15 km aguas abajo a partir de A1. Este enriquecimiento extremadamente alto se observa nuevamente hasta la estación A60 en La Bocana. En la porción central del mismo arroyo, las estaciones A20, A44, A51 y A59 tienen un enriquecimiento muy alto. Cabe mencionar que la última estación del arroyo A61 ubicada en la desembocadura presenta enriquecimiento significativo, lo que probablemente se deba a que el arsénico se está quedando en parte dentro de La Bocana. Para los arroyos de las partes este y oeste de la cuenca tienen principalmente enriquecimiento significativo; sedimentos con enriquecimiento muy alto se localizan en los arroyos El Diablo (parte alta, A34) y De Raizuda (parte baja, A41); sedimentos con enriquecimiento moderado se localizan en el arroyo San Ángel, en su parte alta (A53) y parte baja (A50 y A52) y en la planicie de inundación (A63) al sur de Puta Arenas; sedimento no enriquecido se localiza en la estación A38, próximo al parteaguas oriental de la cuenca; y sedimento empobrecido se encontró en las partes bajas del arroyo El León (A58).

Los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana en general tienen un enriquecimiento significativo, aunque se encontró sedimento con enriquecimiento muy alto en la zona próxima a la línea de costa en la porción de la plataforma centro-sur (PI7 y PI13) y oriental (PI11), sedimento con enriquecimiento moderado se encontró en la porción centro-sur de la bahía (PI6, PI8 y PI28), y el sedimento al norte y frente a Punta Arenas se encuentran empobrecidos y no enriquecidos.

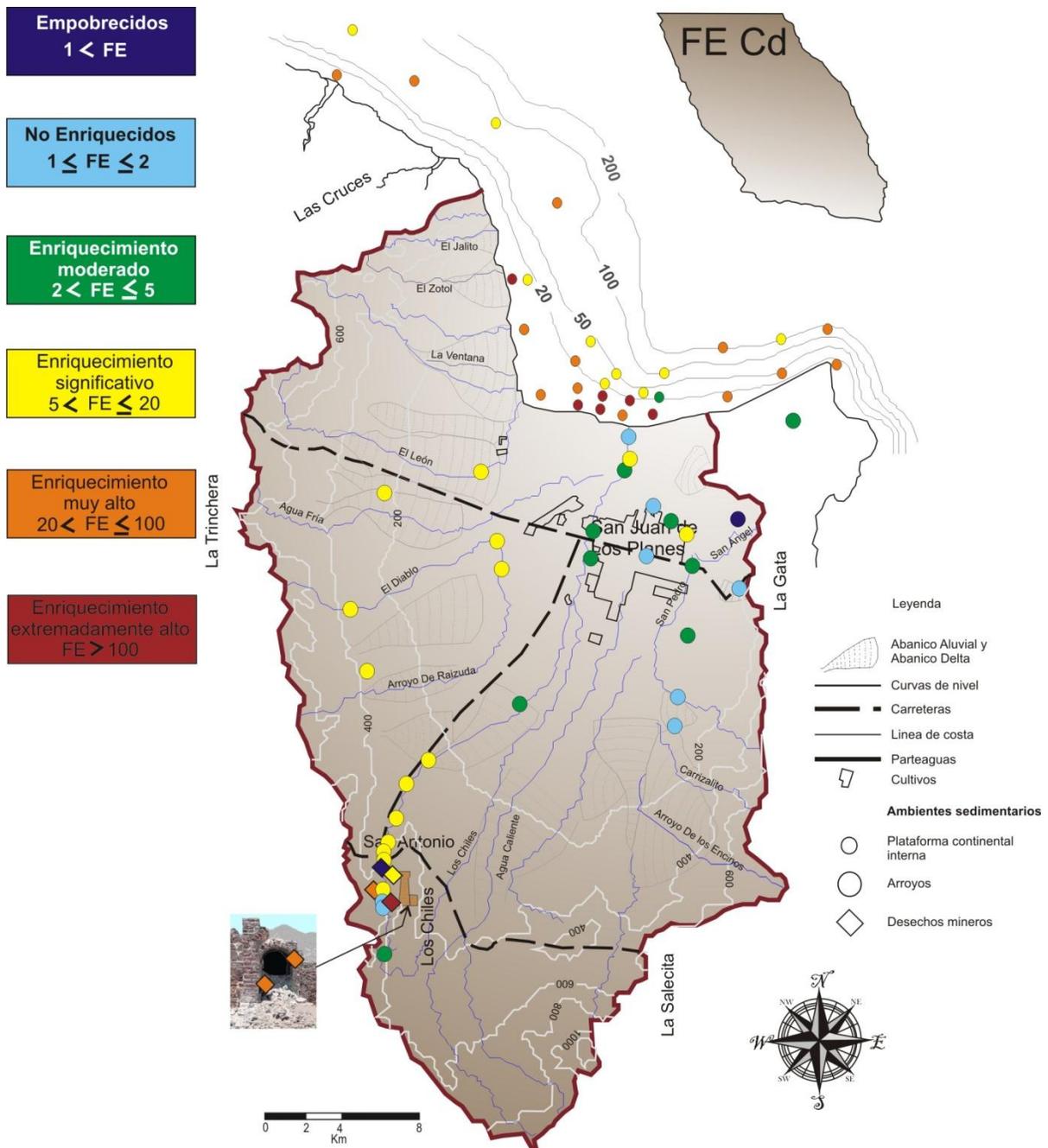


**Figura 44.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de As en los desechos de minería y fundición, en los sedimentos de los arroyo y plataforma continental

## Cadmio

La distribución espacial del FE de Cd se muestra en la Figura 45, en la cual podemos observar que los sedimentos de los desechos de minería y fundición tienen enriquecimiento extremadamente alto (J1), enriquecimiento muy alto (C1, C2 y T2), enriquecimiento significativo (T1) y empobrecimiento (T3). Los sedimentos de arroyos en general presentan enriquecimiento significativo, presente en la parte alta del arroyo San Antonio y en los arroyos de la parte oeste de la cuenca, otros dos sitios con estos sedimentos se encontraron en La Bocana y en la planicie del arroyo San Ángel. Sedimentos con enriquecimiento moderado se observan en la parte baja del arroyo San Antonio y en tres muestras de la parte baja de la porción oriental de la cuenca. Sedimentos no enriquecidos dominan la parte oriental de la cuenca y solo una muestra (A53) de la parte oriental norte de la cuenca tiene sedimento empobrecido.

Lo contrario a los niveles bajos de enriquecimiento del material sedimentario de la cuenca, la plataforma continental presenta sedimentos con muy alto enriquecimiento en las estaciones cercanas a la costa, de la parte centro-sur de la bahía (frente a La Bocana) y en la muestra frente a la descarga del arroyo El Zotol. Sedimentos con enriquecimiento muy alto es común en toda la plataforma continental de la bahía así como enriquecimiento significativo, aunque este último distribuido en las muestras profundas e intermedias. Únicamente una muestra presentó enriquecimiento moderado la cual está alejado de la costa (PI16), pero próxima a la descarga del arroyo San Antonio.



**Figura 45.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Cd en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental

## Cobre

En las estaciones de los desechos de minería y fundición (Figura 46) se encontró que la estación J1 (jales) presenta enriquecimiento significativo, mientras que C1, C2 (cámara de sublimación) y T1 (terrero) tienen un enriquecimiento moderado, T2 y T3 no están enriquecidos. El material sedimentario de los arroyos no muestra enriquecimiento, solamente en los sedimentos de la estación A14, ubicada aguas abajo del poblado de San Antonio tienen enriquecimiento moderado y los sedimentos de A61 (en La Bocana) muestran enriquecimiento significativo.

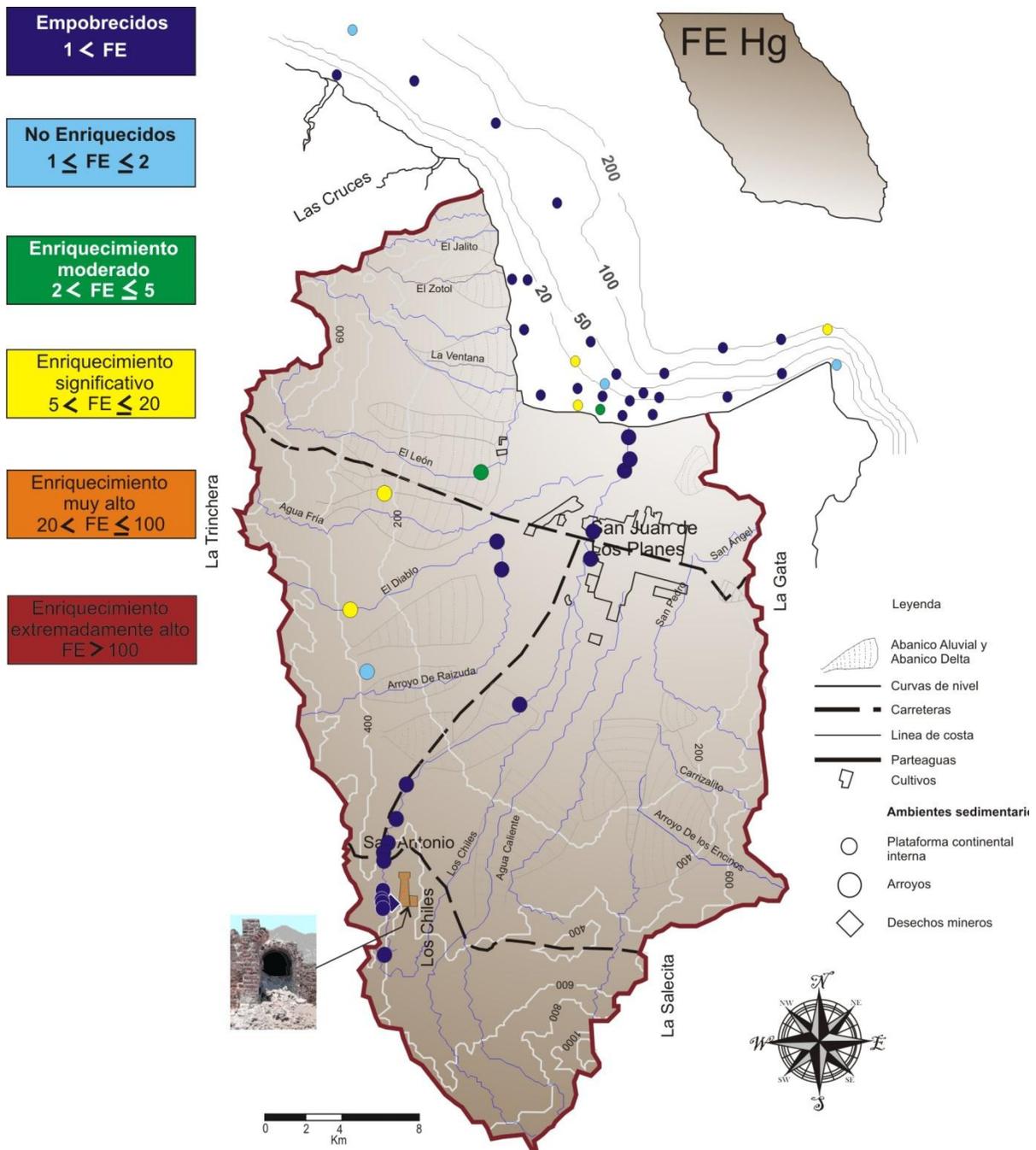
En general los sedimentos en la bahía no están enriquecidos con Cu, excepto en las estaciones PI3, PI7 y PI22 (plataforma norte) y PI17 (centro-sur) se encuentran enriquecidos moderadamente (Figura 46). Las muestras PI23 (norte) y PI13 (centro-sur) tienen enriquecimiento significativo y PI2 (al norte de la bahía) mostró enriquecimiento muy alto.



## Mercurio

El mercurio en los desechos de minería y fundición, y los sedimentos en todo el arroyo San Antonio se encuentran empobrecidos, como se puede observar en la distribución espacial del FE de Hg en la Figura 47. Los arroyos del lado oeste de la cuenca A34 y A57 (arroyos Agua Fría y El Diablo respectivamente), tienen enriquecimiento significativo y sólo A58 (arroyo El León) tiene un enriquecimiento moderado.

Para los sedimentos de la plataforma continental, en la mayor parte de las muestras se encuentran empobrecidos, las únicas estaciones que tienen enriquecimiento moderado es PI7 (plataforma somera centro-sur) y con enriquecimiento significativo de mercurio están los sedimentos de PI13, PI26 (plataforma somera sur) y PI31 (frente Punta Arenas).

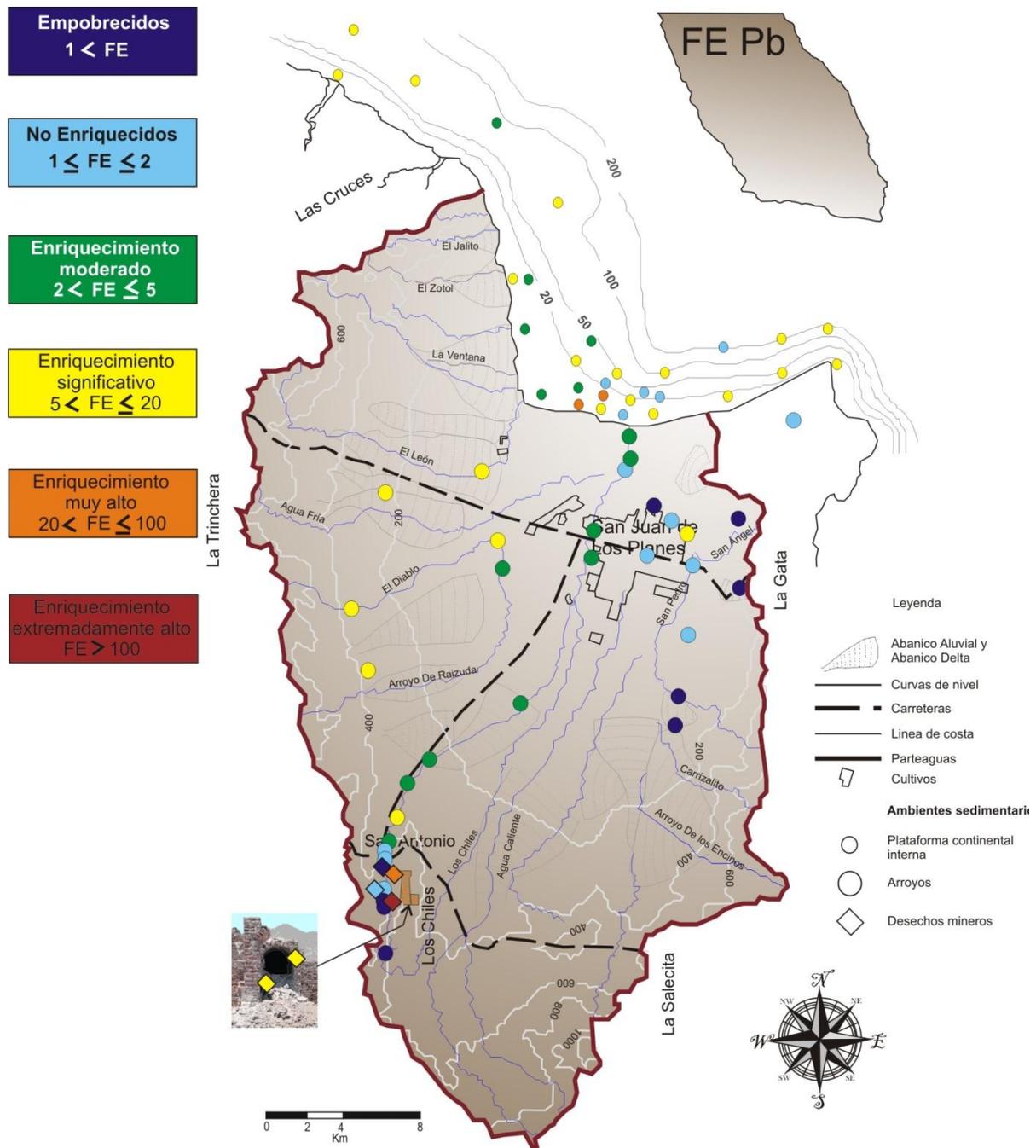


**Figura 47.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Hg en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental

## Plomo

La distribución espacial del FE de Pb, se presenta en la Figura 48. En los desechos de minería y fundición se observa enriquecimientos extremadamente altos (J1), altos (T1), significativos (C1 y C2), no enriquecidos (T2) y empobrecidos (T3). Los sedimentos de arroyos de la cuenca cerca del área de fundición no se encuentran enriquecidos por plomo. Aguas abajo del poblado de San Antonio dentro del arroyo del mismo nombre, la mayoría de las estaciones tienen un enriquecimiento moderado, a excepción de algunas muestras como A59 (próxima a La Bocana) la cual no presentó enriquecimiento y A14 (unos kilómetros aguas abajo en el arroyo) que tiene enriquecimiento significativo. Para los arroyos de la porción oeste de la cuenca se evidencia que en la mayoría de las estaciones existe enriquecimiento significativo y únicamente hay enriquecimiento moderado en A41 (arroyo De Raizuda). Los arroyos del lado este en general no se encuentran enriquecidos o están empobrecidos de plomo, solo A50 (planicie aluvial) tiene enriquecimiento significativo.

En los sedimentos de la plataforma continental la mayor parte tiene enriquecimiento significativo, aunque en la porción centro-sur hay estaciones con enriquecimiento muy alto (PI13 y PI14), con enriquecimiento moderado, muestras de la plataforma continental más interna de la bahía (PI5, PI6, PI18 y PI25) y no enriquecidos, muestras de la plataforma del centro y hacia el este (PI8, PI16, PI20, PI21 y PI29). En la parte norte de la bahía las estaciones PI23 y PI24 tienen enriquecimiento moderado.

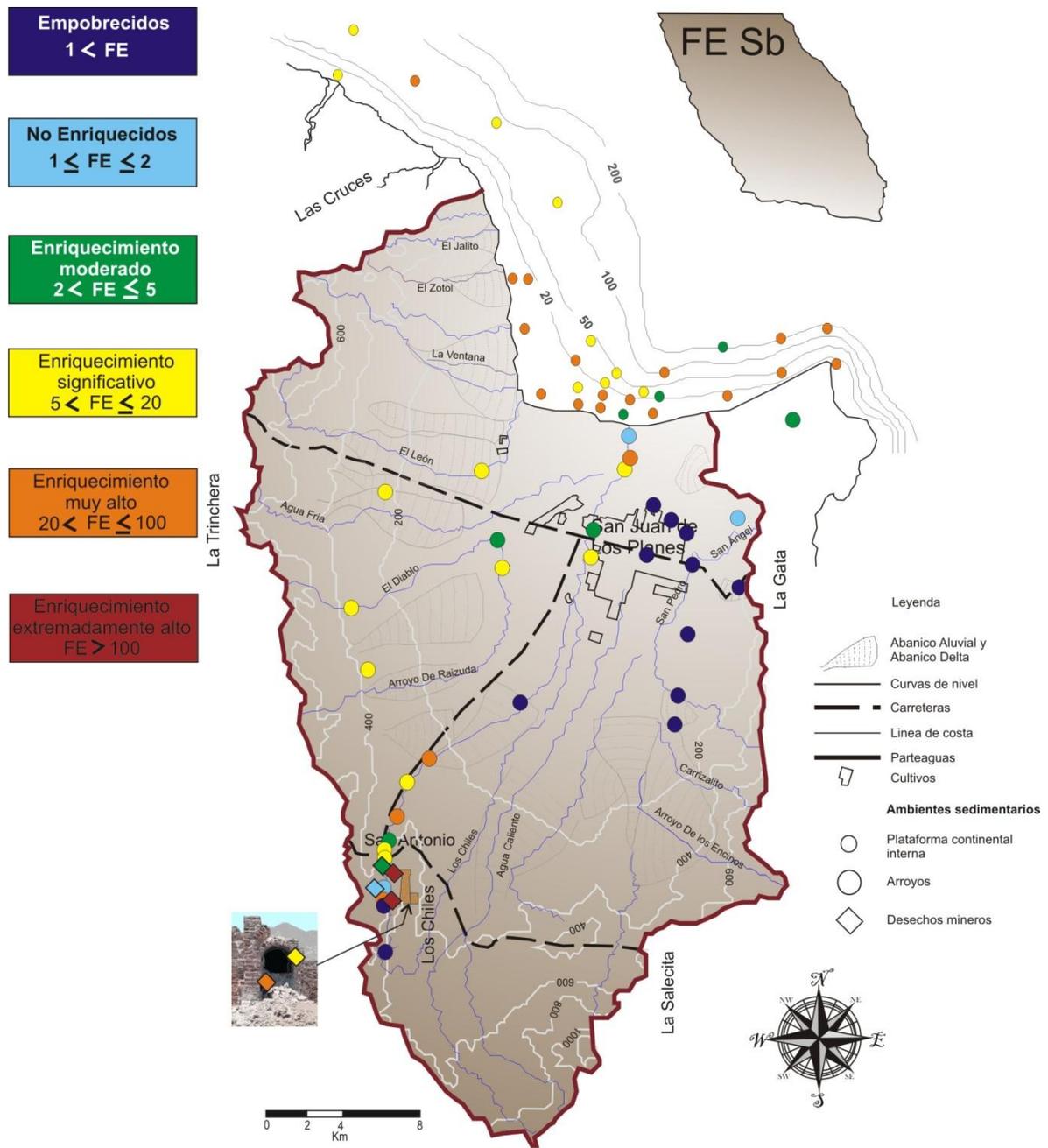


**Figura 48.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Pb en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental

## Antimonio

La distribución espacial del FE de Sb se muestra en la Figura 52, en la cual se puede observar que los sedimentos de los desechos, cercanos a la chimenea de fundición se encuentran con enriquecimiento muy alto. Algunas muestras de arroyo, específicamente del arroyo San Antonio, también presentan enriquecimiento muy alto, y tales muestras se encuentran alejadas unas de otras. Los arroyos del lado oeste de la cuenca se encuentran con enriquecimiento significativo, mientras que los arroyos del lado este se encuentran empobrecidos.

En los sedimentos de la plataforma continental, la mayor parte tiene enriquecimiento muy alto, aunque en la porción centro-sur hay estaciones muy agrupadas con enriquecimiento significativo, al igual que en la plataforma norte. Sedimentos con enriquecimiento moderado, se localiza desde la parte más cercana a la línea de costa frente a La Bocana (PI8), plataforma somera hacia el este de La Bocana (PI16) y plataforma profunda más al este (PI29).

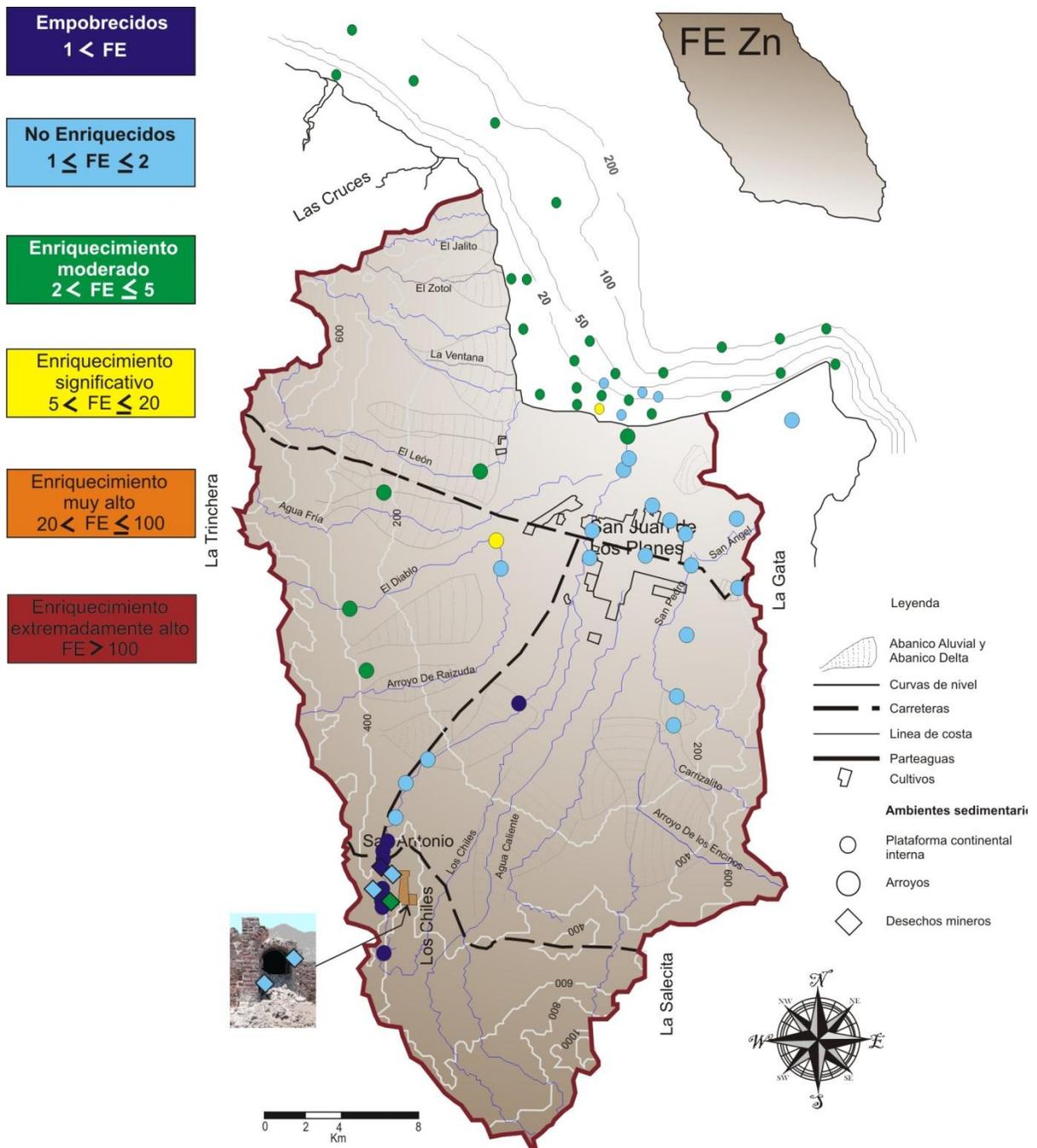


**Figura 49.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Sb en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental

## Zinc

La distribución espacial del FE de Zn (Figura 50) en los sedimentos de los desechos de minería y fundición no se encuentran enriquecidos, solo J1 tiene enriquecimiento moderado. En lo que respecta a los sedimentos de arroyos de La Cuenca de San Juan de Los Planes en general no están enriquecidos, los arroyos del lado oeste tienen enriquecimiento moderado, excepto A49 que tiene enriquecimiento significativo. El sedimento de La Bocana tiene enriquecimiento moderado.

Para los sedimentos en Bahía La Ventana en general se encuentran enriquecidos moderadamente, sólo se presentaron algunos casos en donde no se encontró enriquecimiento, frente a La Bocana (PI8, PI16, PI20 y PI21) y únicamente la muestra cercana a la costa (PI17) presenta enriquecimiento significativo.



**Figura 50.** Distribución espacial del factor de enriquecimiento de Zn en los desechos de minería y fundición, sedimentos de los arroyo y plataforma continental

## 7.6. Asociaciones de los componentes, elementos mayoritarios y traza de los sedimentos

Las asociaciones de los componentes mayoritarios y elementos traza del área de estudio se determinaron por medio del análisis de componentes principales (ACP) aplicados a la matriz de datos de las concentraciones de los elementos. A continuación se presentan los resultados de este análisis.

### 7.6.1. Desechos de minería y fundición y sedimentos de arroyos

Los resultados del ACP de los elementos en desechos de minería y fundición, y sedimentos de arroyos se presentan en la Tabla 6, en la cual se observa los valores de los cinco factores que controlan el 84.1% de la varianza de los datos. F1 (36 %), F2 (18 %), F3 (9 %), F4 (9 %) y F5 (12 %).

**Tabla 6.** Análisis de componentes principales y su variabilidad a partir de las concentraciones de los elementos en los desechos de minería y fundición y sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

<b>Variable</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>	<b>Factor 4</b>	<b>Factor 5</b>
<b>Al</b>	0.391	-0.300	0.207	-0.692	-0.070
<b>As</b>	-0.033	0.764	-0.131	0.511	-0.174
<b>Ba</b>	-0.421	-0.096	0.467	-0.576	-0.147
<b>Be</b>	-0.068	-0.539	0.469	-0.267	0.506
<b>Ca</b>	0.040	0.089	0.137	0.717	-0.222
<b>Cd</b>	0.012	0.918	-0.225	0.090	0.028
<b>Ce</b>	0.568	0.034	0.144	-0.050	0.774
<b>Co</b>	0.362	0.701	0.417	0.204	-0.103
<b>Cr</b>	0.547	0.153	-0.153	0.580	0.252
<b>Cs</b>	0.545	-0.006	0.650	0.159	0.157
<b>Cu</b>	0.094	0.936	-0.190	0.095	-0.004
<b>Dy</b>	0.921	0.064	0.077	0.003	0.363
<b>Er</b>	0.950	0.065	0.062	-0.001	0.254
<b>Eu</b>	0.884	0.138	0.016	-0.064	0.341
<b>Fe</b>	0.655	0.433	-0.139	0.236	-0.036
<b>Gd</b>	0.844	0.083	0.075	-0.014	0.499
<b>Hf</b>	0.759	-0.274	0.146	-0.103	0.150
<b>Ho</b>	0.941	0.096	0.063	0.006	0.281
<b>K</b>	-0.245	-0.193	0.674	-0.488	0.316
<b>La</b>	0.482	-0.012	0.177	-0.120	0.813
<b>Li</b>	0.411	-0.271	0.499	0.216	0.358
<b>Lu</b>	0.900	0.135	0.010	-0.079	0.268
<b>Mg</b>	0.901	0.027	-0.088	0.175	-0.176
<b>Mn</b>	0.842	-0.152	0.074	0.369	0.064
<b>Mo</b>	-0.023	0.896	0.318	0.064	-0.059
<b>Na</b>	0.532	-0.143	0.181	-0.583	0.069
<b>Nd</b>	0.714	0.072	0.116	-0.059	0.656
<b>Ni</b>	0.590	0.032	0.235	0.675	0.121
<b>P</b>	0.950	-0.040	-0.016	0.084	-0.057
<b>Pb</b>	0.000	0.971	-0.006	-0.089	0.096
<b>Pr</b>	0.636	0.051	0.130	-0.063	0.729
<b>Rb</b>	0.302	-0.043	0.794	0.099	0.355
<b>S</b>	0.050	0.652	-0.461	-0.080	0.054
<b>Sb</b>	0.007	0.974	-0.046	-0.085	0.084
<b>Sc</b>	0.864	0.029	-0.053	0.248	-0.002
<b>Se</b>	0.028	0.764	-0.366	0.246	-0.013
<b>Sm</b>	0.801	0.096	0.102	-0.035	0.552
<b>Sr</b>	-0.264	-0.184	0.071	-0.539	-0.656
<b>Ta</b>	-0.449	-0.166	0.054	-0.324	-0.282
<b>Tb</b>	0.879	0.117	0.061	0.012	0.435
<b>Th</b>	0.365	-0.261	0.201	0.104	0.813
<b>Ti</b>	0.622	-0.196	0.415	-0.025	-0.040
<b>Tm</b>	0.914	0.090	0.144	-0.053	0.221
<b>U</b>	0.059	0.121	0.436	-0.218	0.521
<b>V</b>	0.594	0.240	0.225	0.548	-0.373
<b>Y</b>	0.848	-0.112	0.233	0.269	0.229
<b>Yb</b>	0.941	0.068	0.088	0.019	0.241

**Tabla 6.** Análisis de componentes principales y su variabilidad a partir de las concentraciones de los elementos en los desechos de minería y fundición y sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

<b>Variable</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>	<b>Factor 4</b>	<b>Factor 5</b>
<b>Zn</b>	0.019	0.905	0.133	0.187	0.065
<b>Zr</b>	-0.030	0.508	-0.579	0.332	-0.067
<b>Expl.Var</b>	17.619	8.776	4.166	4.569	6.099
<b>Prp.Totl</b>	0.360	0.179	0.085	0.093	0.124

Factor 1. Este factor tiene los elementos con cargas positivas (> 0.5) de la mayor parte de los ETR y de algunos elementos como Ce, Co, Cr, Cs y otros. De estos elementos el Cr, Fe, Sc y Ti son indicadores de aluminosilicatos terrígenos los cuales son los compuestos dominantes de las rocas graníticas y metamórficas del área de estudio.

Factor 2. Este factor es importante para la varianza de los contenidos de los elementos considerados como contaminantes As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn, y de otros elementos como Co, Mo, S, Se y Zr con carga positiva (> 0.5) y también sobresale el Be con carga alta negativa.

Factor 3. Para el tercer factor sobresalen el Cs, K y Rb con cargas altas positivas (> 0.5) y el Zr con carga alta negativa.

Factor 4. El cuarto factor afecta con los elementos que se obtuvieron con alta carga positiva (> 0.5) As, Ca, Cr, Ni y V, así como Al, Ba y Na con carga alta negativa.

Factor 5. Este factor controla principalmente al Be, Th y U, así como algunos ETR (Ce, La, Nd y Pr).

#### 7.6.2. Sedimentos de la plataforma continental

Los resultados del PCA, aplicado a la matriz de datos sobre concentraciones de los elementos en sedimentos de la plataforma continental se presentan en la Tabla 7. De esta tabla se observa que cinco factores controlan 85.8% la varianza de los datos: F1 (58 %), F2 (15 %), F3 (5 %), F4 (4 %) y F5 (4 %).

**Tabla 7.** Análisis de componentes principales y su variabilidad a partir de las concentraciones de los elementos en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

<b>Variable</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>	<b>Factor 4</b>	<b>Factor 5</b>
<b>C<sub>org</sub></b>	0.749	0.530	0.164	0.051	0.094
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	0.112	0.957	-0.007	-0.017	0.073
<b>Profundidad</b>	-0.019	0.523	0.222	-0.615	0.278
<b>% GRAVA</b>	-0.038	0.104	-0.125	-0.161	0.798
<b>% ARENA</b>	-0.210	-0.137	-0.900	0.060	-0.034
<b>% LIMO</b>	0.215	0.103	0.913	-0.011	-0.201
<b>Al</b>	0.807	0.464	0.073	0.188	0.018
<b>As</b>	0.827	0.057	0.136	0.198	0.232
<b>Ba</b>	-0.495	-0.797	0.041	-0.191	-0.031
<b>Be</b>	0.429	-0.734	-0.151	0.136	0.064
<b>Ca</b>	0.148	0.928	-0.012	-0.049	0.091
<b>Cd</b>	0.048	-0.283	0.570	0.541	0.198
<b>Ce</b>	0.935	0.156	0.067	0.104	0.090
<b>Co</b>	0.969	0.051	0.134	0.077	0.117
<b>Cr</b>	0.944	0.037	0.066	0.048	0.114
<b>Cs</b>	0.943	-0.019	0.136	-0.005	0.126
<b>Cu</b>	0.425	-0.184	-0.050	-0.036	0.194
<b>Dy</b>	0.982	0.050	0.051	0.068	0.044
<b>Er</b>	0.979	0.088	0.015	0.055	0.051
<b>Eu</b>	0.965	-0.110	-0.033	0.121	0.008
<b>Fe</b>	0.982	-0.006	0.080	0.021	0.103
<b>Gd</b>	0.976	0.072	0.033	0.098	0.038
<b>Hf</b>	0.870	0.163	0.081	0.044	-0.040
<b>Ho</b>	0.962	0.076	0.088	0.083	0.007
<b>K</b>	0.150	-0.825	0.122	-0.297	0.118
<b>La</b>	0.939	0.117	0.032	0.071	0.087
<b>Li</b>	0.905	0.060	0.119	0.212	0.143
<b>Lu</b>	0.896	0.114	0.136	0.150	0.096
<b>Mg</b>	0.121	-0.872	-0.148	0.285	-0.090
<b>Mn</b>	0.986	-0.009	0.040	0.023	0.025
<b>Mo</b>	0.425	0.454	0.107	0.014	-0.082
<b>Na</b>	-0.106	-0.613	-0.363	0.314	0.003
<b>Nd</b>	0.960	0.091	0.018	0.093	0.049
<b>Ni</b>	0.931	0.251	0.149	-0.015	0.118
<b>P</b>	0.800	0.498	0.011	0.131	0.010
<b>Pb</b>	0.445	-0.030	0.061	0.313	0.720
<b>Pr</b>	0.954	0.083	0.012	0.092	0.065
<b>Rb</b>	0.811	-0.334	0.091	-0.218	0.178
<b>S</b>	0.551	0.658	0.192	0.363	0.211
<b>Sb</b>	0.247	0.319	0.035	0.802	0.037
<b>Sc</b>	0.964	0.029	0.119	-0.039	0.078
<b>Se</b>	0.897	0.159	0.123	-0.038	0.143
<b>Sm</b>	0.965	0.061	0.016	0.113	0.046
<b>Sr</b>	-0.039	0.740	-0.177	0.149	0.168
<b>Ta</b>	0.475	0.071	-0.136	0.288	0.202
<b>Tb</b>	0.943	0.114	0.009	0.071	0.109
<b>Th</b>	0.371	0.236	0.034	0.057	0.651
<b>Ti</b>	0.981	0.001	0.071	0.078	0.016
<b>Tm</b>	0.937	0.023	0.058	0.062	0.049
<b>U</b>	0.686	0.637	0.121	0.214	-0.008

**Tabla 7 continuación.** Análisis de componentes principales y su variabilidad a partir de las concentraciones de los elementos en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

<b>Variable</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>	<b>Factor 4</b>	<b>Factor 5</b>
<b>V</b>	0.964	-0.073	0.047	-0.071	0.072
<b>Y</b>	0.977	0.142	0.026	0.038	0.061
<b>Yb</b>	0.982	0.085	0.012	0.063	-0.011
<b>Zn</b>	0.957	0.081	0.095	0.136	0.129
<b>Zr</b>	0.928	0.162	0.179	-0.094	0.067
<b>Expl.Var</b>	31.806	8.117	2.618	2.416	2.231
<b>Prp.Totl</b>	0.578	0.148	0.048	0.044	0.041

Factor 1. En este factor se encuentran los elementos con cargas positivas (> 0.5) que componen este factor son: Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu y otros. Por tener dentro de este grupo está el Al, As, Cr, Fe, Li, Sc y Ti, los cuales son indicadores típicos de los aluminosilicatos terrígenos.

Factor 2. Los parámetros ambientales, componentes y elementos que presentan cargas positivas más altas (> 0.5) de este factor son C<sub>org</sub>, CaCO<sub>3</sub>, profundidad, S, Sr y U. No obstante este factor muestra cargas negativas altas para Ba, Be, K, Mg y Na. Se sabe que C<sub>org</sub>, CaCO<sub>3</sub> y Sr se deben a procesos de origen biológico, como por ejemplo, la productividad biológica.

Factor 3. Los componentes y elementos con cargas positivas altas (> 0.5), que componen este factor son los sedimentos finos (tamaño de limos) y el Cd. Y las arenas se muestran con carga negativa alta. Lo más probable es que estos efectos se deban al papel que presenta el Cd como micronutriente para productividad primaria y a que la asociación del material orgánico, generado por la fotosíntesis y no mineralizado a causa de profundidades bajas, se asocia con las partículas finas de los sedimentos.

Factor 4. Se encontró al Cd y Sb con cargas positivas altas (> 0.5), asociados con la profundidad que presento carga negativa. Posiblemente cierta parte del cadmio se introduce en los sedimentos de la plataforma continental cerca de la costa, donde se ubican las poblaciones de El Sargento y La Ventana, las cuales podrían ser una fuente antropogénica local de este elemento, lo que nos dice que el Cd se encuentra a menor profundidad. Una posible causa al menos para el

cadmio puede ser su uso en las baterías de las lanchas con motor fuera de borda o algunas otras descargas desde la costa, junto con otro posible contaminante antropogénico el antimonio.

Factor 5. Este factor con carga negativa alta que controla la varianza de la contribución relativa del material grueso (tamaños de gravas), y de los elementos Pb y Th. Quizás el plomo y torio vienen de forma natural incorporados en el material grueso desde la península, porque es difícil exponer alguna otra hipótesis de la asociación tan exótica, no descrita en otros trabajos sobre la geoquímica sedimentaria marina.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1. Propiedades granulométricas de los sedimentos de la cuenca sedimentaria de Los Planes y de Bahía La Ventana

#### 8.1.1. Sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

En las muestras de sedimento el tamaño de grano, que predomina en el sistema fluvial de la Cuenca de San Juan de Los Planes, corresponde a sedimento con tamaño medio, que varía entre  $-0.96\phi$  (gránulos) a  $11.051\phi$  (arcillas). De acuerdo a la clasificación de Folk (1974), encontramos la predominancia de los siguientes tres tipos de material: (i) arena ligeramente gravosa; (ii) arena gravosa y (iii) grava arenosa. Estos resultados coinciden con el estudio sedimentológico en esta misma cuenca realizado por Nava Sánchez (1992), en donde también observamos que el proceso de erosión es más intenso en las áreas fuente, en la parte alta de los cerros, con tendencia a disminuir pendiente abajo. Por otra parte en el trabajo de Navarro Lozano (2006) se muestra que en la Cuenca hidrológica El Salto, ubicada al sur de la península, las distribuciones del tamaño de grano de los sedimentos son semejantes a los de la Cuenca de San Juan de Los Planes, con la presencia de arena gruesa a muy gruesa y gravas, las cuales se encuentran mal seleccionadas y en los lugares en donde se presentan las pendientes más suaves de la cuenca el material sedimentario tiene sesgo positivo. Los resultados también son concordantes con los publicados por Ahnert (1998) en donde dice que mientras aumenta la distancia y decrece la pendiente, los sedimentos van disminuyendo su tamaño de grano debido a los procesos de transporte (saltación, tracción y suspensión) en relación con la pendiente y el nivel de energía. A lo largo del arroyo San Antonio, en donde se tiene un mayor número de muestras, se observa que el material fino aportado por el sistema queda retenido en la planicie de inundación (La Bocana) y de acuerdo a la abundancia de tamaños de grano de los materiales, en la plataforma continental de la bahía, en lo que se podría llamar valle inundado asociado a la desembocadura de este arroyo, el material una vez que sale del sistema terrestre es depositado en la plataforma continental. El material limo-arcilloso, a lo largo del arroyo San Antonio y en Bahía

La Ventana proviene en parte del desgaste natural de las rocas en la Cuenca de San Juan de Los Planes y en parte de los materiales que fueron procesados por la industria minera, en donde el material fue molido, reduciendo su tamaño a limo-arcillas, procesado y desechado a la intemperie, quedando sujeto a procesos de intemperismo físico y químico, y su transporte aguas debajo de la cuenca y que dependiendo de la energía del flujo en el arroyo, el material se deposita en las partes bajas de la cuenca o sale del sistema depositándose en la plataforma de la bahía.

#### 8.1.2. Sedimentos de duna, playa y de plataforma continental de Bahía La Ventana

##### Dunas

La línea de costa en el área de estudio tiene dos orientaciones principales norte-sur y este-oeste. Los datos obtenidos de los sedimentos de las dunas costeras en la Cuenca de San Juan de los Planes, son típicos de dunas (McLachlan, 1949), es decir, el tamaño medio obtenido corresponde a las arenas medias, con sesgo simétrico, y los sedimentos son moderadamente bien seleccionadas.

##### Playa

A lo largo de la playa encontramos la predominancia de las arenas gruesas, de moderadamente bien seleccionadas a bien seleccionadas y en su mayoría están sesgadas hacia los finos. Los tamaños de grano grueso de los sedimentos en la playa son en parte el reflejo del nivel de energía (Davis, 1985) y del tamaño de grano aportado localmente. Las características granulométricas de los sedimentos de la playa en Bahía La Ventana evidencian, que es un ambiente de alta energía. En Punta Arenas, en donde la pendiente es más pronunciada, se observa, que el sedimento es más grueso y bien seleccionado. Komar (1976) menciona que varios autores han encontrado características similares del material sedimentario en varias playas del mundo. En Punta Arenas la distribución del material debe estar directamente relacionada a la dirección del viento

predominante, en donde el sedimento es transportado a lo largo del litoral, de oeste a este, y en ocasiones, cuando hay predominancia de los vientos del sur, la dirección cambia este-oeste (Nava Sánchez, 1992). En general, a lo largo de la línea de costa desde Punta Gorda al norte hasta poco antes de Punta Arenas el tamaño medio de los sedimentos son arenas gruesas a muy gruesas, solamente en la parte norte frente a la desembocadura del arroyo El Zotol el tamaño medio es de arena media, esto probablemente se deba al aporte de dicho arroyo.

#### Plataforma continental

Los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana tienen predominancia de arena media a gruesa lo cual, en el caso de las muestras cercanas a la playa, podrían reflejar el control que ejercen las corrientes y sus cambios de energía sobre el fondo marino (Navarro Lozano, 2004), algunas muestras (PI12, PI 18, PI 21 y PI 29) tienen entre 7 y 10% de limo-arcillas y los tamaños de limos solamente los observamos en los sedimentos colectados frente a los arroyos El Zotol y La Bocana (PI15, PI20 y PI24 y PI28) con 100% de material limo-arcilloso. Esto nos indica que principalmente estos dos arroyos están aportando material fino desde la Cuenca de San Juan de Los Planes al sistema marino. Frente a Punta Arenas pudimos constatar que las arenas gruesas son los sedimentos dominantes, lo cual podría estar en función del transporte litoral, asociada a la refracción del oleaje, al igual que en la playa. Para tales sedimentos de plataforma continental, Nava Sánchez (1992) reporta, que en el Canal Cerralvo el tamaño de grano es variable, desde arenas muy gruesas e incluso gránulos, hasta limos y arcillas, y cerca de la costa de Bahía La Ventana encontró distribuciones polimodales. Van Andel (1964) encuentra que los sedimentos del Golfo son principalmente bimodales (68%) y se hacen modales hacia las áreas, cercanas a la costa. Sin embargo esto no se observó en los sedimentos de Bahía La Ventana, los sedimentos cercanos a la costa son bimodales a lo que Nava Sánchez (1992) atribuye a que en esta parte no existe la energía suficiente para lograr una buena clasificación del sedimento. En la desembocadura del arroyo San Antonio, sobre la plataforma continental, se presenta un valle inundado en el cual

después de los 20 m hasta los 100 m de profundidad el sedimento es 100% limo-arcilloso (PI15, PI20 y PI28). En una muestra con menor profundidad, más cercana a la línea de costa, la cantidad de limos es mucho menor al (10%), lo cual debe ser en respuesta a la energía del oleaje, en donde el material fino aportado por el arroyo San Antonio es dispersado cerca de la costa por el oleaje local y que al aumentar la profundidad la influencia del oleaje disminuye y los sedimentos finos se depositan en este caso sobre el valle inundado.

En Santa Rosalía (Rodríguez Figueroa, 2010) y frente a Cabo San Lucas (Navarro Lozano, 2004) los sedimentos marinos tienen un patrón parecido en la distribución de sedimentos, donde a lo largo de la costa predominan las arenas gruesas y las finas se localizan frente a descargas de arroyos importantes. Lo contrario se reporta para otras bahías semicerradas, tales como Bahía Concepción (González-Yajimovich *et al.*, 2010; Rodríguez Meza, 2005), o Laguna de La Paz (Shumilin *et al.*, 2001; Kot *et al.*, 1999), donde la distribución del material sedimentario es característica y es controlada en mayor grado por la batimetría de la bahía, en donde las mayores profundidades favorecen a la acumulación de los sedimentos finos.

## 8.2. Comparación de los niveles de los contaminantes en los sedimentos del área de estudio con los resultados obtenidos para otras áreas del mundo

De acuerdo a los resultados de las concentraciones dadas por otros autores (Anónimo *et al.*, 2003; Carrillo, 1996) y el presente trabajo, las concentraciones de As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn, en los sedimentos de los desechos de minería y fundición, son muy altas. De acuerdo a los criterios ERL y ERM algunas muestras de sedimentos del arroyo San Antonio revelan impacto antropogénico debido al aporte de los desechos de minería y fundición a lo largo de este arroyo. Pero con muy pocas excepciones de los arroyos que se forman en zonas prístinas, se encontraron relativamente bajas las concentraciones de estos elementos en sedimentos de arroyo considerados como no impactados, así como en algunas

estaciones dentro de la plataforma continental de Bahía La Ventana. En los arroyos de la parte este y oeste de la cuenca los niveles son similares a los de la corteza continental superior a excepción de Arsénico y algunos otros elementos en algunas muestras (A19, A21, A23, A38, A41, A49, A50 y A57). Estos bajos niveles de los elementos potencialmente tóxicos en los sedimentos de las partes este y oeste de la cuenca nos permiten opinar que aportes atmosféricos de las cenizas de fundición no fueron amplios o simplemente fueron localizadas en las cercanías de la chimenea de fundición en San Antonio. Tales concentraciones para nuestra área de estudio pueden considerarse como niveles de fondo.

#### 8.2.1. Desechos de minería y fundición y sedimentos de arroyo

A continuación se muestra la comparación de los niveles de elementos traza potencialmente tóxicos, encontrados en este trabajo con los reportados en otros estudios de los materiales sedimentarios continentales (Tabla 8).

##### Arsénico

##### a) Desechos de minería y fundición

En el área de estudio las concentraciones de As en los desechos de minería y fundición cercanos al poblado de San Antonio, están muy por arriba de las concentraciones de la corteza continental superior ( $2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y de los reportados por otros autores (Anónimo *et al.*, 2003; Carrillo, 1996). En las muestras de cenizas de la planta de fundición de Los San Juanes y en Jales aledaños, la concentración mínima de As es de  $4420 \text{ mg kg}^{-1}$  (T3) y máxima de  $208000 \text{ mg kg}^{-1}$  (J1).

Aunque los estudios realizados por Martínez (1998), y Carrillo y Drever (1998) fueron en agua de pozos y agua subterránea del distrito minero El Triunfo-San Antonio, ellos concuerdan con que el material de los desechos de minería y fundición han estado aportando anualmente al menos  $0.5$  a  $2 \text{ mg L}^{-1}$  de arsénico al sistema de agua subterránea de la zona, y por las cantidades de este elemento encontradas tanto en los desechos como en los sedimentos del arroyo San

Antonio podría seguir desplazándose hacia el acuífero. Cabe mencionar que Carrillo y Drever (1998) observaron que de manera natural el acuífero de esta región presenta adsorción de arsénico.

#### b) Arroyos

Las concentraciones altas de As observadas en el arroyo San Antonio, evidencian que en los primeros 7 km la planta de fundición esta abasteciendo de este elemento a los sedimentos del arroyo con valores de 476 a 10754 mg kg<sup>-1</sup> (la menor concentración la presento la estación A4 ubicada 250 m al sur de la planta de fundición y la mayor concentración se encontró 400 m al norte de la planta ya mencionada), y en la época de huracanes y tormentas tropicales los sedimentos con las altas concentraciones de arsénico viajan a lo largo del arroyo, por aproximadamente 17 km rio abajo entre las estaciones A16 y A47 (35 a 47 mg kg<sup>-1</sup>), y se depositan en la planicie de inundación que abarcan los últimos 6.5 km del arroyo (parte más baja), donde las concentraciones fluctúan entre 7.5 y 318 mg kg<sup>-1</sup> (entre las estaciones 51 y 61), hasta llegar a la plataforma continental de Bahía La Ventana.

En los arroyos del lado este y oeste de la cuenca, la mayoría tienen valores entre muy bajos (2.7 mg kg<sup>-1</sup>), mientras que otros tienen concentraciones muy elevadas (118843 mg kg<sup>-1</sup>). Todos los valores sobrepasan los valores de la abundancia promedio de la corteza continental superior y esto puede ser atribuido, en parte, a las cenizas generadas en la chimenea de fundición, a los desechos de minería y fundición en las partes altas del lado oeste de la cuenca y por la presencia del mineral de arsenopirita en las rocas, de los materiales sujetos a procesos de intemperismo y erosión y que están siendo movilizados vía fluvial y eólica.

Los valores más altos deben estar relacionados, muy probablemente al aporte de contaminantes vía fluvial por jales y terreros, como se observo en los sedimentos cerca de la zona minera de Santa Rosalía (Rodríguez Figueroa, 2004) suelos impactados en Torreón y Bermejillo (Olvera, 2008).

## Cadmio

### a) Desechos de minería y fundición

La concentración de Cd en los desechos de minería y fundición están por arriba del valor promedio de la corteza continental superior ( $0.102 \text{ mg kg}^{-1}$ ), las muestras tomadas dentro de la chimenea de fundición (C1 y C2) y el terrero T3 sobrepasan el valor de ERL y el contenido de las estaciones J1 y T1 son mayores al criterio ERM. Anónimo *et al.* (2003) reportan valores mayores en la zona del Triunfo ( $128 \text{ mg kg}^{-1}$ ), en otra zona Olvera (2008) obtuvo valores muy similares ( $11.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en suelos impactados a los que encontramos en los desechos mineros en San Antonio.

### b) Arroyos

Los contenidos de cadmio en los sedimentos del arroyo San Antonio en su mayoría se encuentran por arriba del valor promedio de la corteza continental superior, cerca del área de fundición y en el poblado de San Antonio los sedimentos tienen concentraciones por arriba de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ , pasando los 15 km aguas abajo el contenido de Cd en los sedimentos disminuyen y no es hasta las estaciones A60 y A61 (en La Bocana) que el valor aumenta ( $>1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), este aumento de la concentración en La Bocana podría deberse a la infiltración de agua de mar, Delgadillo-Hinojosa *et al.* (2001) reportan que las aguas superficiales del Golfo de California se encuentran enriquecidas con cadmio. En general, los valores encontrados en este arroyo son ligeramente mayores al valor de la corteza continental superior. Otros autores reportan enriquecimiento de este elemento en sedimentos cercanos a las colas de cianuración a los que Anónimo *et al.*, (2003) denominan como suelo natural con contenidos muy altos ( $262 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en la región El Triunfo–San Antonio, y también reportan que los desechos de minería contienen valores menores de Cd ( $128 \text{ mg kg}^{-1}$ ) a los de suelo natural, estas concentraciones en los suelos cercanos a la zona minera podrían deberse a un arrastre de contaminantes por viento y/o agua y a la mineralogía.

En los arroyos del lado oeste y este de la cuenca, el rango de concentraciones es muy amplio (0.01 a 23 mg kg<sup>-1</sup>), las estaciones cercanas al área de fundición A3 (arroyo Agua Caliente) y A7 (arroyo Los Chiles) tienen valores mayores a los de la corteza continental superior lo que se podría suponer que los sedimentos de estos arroyos podrían estar siendo enriquecidos con Cd por los desechos de minería y fundición en épocas de lluvias. En la parte oeste de la cuenca las muestras A34 (parte alta de la sierra) y A49 (parte baja de la sierra) ubicadas en el arroyo El Diablo tienen valores muy altos (5 y 23 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), lo que probablemente sea la causa de la minería artesanal realizada por los habitantes de los poblados, o en parte a la presencia de desechos mineros de los cuales no se tiene su ubicación. Mientras que en el lado este, los contenidos de este elemento se encuentran entre los 0.1 y 0.5 mg kg<sup>-1</sup>.

## Cobre

### a) Desechos de minería y fundición

Las concentraciones de Cu en los desechos de minería y fundición fluctúan entre los 24 y 337 mg kg<sup>-1</sup>, estos valores se encuentran por arriba del valor promedio de la corteza continental (14.3 mg kg<sup>-1</sup>). Anónimo *et al.* (2003) reportan concentraciones de este elemento en los desechos mineros de la región El Triunfo 837 mg kg<sup>-1</sup>, y en otros trabajos en desechos de minería, en San Luciano cerca de Santa Rosalía, reportan contenidos promedios de 11 000 mg kg<sup>-1</sup> Rodríguez Figueroa (2004) y Shumilin *et al.* (2000).

### b) Arroyos

En el arroyo San Antonio las concentraciones de cobre tienen rango entre 1.4 y 50 mg kg<sup>-1</sup>, la mayoría tiene valores mayores a los de la abundancia promedio de la corteza continental superior. Los contenidos más altos se encontraron cerca del área de fundición y en la muestras A51 ubicada en el poblado de San Juan de Los Planes, Anónimo *et al.* (2003) reportaron para los sedimentos cercanos a las colas de fundición (jales) a lo que denominan suelo natural concentraciones de 1110 mg kg<sup>-1</sup>, y lo atribuyen probablemente a la presencia del mineral polibasita

[(Ag, Cu)<sub>16</sub>Sb<sub>2</sub>S<sub>11</sub>]. No obstante en la región minera cuprífera de Santa Rosalía, Rodríguez Figueroa (2004) y Shumilin *et al.* (2000) mostraron en los desechos de fundición del mineral del cobre el valor promedio de 11000 mg kg<sup>-1</sup> de Cu.

Para los arroyos del lado este y oeste, el rango de concentraciones es de 0.7 a 459 mg kg<sup>-1</sup>, las estaciones A7 (cerca al área de fundición), A23, A41, A49 (de los arroyos del lado oeste), A19, A21, A29, A38, A50, A53, A55 y A63 (arroyos del lado este) tienen valores mayores a los de la corteza continental superior. Del lado este de la cuenca las concentraciones son más homogéneas, probablemente se deba al aporte natural por la litología de la Sierra La Gata.

## Mercurio

### a) Desechos de minería y fundición

La concentración en la única muestra (J1) analizada para Hg en el área de estudio es de 7 µg kg<sup>-1</sup>, este valor se encuentra muy por debajo del promedio de la corteza continental superior (56 µg kg<sup>-1</sup>) y de los valores reportados por otros autores en desechos de minería en El Triunfo por Romero Guadarrama *et al.* (2010) (336 µg kg<sup>-1</sup>) y Anónimo *et al.* (2003) (2000 µg kg<sup>-1</sup>).

### b) Arroyos

En el arroyo San Antonio las concentraciones de mercurio fluctúan entre 2 y 34.5 µg kg<sup>-1</sup>, todas las estaciones se encuentran por debajo del valor de la corteza continental superior. Sin embargo, en los trabajos realizados por Anónimo *et al.* (2003) en El Triunfo en suelos naturales el contenido de este elemento fue de 800 µg kg<sup>-1</sup>. Otro lugar en donde se encontraron niveles altos de Hg en sedimentos cercanos a una mina en la región minera de Santa Rosalía donde se encontraron valores de 3160 µg kg<sup>-1</sup> (Kot *et al.*, 2009; Rodríguez Figueroa 2004; Shumilin *et al.*, 2000).

En los arroyos del lado oeste de la cuenca el rango de las concentraciones es de 0.07 a 54 µg kg<sup>-1</sup>, valores por debajo de la abundancia promedio de la corteza continental superior.

Es importante mencionar que en la región minera El Triunfo-San Antonio se utilizaba la amalgamación con Hg para la extracción de oro, generando altos niveles de este elemento, en El Triunfo se encontraron altas concentraciones de mercurio en los desechos y suelos cercanos a la zona (Romero Guadarrama *et al.*, 2010; Anónimo *et al.*, 2003), mientras que en el área de San Antonio no se encontraron evidencias de contaminación por este elemento, lo que nos hace pensar que en nuestra zona la tecnología de extracción de oro no se usaba este elemento, además de que se tiene el antecedente que en El Triunfo se construyeron varios edificios para refinar el mineral entre los cuales se encontraba un almacén para el mercurio (Romero Gil *et al.*, 2002), lo que explicaría las altas concentraciones de este elemento en El Triunfo.

## Plomo

### a) Desechos de minería y fundición

Los desechos de minería y fundición tienen valores mayores a los de la corteza continental superior ( $17 \text{ mg kg}^{-1}$ ), tales valores fluctúan entre 6 y  $12100 \text{ mg kg}^{-1}$ , y en promedio  $2653 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el área de El Triunfo Anónimo *et al.* (2003) reportan valores mucho más altos en los desechos ( $30590 \text{ mg kg}^{-1}$ ), en colas de mina en San Luciano cerca de Santa Rosalía las concentraciones encontradas ( $320 \text{ mg kg}^{-1}$ ) fueron menores a las encontradas en los desechos de minería y fundición en San Antonio (Rodríguez Figueroa, 2004; Shumilin *et al.*, 2000).

### b) Arroyos

El arroyo San Antonio tiene concentraciones con rango de 4.5 a  $938 \text{ mg kg}^{-1}$ , donde la mayoría de las estaciones sobrepasan el valor de la corteza continental superior. Los contenidos más altos los observamos en las muestras cercanas al área de fundición, sobre todo en la estación A6 ya cercana a esta se encontraba un jale (el cual no fue muestreado).

Para los arroyos del lado este y oeste las concentraciones varían de 3 a  $3965 \text{ mg kg}^{-1}$ , muy pocas muestras se encuentran por arriba del promedio: A7 (cercana

al área de fundición), A23, A41, A49 (parte oeste), A19, A45, A50, A52, A55 y A63 (parte este y la planicie en Punta Arenas).

En promedio, la concentración de Pb en los sedimentos de arroyo es  $145 \text{ mg kg}^{-1}$ , este valor es mayor al reportado por Salomons y Förstner (1984) en sedimentos de varios lugares en promedio ( $19 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y menores a los reportados por Olvera (2008) en suelos impactados ( $1712 \text{ mg kg}^{-1}$ ) por minería en Torreón y Bermejillo. En la zona minera de El Triunfo Anónimo *et al.* (2003) obtuvieron valores altos en suelos naturales cercanos a las colas ( $856 \text{ mg kg}^{-1}$ ) mayores a los encontrados en San Antonio. Cabe mencionar que los altos contenidos de plomo en los sedimentos de la zona se deben en gran medida a los métodos utilizados para los procesos de cianuración y fundición.

#### Antimonio

##### a) Desechos de minería y fundición

Las concentraciones de Sb en los desechos de minería y fundición varía de 1.5 a  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ , y en promedio  $1194 \text{ mg kg}^{-1}$ . Todos mayores al valor de la corteza continental superior ( $0.31 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Anónimo *et al.*, (2003) reportan valores mayores en desechos de la región minera El Triunfo ( $4484 \text{ mg kg}^{-1}$ ), los autores opinan que las altas concentraciones de antimonio que encontraron pueden deberse a que la plata podría encontrarse asociada con este elemento en diferentes minerales (stephanita ( $\text{Ag}_5\text{SbS}_4$ ), polibasita [ $(\text{Ag}, \text{Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$ ] y plata roja oscura o pirargirita ( $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ )).

##### b) Arroyos

Para el Arroyo San Antonio las concentraciones fluctúan entre 0.05 a  $18 \text{ mg kg}^{-1}$ , la mayoría se encuentra por arriba del valor promedio de la corteza continental superior. Los valores más altos los observamos cerca del área de fundición y se mantienen hasta aproximadamente 16 km aguas abajo, y cerca del poblado de Los Planes y en La Bocana se volvieron a ver valores altos.

En los arroyos del lado este y oeste de la cuenca los contenidos varían de 0.05 a 0.6 mg kg<sup>-1</sup>, únicamente las estaciones A34 y A63 están ligeramente por arriba del valor de la corteza continental superior. En los arroyos de los lados este y oeste el Sb no es significativo.

En promedio, los sedimentos de los arroyos tienen concentración de 2 mg kg<sup>-1</sup>, mayor al valor de la corteza continental superior y a los sedimentos de arroyos en la Cuenca del Complejo Magdalena-Almejas (Rodríguez Meza *et al.*, 2007) y contenido menor al reportado por otros autores (Anónimo *et al.*, 2003; Salomons y Förstner, 1984).

## Zinc

### a) Desechos de minería y fundición

Para los desechos de minería y fundición las concentraciones de Zn varían entre 52 y 509 mg kg<sup>-1</sup>, en promedio 233 mg kg<sup>-1</sup>. La mayoría están por arriba del valor promedio de la corteza continental superior (53 mg kg<sup>-1</sup>). Otros autores reportan valores mayores para la región minera en Santa Rosalía con 1954 mg kg<sup>-1</sup> y en la región minera El Triunfo con 22473 mg kg<sup>-1</sup>. La diferencia de las concentraciones entre las regiones de El Triunfo y San Antonio probablemente se deban en gran medida a los métodos utilizados para los procesos de extracción que se practicaban como el de cianuración y fundición que se practicaban, ya que a simple vista existe una mayoría de instalaciones mineras en El Triunfo que en San Antonio.

### b) Arroyos

Las concentraciones de zinc en los sedimentos del arroyo San Antonio fluctúan entre 10 y 78 mg kg<sup>-1</sup>, las más altas concentraciones, mayores a los valores de la corteza continental superior, las encontramos cerca del área de fundición, del poblado de San Antonio y en La Bocana.

En los arroyos del lado este y oeste de la cuenca los contenidos de este elemento fluctúan entre 17 y 366 mg kg<sup>-1</sup>, donde la mayoría de las estaciones en

el lado este de la cuenca se encuentran ligeramente por arriba del valor promedio de la corteza continental superior, y del lado oeste la estación A49.

Los sedimentos de arroyos en general tienen un valor promedio de  $27 \text{ mg kg}^{-1}$ , valor menor al de la abundancia promedio de la corteza continental superior y de otros trabajos como el que realizaron Rodríguez Meza *et al.*, 2007 en la cuenca del complejo Magdalena-Almejas. Por otra parte, Anónimo *et al.* (2003) obtuvieron concentraciones mayores que las encontradas en San Antonio, probablemente se debe en gran medida a los métodos utilizados para los procesos que se practicaban de cianuración y fundición y a lo que se explicó anteriormente sobre las instalaciones.

**Tabla 8.** Comparación de los contenidos de los principales contaminantes ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto Hg  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) del los sedimentos de los desechos de minería y fundición y arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

Área	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Sb	Zn	Referencias
Desechos de minería y fundición de este estudio	71682	10	148	7*	2653	1194	233	Este estudio
Sedimentos de arroyos de este estudio	3099	2.5	1	11	145	2	43	Este estudio
Desechos de minería de El Triunfo	-	-	-	336	-	-	-	Romero Guadarrama <i>et al.</i> (2010)
Suelos naturales de El Triunfo (T <sub>6</sub> y T <sub>7</sub> )	572	262	1110	800	852	590	1153	Anónimo <i>et al.</i> (2003)
Desechos de la región minera El Triunfo	12499	128	837	2000	30590	4484	22473	Anónimo <i>et al.</i> (2003)
Colas de mina San Luciano cerca de Santa Rosalía	-	-	11000	3160	320	-	1954	Shumilin <i>et al.</i> (2000), Rodríguez Figueroa (2004), Kot <i>et al.</i> (2009)
Sedimentos de la Cuenca del Complejo Magdalena-Almejas	5	-	-	-	-	0.7	27	Rodríguez Meza <i>et al.</i> (2007)
Suelos impactados en Torreón y Bermejillo	98.7	11.8	-	-	1712	-	-	Olvera (2008)
Sedimentos en promedio	7.7	0.17	33	190	19	1.2	95	Salomons y Förstner (1984)
Corteza superior	2	0.102	14.3	56	17	0.31	52	Wedepohl (1995)

\* Valor único

### 8.2.2. Sedimentos de la plataforma continental

Los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana (Tabla 9) mostraron concentraciones bajas en comparación con el valor promedio de la corteza continental superior (Wedepohl, 1995) para As, Cu, Hg, Pb y Zn y mucho menores a los valores reportados por Rodríguez Figueroa (2010), Siegel *et al.* (2000), Schiff y Weisberg (1999).

#### Arsénico

La concentración promedio de As en los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana ( $2.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) es parecida al valor promedio de la corteza continental superior ( $2 \text{ mg kg}^{-1}$ ), pero también es menor al valor reportado por otros autores en sedimentos marinos (Daikumar *et al.*, 2010; Leal-Acosta *et al.*, 2010; Rodríguez Figueroa, 2010; Rodríguez Meza *et al.*, 2007; Rodríguez Meza, 2004; Rodríguez Castañeda, 2002; Shumilin *et al.*, 2001; Siegel *et al.*, 2000), lo que nos dice que este elemento no es significativo en este ambiente.

Los contenidos mayores al valor de la corteza se observaron en forma dispersa por la parte central de la plataforma continental (PI8, PI16, PI18, PI20, PI21 y PI29), lo que probablemente demuestre el aporte de arsénico desde la península a la plataforma continental.

#### Cadmio

La concentración promedio del Cd en sedimentos de la plataforma continental ( $1.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) es mayor al valor promedio de la corteza continental superior ( $0.102 \text{ mg kg}^{-1}$ ), y ligeramente menor al valor reportado por otros autores (Rodríguez Figueroa, 2010; Rodríguez Meza *et al.*, 2007; Salomons y Förstner, 1984). En un trabajo realizado en los sedimentos de la Laguna de La Paz (Shumilin *et al.*, 2001), al norte de Bahía La Ventana, reportan valores mayores ( $3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) a los reportados en los sedimentos de la bahía. En Bahía La Ventana los valores más altos fueron encontrados cerca de la línea de costa, por las desembocaduras de los arroyos principalmente en La Bocana, en la parte central, por lo que se podría

relacionar por una parte a la presencia del Cd en la bahía al aporte de sedimentos de la Cuenca de San Juan de Los Planes en donde se presentan concentraciones de este elemento en  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  en los desechos de minería y fundición y  $2.5 \text{ mg kg}^{-1}$  en los arroyos, y por otra parte a que este elemento es utilizado por el plancton para la fotosíntesis en la productividad primaria.

## Cobre

El valor promedio del Cu en la corteza continental superior ( $14.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y los valores reportados por otros autores (Leal-Acosta *et al.*, in press; Rodríguez Figueroa, 2010; Shumilin *et al.*, 2001; Rodríguez Meza *et al.*, 2007; Salomons y Förstner, 1984) son mayores a las concentraciones promedio ( $3.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) de los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana. De acuerdo a los valores reportados por otros autores en diferentes zonas (Leal-Acosta *et al.*, in press; Rodríguez Meza *et al.*, 2007; Rodríguez Meza, 2004; Shumilin *et al.*, 2001; Kot *et al.*, 1999) los valores en la bahía son ligeramente mayores a estos. Los contenidos de los sedimentos de la plataforma continental al norte en Santa Rosalía son mucho más altos ( $1573 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que los encontrados en Bahía La Ventana, esos valores se encuentran en lo que definen como sector central (frente a la dársena portuaria de Santa Rosalía) que es un área de depositación y transporte de metales pesados desde las escorias de fundición del cobre, que se realizaba en este pueblo casi durante un siglo.

## Mercurio

Este elemento, desde la fuerte intoxicación de la población de la ciudad Minamata en Japón durante los años 1950's, se encuentra en la "lista negra" de los contaminantes más peligrosos del ambiente marino (Gerlach, 1981). Las concentraciones de mercurio en los sedimentos marinos de Bahía de Minamata alcanzaron niveles hasta de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  disminuyendo a  $100 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ . En el Puerto Vladivostok (Rusia) las concentraciones de Hg en sedimentos fueron alrededor de  $400\text{-}1000 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$  (Polyakov *et al.*, 1992). En particular, los contenidos de este elemento en los sedimentos de la ensenada semicerrada de Zolotoi Rog

alcanzaron los  $1440 \mu\text{g kg}^{-1}$  (Aksentov *et al.*, 2009). Conociendo estos antecedentes sobre las altas concentraciones de mercurio en sedimentos de la plataforma y comparando esos valores con los del área de estudio podemos ver que los sedimentos de Bahía La Ventana ( $6 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) son 2 a 3 órdenes menores que en las áreas contaminadas y hasta que el contenido promedio de Hg en la corteza continental superior ( $56 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) y en sedimentos marinos de otras partes del mundo como la Bahía del Sur de California ( $50 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), Golfo de Mannar ( $174 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), Mar de Kara ( $94\text{-}3915 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) y áreas cercanas como la Ensenada de Santispac ( $19 \mu\text{g kg}^{-1}$ ) y Mapachitos ( $52 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), por lo que este elemento no es muy significativo.

## Plomo

El valor promedio de la corteza continental superior propuesto por Wedepohl (1995) para Pb ( $17 \text{mg kg}^{-1}$ ) es mayor a la concentración promedio de los sedimentos de Bahía La Ventana ( $8 \text{mg kg}^{-1}$ ), incluso en sedimentos de zonas más al norte del área de estudio, los valores sobrepasan al valor de la corteza como (de Norte a Sur): Santa Rosalía ( $42 \text{mg kg}^{-1}$ ), en donde se tiene identificado que las principales fuentes de abastecimiento son antropogénicas (minería, fundición del mineral cuprífero y las actividades del puerto) y quizá en menor grado las naturales, Bahía Concepción ( $31 \text{mg kg}^{-1}$ ) una zona sin actividades industriales registradas, pero se sabe de la existencia de actividad geotermal y Laguna de La Paz ( $50 \text{mg kg}^{-1}$ ), en donde al norte se encuentra la mina donde se explota el mineral de fosforita que por corrientes y viento llegan a la laguna, más los desechos urbanos. Los valores de plomo no son significativos en Bahía La Ventana a pesar de las actividades de turismo y pesca, sin embargo se observa que en la parte centro sur de la bahía, cerca a la desembocadura de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes se registran los valores mayores a los de la corteza continental superior ( $56 \text{mg kg}^{-1}$ ) lo que puede estar relacionado al aporte de la cuenca, en donde se presentan valores en La Bocana de  $27 \text{mg kg}^{-1}$ , lo cual puede estar relacionado a la minería ( $12\ 000 \text{mg kg}^{-1}$  en un terreno) y al aporte natural por las rocas, además de esto probablemente las corrientes

marinas en la región estén jugando un papel importante en el transporte de este elemento, de áreas con mayores valores, como es el de la Bahía de La Paz, a los sedimentos de Bahía La Ventana.

#### Antimonio

La presencia de Sb en los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana con concentraciones promedio ( $0.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) un poco elevadas en comparación al valor promedio de la corteza continental superior ( $0.31 \text{ mg kg}^{-1}$ ), no se encuentra muy alejada de las concentraciones en sedimentos marinos de Bahía de La Paz ( $0.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Laguna de La Paz ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Complejo Magdalena-Almejas ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Bahía Concepción ( $0.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Santa Rosalía ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), por lo que este elemento no es significativo en sedimentos de la plataforma continental en el área de estudio, sin embargo se observa que en la parte centro sur de la bahía cerca a la desembocadura de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes se registran valores mayores a los de la corteza continental superior (entre  $1$  a  $1.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) lo que puede estar relacionado con el aporte de este elemento en los sedimentos desde la cuenca, en donde se presentan valores en La Bocana de  $12.4 \text{ mg kg}^{-1}$  lo cual se relaciona al enriquecimiento de este elemento por la actividad minera ( $102 \text{ mg kg}^{-1}$ , valor promedio en desechos mineros).

#### Zinc

El valor promedio del Zn en la corteza continental superior ( $52 \text{ mg kg}^{-1}$ ) es mayor a la concentración promedio de la mayoría de los sedimentos de Bahía La Ventana ( $25 \text{ mg kg}^{-1}$ ), solo las estaciones PI18, PI20, PI21, PI28 y PI29 en la parte central de la bahía tienen valores mayores (entre  $52$  a  $70 \text{ mg kg}^{-1}$ ), lo que puede estar asociado al aporte de la Cuenca de San Juan de Los Planes, en donde se presentan valores en La Bocana de  $95 \text{ mg kg}^{-1}$  valores relacionados al enriquecimiento de este elemento por la actividad minera ( $233 \text{ mg kg}^{-1}$  valor promedio en desechos de minería y fundición). Los sedimentos marinos de Santa

Rosalía tienen concentraciones mayores ( $166 \text{ mg kg}^{-1}$ ) a las encontradas en Bahía La Ventana.

**Tabla 9.** Comparación de los contenidos de los principales contaminantes ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto Hg  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) del los sedimentos de la plataforma de Bahía La Ventana

Área	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Sb	Zn	Referencias
Sedimentos marinos de la Bahía La Ventana	2.3	1.4	3.8	6	8	0.8	25	Este estudio
Sedimentos de la Bahía de La Paz	11	-	-	-	-	0.9	43.3	Rodríguez Castañeda (2002)
Sedimentos de la Laguna de La Paz	11	3	10	20	50	1	45	Kot <i>et al.</i> (1999); Shumilin <i>et al.</i> (2001)
Sedimentos de la Laguna Barra de Navidad, Colima	-	-	-	15	-	-	-	Willerer <i>et al.</i> (2005)
Sedimentos marinos del Complejo Magdalena-Almejas	11	2	4	-	4	1	7	Rodríguez Meza <i>et al.</i> (2007)
Sedimentos de Bahía Concepción	8	-	20	-	31	0.4	39	Rodríguez Meza (2004)
Sedimentos marinos de la Ensenada Santispac	1.4	-	-	19	-	-	-	Leal-Acosta <i>et al.</i> (2010)
Sedimentos de Mapachitos	3.7	0.9	9.9	52	-	-	20	Leal-Acosta <i>et al.</i> (in press)
Sedimentos marinos en Santa Rosalía (parte central)	10	1	1573	-	42	1	166	Rodríguez Figueroa (2010)
Bahía del Sur de California (EUA)	5.1	-	-	50	-	-	-	Schiff y Weisberg (1999)

**Tabla 9.** Comparación de los contenidos de los principales contaminantes ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto Hg  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) del los sedimentos de la plataforma de Bahía La Ventana

Área	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Sb	Zn	Referencias
Sedimentos de rocas de playa del Golfo de Mannar (India Sur Oriental)	12.51	-	-	174	-	-	-	Daikumar <i>et al.</i> (2010)
Sedimentos de mar de Kara (Océano Ártico)	5.4-710	-	-	94-3915	-	-	-	Siegel <i>et al.</i> (2000)
Sedimentos en promedio	7.7	0.17	33	190	19	1.2	95	Salomons y Förstner (1984)
Corteza superior	2	0.102	14.3	56	17	0.31	52	Wedepohl (1995)

### 8.3. Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos

De las investigaciones actuales sobre contaminantes ligados a partículas, se originó el concepto sobre que los sedimentos reflejan las condiciones físicas, químicas y biológicas del agua que se encuentra encima del material sedimentario (Züllig, 1956 citado en Burton, 1992). Es por esto que se han desarrollado diversos métodos que pueden ayudar a tener una mejor interpretación de los datos y facilitar la evaluación de la calidad de los sedimentos, ya que estos sirven como reservorio y fuente de contaminantes. Los criterios de evaluación de la calidad de los sedimentos también son necesarios para proveer a largo plazo una gestión de los contaminantes en el material sedimentario, incluyendo la evaluación de la calidad de sedimentos e identificación de las áreas problema para la realización de acciones de remediación (Burton, 1992). En este trabajo se consideraron los siguientes indicadores de contaminación ( $I_{geo}$ ) en sedimentos: el índice de geoacumulación, el factor de enriquecimiento (FE) y los criterios de calidad de los sedimentos ERL y ERM.

El  $I_{geo}$  es útil para analizar el grado de contaminación por ET, comparando seis niveles de enriquecimiento, basados en el aumento numérico del valor del índice. Este índice ha sido utilizado por varios autores (Lizárraga Mendiola, 2008; Rodríguez Meza, 2004; Rubio *et al.*, 2000a) en sedimentos de diferentes regiones del mundo. De acuerdo al  $I_{geo}$  en los desechos de minería y fundición, los sedimentos de los arroyos San Antonio, De Raizuda y El Diablo para As, Cu, Pb y Zn presentan contaminación fuerte a moderada.

El FE el cual se basa en una doble normalización para valorar la condición en la composición de los sedimentos e identificar enriquecimientos de los ET (Rubio *et al.*, 2000), los desechos de minería y fundición muestran enriquecimiento de As, Sb, Cd, Pb, Se y S. Para los sedimentos de arroyos el As, Cd, y Sb presentaron enriquecimiento, mientras que en los sedimentos de la plataforma continental se encuentran el Cd, Se, Mg, Sr, Sb, Ca, Ba, Na, S, Pb, As, Li y K. Los resultados del  $I_{geo}$  en comparación con los resultados del FE no se observó enriquecimiento por Cu, Pb y Zn en los sedimentos cercanos al área de fundición en el arroyo San

Antonio, el enriquecimiento se presentó a partir de las muestras A13 por Pb y Zn, y A15 por Cu. Lizárraga-Mendiola (2008) comparó estos dos métodos y encontró diferencias, donde explica que el  $I_{geo}$ , para sus resultados es más aproximado a las condiciones reales de su área de estudio (Toluca, México), atribuyéndolo al transporte eólico, cabe destacar que para el  $I_{geo}$  utilizó como valor de fondo una zona no contaminada.

Adicionalmente los contenidos de los elementos potencialmente tóxicos (en cada muestra de sedimentos de los distintos ambientes) fueron comparados con criterios para evaluar la calidad de los sedimentos contra los valores de la guía de calidad de sedimentos, propuestos por Long *et al.* (1995), que define dos rangos: ERL y ERM (por sus siglas en inglés) (Tabla 10). ERL significa “efectos de rango bajo” y ERM “efectos de rango medio”. De acuerdo con los autores el cálculo de los rangos permite aproximarse a los posibles efectos negativos de los metales sobre la biota y concluir sobre los metales contaminantes presentes.

**Tabla 10.** Valores de los criterios de ERL y ERM para elementos traza ( $mg\ kg^{-1}$ , excepto Hg  $\mu g\ kg^{-1}$ ) y porcentaje de incidencia de posible efectos biológicos por Long *et al.* (1995)

Elemento	Criterios de calidad ambiental		Porcentaje de incidencia		
	ERL	ERM	<ERL	ERL>ERM	>ERM
<b>As</b>	8.2	70.0	5.0	11.1	63.0
<b>Cd</b>	1.2	9.6	6.6	36.6	65.7
<b>Cu</b>	34.0	270.0	9.4	29.1	82.7
<b>Hg</b>	150	710	8.3	23.5	42.3
<b>Pb</b>	46.7	218.0	8.0	35.8	90.2
<b>Zn</b>	150.0	410.0	6.1	47.0	69.8

## Arsénico

Comparando nuestros valores de las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos con los criterios de ERL y ERM propuestos por Long *et al.* (1995), observamos que algunas muestras, con contenidos de As sobrepasan los valores de ERM ( $70\ mg\ kg^{-1}$ ). Esto ocurre con los sedimentos de algunas estaciones cercanas al área de fundición y poblado de San Antonio, hasta 15 km después de la primera estación en algunas otras estaciones al final del arroyo San

Antonio (A59 y A60) y en otros arroyos (A23, A41, A49, A19 y A52). Dentro del arroyo principal, después de los 15 km y los arroyos de los lados este y oeste de la cuenca (A21, A29, A53, A57, A58, A45, A55 y A63) los sedimentos muestran valores mayores al valor de ERL ( $8.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Para los sedimentos de playa y de plataforma continental, en general, los valores están por debajo de los valores de ERL y ERM, solamente la muestra PI20, ubicada a 40 m de profundidad frente a La Bocana, presenta valores que sobrepasan el valor de ERL para As.

### Cadmio

La mayor parte de las estaciones en el arroyo San Antonio, arroyos de la parte oeste y este de la cuenca tienen valores menores a los de ERL ( $1.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y ERM ( $9.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Sin embargo, la estación A49 presenta valores mayores al ERM y las muestras A5, A6, A7, A10 (cercañas al área de fundición), A11, A12, A13, A14 (poblado de San Antonio), A34 (arroyo El Diablo), A60 y A61 (La Bocana) sobrepasan el valor de ERL ( $1.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

En el material de desechos de minería y fundición J1 y T1 presentan valores mayores al ERM ( $9.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) para cadmio. Las muestras que sobrepasan el valor de ERL ( $1.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) son C1, C2 y T2.

Para los sedimentos de playa en general los niveles están por debajo del ERL y ERM. En las muestras de la plataforma continental de la parte centro-sur de la bahía la mayor parte de los sedimentos y la estación PI31 frente a Punta Arenas se encuentran por arriba del valor ERL, contribuyendo al 37% de efectos negativos en la biota y la estación PI15 con el 66% de efecto ( $>ERM$ , Tabla 10).

### Cobre

Aunque la mayoría de las concentraciones promedio de Cu en los sedimentos del arroyo San Antonio sea mayor al valor de la corteza ( $14.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), solo A5, A6 (cercañas al área de fundición) y A11 (localizada dentro del poblado de San Antonio) representan un probable riesgo para el 29 % de la biota ( $>ERL$ , Tabla 11).

Los contenidos de este elemento las muestras de los arroyos de lado oeste de la cuenca A23 (en la parte alta de la Sierra) pasan el valor del ERL ( $34 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y A49 (parte baja de la Sierra) pasa el valor del ERM ( $270 \text{ mg kg}^{-1}$ ), lo que representa un efecto negativo para los organismos cercanos a estas estaciones con un 29% para A23 y 83% para A49. En las estaciones de los arroyos del lado este de la cuenca no se encontró evidencia de algún efecto negativo. Una particularidad es la estación A63, localizada en la zona de inundación cerca de Punta Arenas mostrando valores de cobre por arriba del ERL, esta zona el nivel topográfico más bajo es de 0m y esta 2.5 km al sur de la línea de costa, lo que probablemente esté recibiendo por infiltración agua marina y por otra parte esté recibiendo aporte de material sedimentarios vía fluvial de los cerros cercanos (El Cerrito, La Gata y El Perico). Muy probablemente las rocas de estos cerros contengan en su composición a este elemento ya que también se encontró en los sedimentos de los arroyos del lado este de la cuenca y la diferencia en la abundancia parece estar relacionada a un enriquecimiento debido a ser un cuerpo cerrado y que presenta un alto contenido de limo arcillas (53%).

Absolutamente en todo el material sedimentario de los desechos de minería y fundición las concentraciones de este elemento se encuentran por arriba del valor reportado por Long *et al.* (1995), como ERL ( $34 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y solo J1 mostró valores ligeramente mayores al ERM ( $270 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Parta los sedimentos de playa y sedimentos de la plataforma continental los valores de las concentraciones promedio de cobre y la concentración máxima se encuentran por debajo del valor de ERL y ERM.

## Plomo

La mayoría de las estaciones del arroyo San Antonio presentan valores mayores al de la corteza ( $17 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y solo A6 (cercana al área de fundición) se encuentra superior al valor de ERM, y otras como A5 (cercana al área de fundición), A10, A11, A13 (cerca del poblado de San Antonio), A14, A15, A51 y A60 tienen valores que sobrepasan el ERL. Los sedimentos de arroyos del lado

oeste que posiblemente afectan a la biota con un 36% en la estación A41 y con 90% en la muestra A49, y para los arroyos del lado este de la cuenca, la muestra A50 afecta el 90% a la biota, esta muestra contiene el 85% de arena y es abastecida de sedimentos principalmente de la sierra La Gata.

Para los desechos de minería y fundición las concentraciones de Pb presentan valores mayores al valor de ERM ( $218 \text{ mg kg}^{-1}$ ) para C2, J1 y T2 con posible afectación de un 36% en la biota, y los mayores al ERL ( $46.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) fueron C2 y T2 con 90% de afectación.

En las muestras de los sedimentos de playa y plataforma continental las concentraciones promedio de plomo, de acuerdo a este criterio, no representan riesgo a la biota.

## Zinc

En algunas estaciones cercanas al poblado de San Antonio y La Bocana las concentraciones promedio del arroyo San Antonio sobrepasan el valor de ERL ( $150 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Para los arroyos localizados en el lado oeste de la cuenca solo A49 son mayores al ERL, mientras que los arroyos del lado este la mayoría tienen concentraciones por arriba del promedio de la corteza.

Para el material sedimentario de los desechos de minería y fundición las concentraciones de zinc en T3 están ligeramente por debajo del valor de la corteza ( $52 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y por arriba están C1 y C2, que de acuerdo a los criterios de la calidad de los sedimentos no representa riesgo para la biota. Los contenidos promedio de J1 (jales) y T2 (terrero) sobrepasan el valor de ERL ( $150 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y solamente T1 (terrero) rebasa el ERM ( $410 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Con estos datos y de acuerdo a la Tabla 11, las estaciones J1 y T2 podrían estar afectando a la biota en un 47%. Para T1 aproximadamente 70% de la biota podría estar afectada.

En los sedimentos de playa y de la plataforma continental de acuerdo a este criterio, no se encontró evidencia de algún posible efecto de este elemento sobre la biota ya que aunque sólo las estaciones PI18, PI20, PI21, PI28 y PI29 (muestras

en valle inundado frente a La Bocana) están por arriba del valor promedio, sin embargo no sobrepasan ninguno de los criterios ERL y ERM.

#### 8.4. Posible origen de los elementos en sedimentos y su relación con la geología del área de estudio

Las asociaciones de los componentes y elementos en los diferentes ambientes de depósito, permiten encontrar agrupaciones entre ellos, definir su distribución y el origen de estos en el entorno (Zitko, 1994; Flury y Riedwyl, 1988). El análisis de componentes principales permitió identificar algunas asociaciones.

##### Asociaciones en muestras de desechos de minería y fundición y arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

- 1) La primera asociación que se identificó incluye el Cr, Fe, Sc y Ti (típicos indicadores de aluminosilicatos) e incluye los ETR excepto La. Podemos opinar que esta asociación representa el aporte de los materiales terrígenos hacia los sedimentos de la plataforma. En particular, lógicamente aquí se encuentran todos los lantánidos (ETR). Curiosamente en este mismo grupo vienen los presuntos contaminantes As y Zn, probablemente incorporados o asociados a una mezcla de la mineralogía de la zona.
- 2) Dentro de la segunda asociación encontramos a los contaminantes potenciales (As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn) producto de los procesos de explotación de los minerales de Au y Ag. En la zona minera de Santa Rosalía (Rodríguez Figueroa, 2004; Shumilin *et al.*, 2000) observaron la presencia de elementos relacionados con la explotación del mineral de Cu, en Rodalquilar al sureste de España (Wray, 1998) reporta niveles elevados de As, Bi, Cu, Mo, Pb, Sb, Te y Zn en los sedimentos fluviales procedentes de la minería por oro. La contribución de estos elementos es importante en la formación de los minerales secundarios que se forman en los jales y son muy importante desde el punto de vista ambiental (Romero *et al.*, 2008).
- 3) En la tercera asociación se observa al Cs, K y Rb (elementos alcalinos). Dentro de este grupo también se encuentra el Zr pero con una menor concentración, posiblemente relacionado a la presencia del mineral pesado zircón.

- 4) La cuarta asociación reúne al As, Ca, Cr, Ni y V. Los elementos Al, Ba y Na se agrupan entre ellos. La presencia de As (presente también en la primera asociación) indica que este elemento también se encuentra de forma natural dentro de la geología subyacente. Wray (1998) a pesar de encontrar concentraciones elevadas de Cu y Pb por causa antropogénica, también encontró que estaban asociados a la geología regional y aunque Wray encontró bajas concentraciones de esos elementos en los desechos, a diferencia de este trabajo, para el As, en donde se encontró niveles más altos en los desechos que en sedimentos fluviales, esto nos dice que probablemente los desechos de minería y fundición podrían ser otra fuente de este elemento en los sedimentos de arroyos.
- 5) Para la quinta asociación los elementos que encontramos son el Be, Th y U, y los elementos de tierras raras ligeras (La, Ce, Pr, Nd).

La amplia variedad de asociaciones de elementos nos sugiere que en la zona existen varias fuentes, no solo antropogénicas sino también diferentes fuentes naturales. Probablemente esto está relacionado a la presencia de diferentes tipos de rocas como fuente de material sedimentario erosionado. Sin embargo, para una mejor interpretación es necesario realizar un análisis petrográfico de las rocas circundantes y un análisis mineralógico de los sedimentos de arroyos.

#### Asociaciones en muestras de la plataforma continental

- 1) La primera asociación está compuesta por los elementos Al, Cr, Fe, Li, Sc y Ti (indicadores de material terrígeno) (Poulton y Raiwell, 2000), por los ETR que no es sorprendente por tener altas sus concentraciones y también incluyen los elementos As y Zn (posibles contaminantes) lo que evidencia que podrían estar siendo incorporados en las partículas terrígenas y ser transportados desde la península al mar.
- 2) La segunda asociación incluye los componentes  $C_{org}$  y  $CaCO_3$ , y los elementos Ca y Sr, los cuales están asociados a origen biogénicos marino.

- 3) De manera individual se comporta el Cd en sedimentos de profundidades menores, posiblemente aportado por descargas de los poblados El Sargento y La Ventana. Debido a la presencia significativa de este elemento en la Cuenca de San Juan de Los Planes se infiere que este elemento es aportado en parte por sedimentos terrígenos al ambiente marino. Por otra parte se infiere que este elemento junto con Sb, probablemente son de origen marino que vienen desde profundidades con las surgencias costeras, siendo micronutrientes se incorporan en el fitoplancton y se deposita en los sedimentos dentro de la materia orgánica particulada no remineralizada.
- 4) La última asociación en sedimentos de la plataforma continental la constituyen el Pb y Th asociados a partículas de tamaño de gravas, por lo que se infiere que estos elementos fueron introducidos desde la península al mar de forma natural, esto debido a que se ha reportado que los ET están asociados a las partículas finas (Salomons and Förstner, 1984; De Groot *et al.*, 1982) y que por estar asociado a las gravas podría provenir de la erosión de las rocas de la cuenca.

Elementos del grupo de las tierras raras.

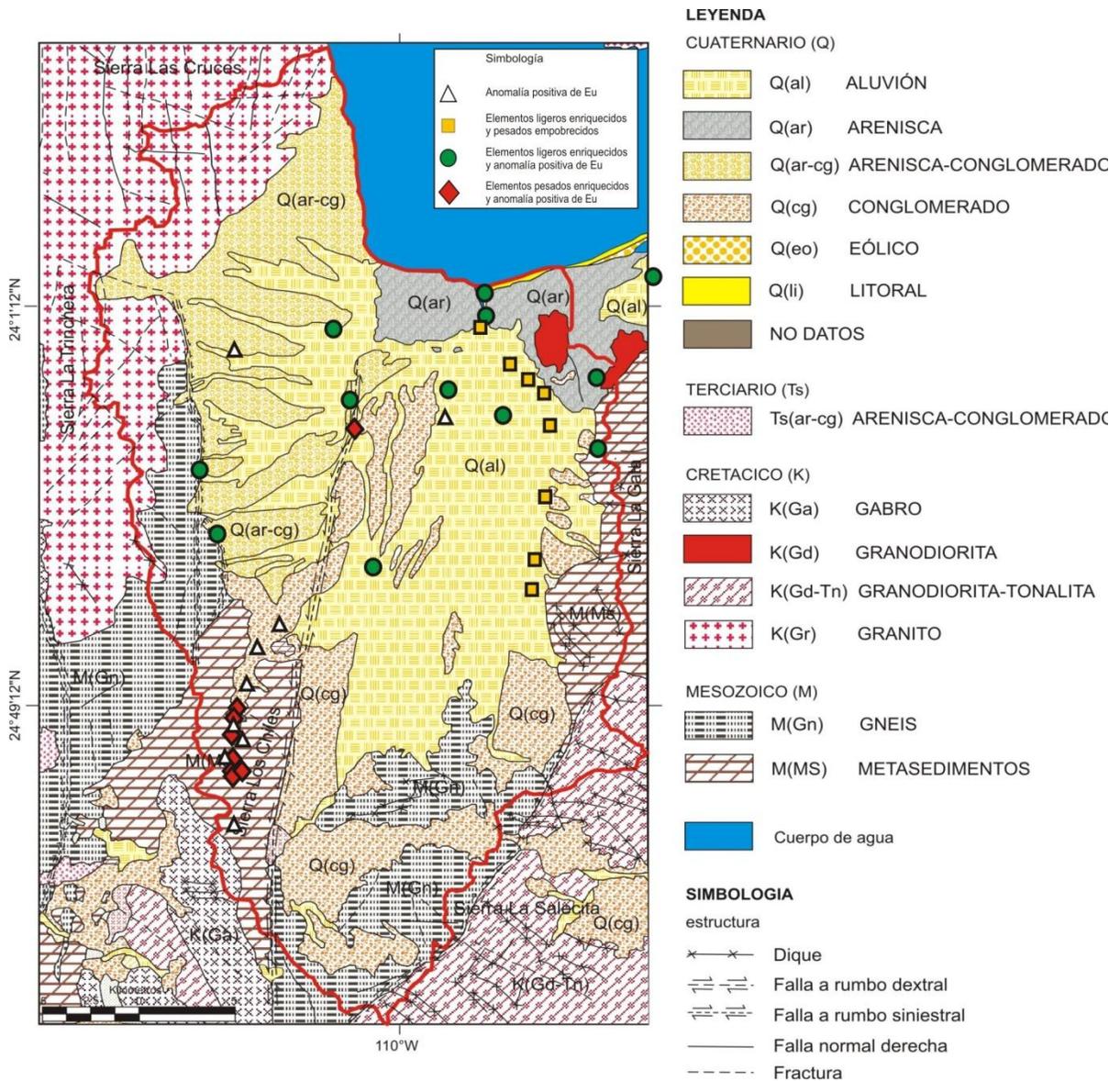
Los contenidos de ETR normalizados (Figura 51) con respecto a la lutita norteamericana en los diferentes ambientes de depósito se caracterizaron por (i) tener anomalía positiva de Eu, (ii) enriquecimiento de elementos ligeros y empobrecimiento de elementos pesados, (iii) enriquecimiento de elementos ligeros con anomalía positiva de Eu y (iv) enriquecimiento de elementos pesados con anomalía positiva de Eu.

(i) *Anomalía positiva de Eu.* Valores cercanos a dos pueden indicar posible fuente hidrotermal, como fue el caso de Santa Rosalía, B.C.S. (Shumilin *et al.*, 2005). En nuestra área de estudio obtuvimos valores cercanos a uno (Tabla 4), representativos de condiciones normales. Este patrón ha sido reportado por otros autores en estudios sobre hidrotermas submarinas (Canet *et al.*, 2005; Michard y Albarede, 1986) y áreas tectónicas y volcánicas (Sifeta *et al.*, 2005; Jake y Taylor, 1974).

(ii) *Enriquecimiento de elementos ligeros y empobrecimiento de elementos pesados.* Este patrón es típico de material terrígeno del macizo continental del noroeste de México y para los granitos en general (Cornell, 1993). Ha sido reportado para suelos de desechos del distrito minero de Santa Rosalía por Rodríguez Figueroa (2004).

(iii) *Enriquecimiento de elementos ligeros con anomalía positiva de Eu.* Estas características han sido reportadas por Shumilin *et al.* (2005), donde mencionan que la anomalía positiva de Eu está relacionada con los desechos de fundición del mineral de cobre de procedencia hidrotermal y con arena de playa, y que el enriquecimiento de los elementos ligeros es indicativo de aporte terrígeno. Dentro de Bahía La Ventana encontramos estas características en la porción centro-sur muy cerca de la línea de costa, lo que nos evidencia aporte de materiales de la planta de fundición, y en la parte norte alejado de la costa, esto probablemente se deba a que el material terrígeno que llega a la bahía esté siendo movilizado hacia el norte de la bahía por la circulación por corrientes.

(iv) *Enriquecimiento de elementos pesados con anomalía positiva de Eu.* Este patrón fue reportado como indicativo de hidrotermalismo en el distrito minero de Santa Rosalía por Shumilin *et al.* (2005), ellos mencionan que la anomalía positiva de Eu es un argumento opcional que sostiene la hipótesis propuesta por Escandón (1995) donde dice que este patrón es típico de origen marino hidrotermal. En nuestro caso, se observaron estas características donde se tienen altas concentraciones de los elementos contaminantes como As, Cr, Cu y Pb, por lo que se evidencia que el origen de los yacimientos procesados para la extracción de oro son de origen hidrotermal.



**Figura 51.** Distribución espacial de los patrones de las características de los ETR normalizados con Lutita norteamericana de los sedimentos de desechos de minería y fundición en San Antonio y arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

## 9. CONCLUSIONES

1) Los sedimentos de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes y los sedimentos de playa, duna y plataforma continental de Bahía La Ventana en general revelan la predominancia de las partículas de arena gruesa y en su mayoría partículas finas.

En la Cuenca de San Juan de Los Planes la presencia de los tamaños de arena muy gruesa son típicas para los sedimentos de las partes altas, mientras que en las partes bajas en el centro de la cuenca (depocentro) las arenas en su mayoría son gruesas y en las planicies de inundación se pueden observar tanto arenas finas, como limos y arcillas.

En Bahía La Ventana las dunas sedimentológicamente están compuestas por arenas medias y gruesas, típico para dunas. La playa presenta arena gruesa siendo una playa de alta energía. La plataforma continental presenta sedimento compuesto por arenas que van de gruesas a finas, con excepción de las áreas en donde las descargas continentales son dominantes, como en el arroyo El Zotol al oeste de la bahía y las descargas a través de La Bocana en la costa sur, en donde se presenta limo arcilloso.

2) En los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes el sedimento de acuerdo a los parámetros de selección y sesgo muestran una selección muy pobre y muy sesgada hacia los finos en las partes bajas de la cuenca. En Bahía La Ventana, los sedimentos de dunas se encuentran bien seleccionados a moderadamente seleccionados con distribución simétrica. Los sedimentos de playa presentan buena selección en la porción sur, sin embargo en los extremos al norte y este (frente a Punta Arenas) de la línea de costa la selección no es muy buena, la tendencia en los extremos es hacia los finos y en el centro es hacia los gruesos, esto indica que la costa oeste tiene mayor influencia del ambiente terrestre sobre el marino, y en la parte sur de la costa dominan los procesos marinos. En Punta Arenas las condiciones en la costa parecen estar influenciadas por la dinámica del canal Cerralvo y por condiciones externas fuera

de la bahía y los sedimentos de la plataforma continental de las áreas cercanas a la costa tienen mejor selección. Frente a La Bocana, área de influencia continental la selección disminuye. En general los sedimentos de la bahía están sesgados hacia los gruesos.

3) Las concentraciones promedio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de los elementos potencialmente tóxicos en el material sedimentario de la zona de estudio presentan las secuencias que a continuación se describen. Desechos de minería y fundición: As (71682) > Pb (2654) > Zn (233) > Cu (148) > Sb (102) > Cd (10), sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes: As (3099) > Pb (145) > Zn (43) > Cd (2.5) > Cu (2.5) > Sb (1), playa en Bahía La Ventana: Zn (11) > Pb (4) > Cu (0.5) > As (0.2) > Cd (0.05) y plataforma continental de la bahía: Zn (25) > Pb (14) > Cu (6) > As (2) > Cd (0.8) > Sb (0.8). Presentándose el As en altas concentraciones en los desechos y sedimentos fluviales y por otro lado Pb y Zn tienen contenido alto en los tres ambientes de depósito. En la zona de estudio prácticamente no se observa contaminación por Hg, con excepción de la playa suroeste de la bahía.

4) Los factores de enriquecimiento de los elementos promedio en desechos de minería y fundición muestran la siguiente secuencia: As (2478) > Sb (214) > Cd (47) > Pb (31) > Se (19) > S (15) > Cu (5), para los sedimentos de arroyos: As (85) > Sb (7) > Cd (5) > Ba (4) > Pb (3) > Al (3) > Cr (2), y para los sedimentos de la plataforma Cd (73) > Se (55) > Mg (53) > Sr (34) > Sb (29) > Ca (29) > Ba (15) > Na (13) > S (10) > Pb (9) > As (8) > Li (6) > K (5). De estas secuencias observamos que en los diferentes ambientes de depósito el As, Cd, Pb y Sb se encuentran presentes en concentraciones altas.

5) Las asociaciones de los parámetros (granulometría y profundidad), componentes, elementos mayoritarios y traza que se obtuvieron del análisis de factores para el material sedimentario de los desechos de minería y fundición y sedimentos de arroyos fueron: i) Ce, Co, Cr, Cs y otros, y los ETR; ii) elementos considerados como contaminantes As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn, y otros elementos como Be, Co, Mo, S, Se y Zr; iii) elementos alcalinos (Cs, K, Rb) asociados con

Zr; iv) Al, As, Ba, Ca, Cr, Na, Ni y V; v) Be, Th y U, y algunos ETR como Ce, La, Nd y Pr, y para los sedimentos de la plataforma continental las asociaciones fueron: i) los ETR y elementos de material terrígeno (Al, As, Cr, Fe, Li, Mn; Ni y otros); ii) profundidad, componentes ( $C_{org}$ ,  $CaCO_3$ ) y elementos de origen biogénico marino Ba, Be, K, Mg, Na S, Sr y U; iii) tamaños de partículas finas asociado con Cd; iv) Cd y Sb con la profundidad; v) Pb y Th con tamaños de partículas gruesas.

6) Con respecto a los criterios establecidos por Long *et al.* (1995) los elementos potencialmente tóxicos que podrían estar afectando a la biota en el material sedimentario de los desechos de minería y fundición son el Pb con 90% de efecto, le siguen el Cd con 66%, As 63%, Zn 43%, Hg 42% y Cu con 29%. Para los sedimentos fluviales el As podría afectar al 63% de la biota, el Hg al 42% y el Cd del 37%. En los sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana, de acuerdo a este criterio los elementos no presentan un riesgo potencial a la biota con excepción del Hg en la playa sureste, con un 23%.

## 10. RECOMENDACIONES

Los elementos metales y metaloides (ET) como el As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn, presentes en el área de estudio, no pueden destruirse por vía biológica ni fisicoquímica, es por eso que se recomienda que en los sitios identificados como de alto riesgo para la biota por estos elementos potencialmente tóxicos se les apliquen, a los sedimentos, análisis que estén dirigidos a conocer la especie química, concentración, biodisponibilidad, solubilidad y toxicidad de los elementos, y con esta información centrarse en la modificación de su solubilidad, movilidad y/o toxicidad para finalmente poder definir las acciones de remediación de estos sitios.

Se identificó a los desechos de minería y fundición como los focos de contaminación con niveles más altos en la Cuenca de San Juan de Los Planes y Bahía La Ventana a través del arroyo San Antonio, sin embargo se presentan otros arroyos dentro de esta cuenca de los cuales se desconoce le fuente de aporte de los contaminantes, por lo que se sugiere llevar a cabo una exploración detallada de los patrones de dispersión de estos focos de contaminación.

Debido a que en la planta de fundición de Los San Juanes en San Antonio y los desechos de minería dispersados por la región, mostraron que de acuerdo a la guía de calidad de sedimentos propuesta por la NOAA (Long *et al.*1995), elementos como As, Cd, Cu, Hg, Pb, y Zn, y aunque en esta guía no se incluye al Sb y dado que lo encontramos con concentraciones elevadas, todos estos elementos se encuentran en la posible situación de causar efectos a la biota. Y probablemente el As, Cd, Hg, entre otros estén siendo transportados en épocas de lluvias o por viento a los sedimentos de arroyos, ya que se encontró un posible efecto de estos en el ambiente fluvial, se sugiere que estos sitios se consideren como prioritarios para los trabajos de remediación y que a la brevedad posible no se permita el acceso a estos sitios acordonándolos y colocando señalamientos del riesgo que representan estos materiales.

Por lo que se observó, los desechos de minería y fundición presentan de escasa a nula vegetación, tienen coloración rojiza y presentan sedimentos de grano fino a muy fino, el cual debido a su tamaño es susceptible a ser movilizadopor el aire, por lo que se sugiere identificar su movilidad en el aire instalando trampas de sedimento, definir el radio de influencia de estos polvos dentro de la cuenca y llevar a cabo los trabajos pertinente de remediación de los sitios bajo la influencia de polvos contaminados. Así mismo, como lo demostró Carrillo (1996) en sus estudios del acuífero de Los Planes que estos desechos, algunas especies químicas de As son hidrolizadas, dando así a la formación de radicales libres de arsénico. Dichas especies químicas pueden ser altamente contaminantes, ya que solubles en el agua de lluvia pueden transferirse al medio marino en Bahía La Ventana. Dicho aporte puede ser por vía fluvial a través de los arroyos o por infiltración hacia el agua subterránea, y dadas las elevadas concentraciones de arsénico encontradas en los desechos, se deben monitorear los pozos de agua dentro de la cuenca. A su vez se contempla el aporte natural por intemperismo de las rocas que los contienen.

Por todo lo anterior es indispensable para futuros proyectos de explotación del mineral en la zona, que se efectúen programas de evaluación de los procesos de minería y de un mejor manejo sustentable para los desechos generados de dicha actividad a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a daños posibles.

## 11. LITERATURA CITADA

- Adaikpoh, E.O., G.E. Nwajei & J.E. Ogala, 2005. Heavy Metals Concentrations in Coal and Sediments from River Ekulu in Enugu, Coal City of Nigeria. *J. Appl. Sci. Environ. Mgt.* 9(3):5-8.
- Adriano D.C., 1986. *Trace Elements in the Terrestrial Environment*. Springer, New York. 867 p.
- Ahnert, F., 1998. *Introduction to geomorphology*. Arnold, London, 360 p.
- Aksentov K.I., A.S. Astakhov, & E.N. Shumilin, 2009. Estimation of anthropogenic mercury pollution of the Peter the Great Bay bottom sediments (The Sea of Japan). "Environment Development of East Asia in Pleistocene-Holocene"(boundaries, factors, stages of human mastering). *Proceedings of International Conference* (14-18 September, 2009, Vladivostok, Russia) pp. 10-12.
- Anazawa, K., Y. Kaida, Y. Shinomura, T. Tomiyasu & H. Sakamoto, 2004. Heavy-Metal Distribution in river Waters and Sediments around a "Firefly Village", Shikoku, Japan: Application of Multivariate Analysis. *Analytical Sciences*, 20:79-84.
- Anikiev V.V., S.A. Perepelitsa, & E.N. Shumilin, 1994. Effects of man-made and natural sources on the heavy-metal patterns in bottom sediments in the Gulf of Peter the Great, Sea of Japan. *Geochemistry International*, 31: 73-85.
- Anónimo, 2003. Remediación de Sitios Contaminados por metales provenientes de Jales mineros en los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, B.C.S. Delegación de Investigación en Residuos y Proyectos Regionales. SEMARNAT-INE-CENICA, Informe final.
- Anónimo, 2005. Estudio de la calidad del agua en 500 pozos de Baja California Sur NIPARAJA-CONAGUA 2004-2005.

- Aslibekian, O. & R. Moles, 2002. Environmental risk assesmento of metals contaminated soils at silvermines abandoned mine site, CO Tipperary, Ireland. *Environmental Geochemistry and Healt*, 25:247-266.
- Balls, P.W., S. Hull, B.S. Miller, J.M. Pirie & W. Proctor, 1997. Trace Metal in Scottish Estuarine and Coastal Sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 34:42-50.
- Basilevsky, A., 1994. *Statistical analysis and related methods: Theory and applications*. Wiley New York. 737 p.
- Berrow, S.P., 1991. Heavy metals in sediments and shellfish from Cork Harbur, Ireland. *Marine Pollution. Bulletin*, 22:457-469.
- Bird, G., P.A. Brewer, M.G. Macklin, D. Balteanu, B. Driga, M. Serban & S. Zaharia, 2003. The solid state partitioning of contaminant metals and As in river channel sediments of the mining affected Tisa Drainage basin, northwestern Romania and eastern Hungary. *Applied Geochemistry*, 18:1583-1595.
- Blight, G.E., 1997. Disastrous mudflows as a consequence of tailings dyke failures. *Proceedingof the Institution of Civil Engineers – Geochemical Engineering*, 125:9-18.
- Blowes, D.W., C.J. Ptacek, J.L. Jambor & C.G. Weisener, 2003. The Geochemistry of Acid Mine Drainage. Pp. 149-204. In *Environmental Geochemistry* (ed. B.S.Lollar) Vol. 9 *Treatise on Geochemistry* (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elseiver - Pergamon, Oxford.
- Boggs, S., 1995. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Prentice Hall, New Jersey, 345 p.
- Boggs, S. Jr. 2001. *Principles of sedimentology and statigraphy*. Ed. Prentice Hall. 3th edition, 726 p.
- Callender, E., 2003. Heavy Metals in the Environment – Historical Trends. Pp. 149-204. In *Environmental Geochemistry* (ed. B.S.Lollar) Vol. 9 *Treatise on*

*Geochemistry* (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier - Pergamon, Oxford.

Camacho, V.V., 2003. Características morfodinámicas y texturales de los depósitos eólicos de Cabo Falso, Baja California Sur, México. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN, 152 p.

Canet, C., R.M. Prol-Ledesma, J.A. Proensa, M.A. Rubio-Ramos, M.J. Forrest, M.A. Torres-Vera & A.A. Rodríguez-Díaz, 2005. Mn-Ba-Hg mineralization at shallow submarine hydrothermal vents in Bahia, Baja California Sur, Mexico. *Chemical Geology*, 224:96-112.

Carrillo, A., 1996. *Environmental geochemistry of the San Antonio-El Triunfo mining area, southernmost Baja California Peninsula Mexico*. Ph. D. Thesis. Department of Geology and Geophysics, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA, 186 p.

Carrillo A. & H. Huyck, 1997. A generic model for the Los Uvares gold deposit, Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, 36(2):111-119.

Carrillo, A. & J.I. Drever, 1998. Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio-El Triunfo mining area, Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 35(4):251-257.

Carrillo, A. & J.I. Drever, 1998a. Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, 37(1):35-39.

Carrillo-Chávez, A., J.I. Drever and M. Martinez, 2000. Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 39 (11):1295-1303.

Carrillo, A. & H. Huyck, 1997. A genetic model for the Los Uvares gold deposit, Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, 36(2):111-119.

- Chandler, R.J. & G. Tosatti, 1995. The Stava tailings dam failure, Italy. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 113:67-79.
- Chester, R. 2003. *Marine Geochemistry*. Unwin Hyman. London, 506 p.
- Choumiline, E., L. Méndez Rodríguez, O. Morton Bermea, G.D. Rodríguez Meza, G. Rodríguez Figueroa, I. Sánchez Rodríguez & B. Acosta Vargas, 2006. *Evaluación biogeoquímica de los metales pesados en el ambiente marino del distrito minero de Santa Rosalía (B.C.S.)* CICIMAR-IPN. Informe técnico final Santa Rosalía 152 p.
- Clark, R.B., 2001. *Marine Pollution*. 5a Ed. Oxford, New York. 237 p.
- Cornell, D.H, 1993. Rare Earths from supernova to supernova to superconductor, *Pure & Appl. Chem.* 65-12: 2453-2464.
- Corona Esquivel R & F. Henríquez, 2004. Modelo magmático del yacimiento de Hierro Peña Colorada, Colima, y su relación con la exploración de otros yacimientos de oro en México. México D.F. UNAM. Instituto de Geología. *Boletín* 113 p.
- Cothorn, C. R., 1994. Trace Substances, Environment and Health. *Science Reviews*, 236 p.
- Courtois, C. and Hoffert, M., 1977. Distribution des terres rares dans les sédiments superficiels du Pacifique Sud Est. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, v. 7, p. 1245-1252.
- Covelli, S. & G. Fontolan, 1997. Application of the normalization procedure in determining regional geochemical baselines. *Environmental Geology*, 30:34-45.
- Daikumar S.J., N. Chandrasekar, S. Kumar, S. Krishna & G.V. Rajamanickam, 2010. Distribution of arsenic and mercury in subtropical coastal beachrock, Gulf of Mannar, India. *Journal of Earth System Science*, 119:129-135.
- Davis, R.A., 1985. *Coastal sedimentary environments*, 2<sup>nd</sup> ed. Springer-Verlag, New York, Inc. 714 p.

- Delgadillo-Hinojosa, F., J.V. Macías-Zamora, J.A. Segovia-Zavala & S. Tórres-Valdez, 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Marine chemistry*, 75:109-122.
- De Groot, A.J., Zchuppe and K.H., W. Salomons, 1982. Standardisation of methods of analysis for Heavy Metals in sediments. En: Sediment/Freshwater Interaction. *Hidrobiología*, 92:689-695.
- Del Rosal Pardo, A., 2003. *Recarga natural en la Cuenca de San Juan de Los Planes, Baja California Sur, México*. Tesis para obtener el título de Licenciatura en Geohidrología. UABCS, 142 p.
- Dinelli, E. & F. Tateo, 2001. Factors controlling heavy-metal dispersion in mining areas: the case of Vigonzano (northern Italy), a Fe-Cu sulfide deposit associated with ophiolitic rocks. *Environmental Geology*, 40:1138-1150.
- Douglas G. & J. Adeney, 2000. Diagenetic cycling of trace elements in the bottom sediments of the Swan River Estuary, Western Australia. *Applied Geochemistry* 15:551-566.
- Edwards, R., 1996. Toxic sludge flows through the Andes. *New Scientist*, 21 Nov 1996, 4 p.
- Elbaz-Poulichet, F. & C. Dupuy, 1999. Behavior of the rare earth elements at the freshwater-seawater interface of two acid mine rivers: The Tinto and Odiel (Andalucía, Spain). *Appl Geochem*, 14:1063-1072
- Esterman, A.J. & Maynard E.J., 1998. Changes in Airborne Lead Particulate in Port Pirie, South Australia, 1986-1996. *Environmental Research*, 79(A):122-132.
- Finney, B.P. & C.A. Hugh, 1989. History of metal pollution in the southern California Bight: an update. *Environmental Science and Technology*, 23:294-303.

- Fleet, M. E., 1984. Environmental Geochemistry. *Mineralogical Association of Canada*, 10:306.
- Flury, B. & H. Riedwyl, 1988. Multivariate Statistics: A Practical Approach. Chapman & Hall Statistics Text Series. London and New York, 296 p.
- Folk, R. L., 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing, Austin, Texas, 182 p.
- Förstner U. & G.T.W. Wittman, 1983. *Metal Pollution in the Aquatic Environment* (2<sup>nd</sup> edn.), Springer Verlag, Berlin.
- Galvan, I., & G. Corey, 1987. Arsénico: *Organización Panamericana de la Salud*, Metepec, México.
- García-Guinea, J. & M. Huascar, 1997. Mining waste poisons river basin. *Nature*, 387:118.
- Gerlach S.A., 1981. Marine Pollution: Diagnosis and Therapy. Springer Verlag, Berlin.
- González-Yajimovich, O. E. & J. Ledesma-Vázquez, 2001. *Manual de prácticas para el laboratorio de introducción a la sedimentología*. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas. Ensenada, Baja California, 46 p.
- González-Yajimovich, O., 2010. Sediment transport trends in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico, based on textural parameters and heavy mineral concentrations. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(2):281-304.
- Greaves, M.J., H. Elderfield & E.R. Sholkovitz, 1999. Aeolian sources of rare earth elements to the western Pacific Ocean. *Mar. Chem.*, 68:31-37.
- Grajeda Muñoz, M., 2005. *Geoquímica de los elementos de tierras raras en el ambiente acuático*. Ensayo escrito para el examen pre doctoral. CICIMAR-IPN.

- Guzmán, H.M. & C.E. Jiménez, 1992. Contamination of coral reefs by heavy metals along the Caribbean coast of Central America. *Marine Pollution Bulletin*, 24:494-500.
- Hendrick, J.B., 1995. The global rare-earth cycle. *J. Alloys Compds*, 225:609-618.
- Hilts S.R., 2003. Effect of smelter emission reduction on children's blood lead levels. *Sci. Total Environ* 3003: 51-58.
- Jackson, L.L., F.W. Brown & S.T. Neil, 1987. Major and minor elements requiring individual determination, classical whole rock analysis, and rapid rock analysis: *U.S. Geological Survey Bulletin* 1770:1–23.
- Jake, P. & S.R. Taylor, 1974. Excess europium in Precambrian sedimentary rocks and continental evolution. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 38: 739-745.
- Komar, P.D., 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Engewood Cliff, NJ: Prentice Hall. 429 p.
- Kot F.S., Green-Ruiz C, Páez-Osuna F., Shumilin E., Rodríguez-Meza D, 1999. Distribution of mercury in sediments from La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 63: 45-51.
- Kot F., E. Shumilin, G. Rodríguez-Figueroa and N. Mirlean, 2009. Mercury dispersal to arroyo and coastal sediments from abandoned copper mine operations, El Boléo, Baja California. *Bull. Environ. Contamin. Toxicol*, 82(1):20-25.
- Krumbein, W. & F. Pettijohn, 1938. *Manual of sedimentary petrography*. Appleton Century Crofts, New York, 549pp.
- Leal-Acosta, M.L., 2008. Caracterización geoquímica de los sedimentos del Sistema Lagunar Ohiura-Topolobampo-Santa María. Tesis de maestría CIDIR-IPN, 104 p.

- Leal Acosta M.L., E. Shumilin, N. Mirlean, D. Sapozhnikov and V.Gordeev, 2010. Arsenic and mercury contamination of sediments of geothermal springs, mangrove lagoon and the Santispac bight, Bahía Concepción, Baja California peninsula. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85:609-613.
- Leal-Acosta M.L., E. Shumilin and N. Mirlean, (in press). Geochemistry of shallow submarine hydrothermal vent sediments in Mapachitos, Bahía Concepción, Baja California peninsula, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Li Y. H., 2000. *A compendium of Geochemistry*. Princeton University Press, Princeton. 440p.
- Lizárraga, C. R., 2007. *Implementación de Técnica Analítica para la determinación de Arsénico III y V en aguas de consumo humano*. Tesis de Ingeniería Bioquímica. Instituto Tecnológico de Mazatlán, UNAM. 76 pp.
- Lizárraga Mendiola, L.G., 2008. *Afectación de una presa de jales de sulfuros masivos a la hidrogeoquímica de los escurrimientos superficiales aledaños*. Tesis de Doctor en Ciencias. Geología Ambiental. Instituto de Geofísica, UNAM. 246 p.
- Long, E.R., D.D. Macdonald, S.L. Smith & F.D. Calder, 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ. Manag*, 19:81-97.
- Lorber, K.E. & W. Erhart-Schipppek, 2000. *AURUL-Dam, Baia Mare and NOVAT-Dam, Baia Borsa, Naramures County, Romania. Report on fact-finding mission 16.04.-18.04.2000*. Report prepared for the World Wide Fund for Nature, Danube Carpathian Programme Office, Vienna. Montanuniversität Leoben, Austria, 83 p.
- Loring D. H., 1991. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 48,101-115.

- Macklin, M.G., I. Payne, D. Preston & C. Sedgwick, 1996. *Review of the Porco mine tailings dam burst and associated mining waste problems, Pilcomayo basin, Bolivia*. University of Wales, Aberystwyth. Report to the UK Overseas Development Administration, 33 p.
- Marmolejo-Rodríguez, A.J., R. Prego, A. Meyer-Willerer, E. Shumilin and A. Cobelo-García, 2007. Total and labil metals in surface sediments of the tropical river-estuary system of Marabasco (Pacific coast of Mexico): Influence of an iron mine. *Mar. Pollut. Bull.*, 55:459-468.
- Martínez, F.M.A., 1998. *Contenido de Arsénico en el Agua subterránea de la Zona Minera de San Antonio, B.C.S., México: Relación de los Yacimientos Minerales y Obras Mineras*. Tesis de Licenciatura en Geología. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 62 pp.
- Mitra, A., H. Elderfield & M.J. Greaves, 1994. Rare earth elements in submarine hydrothermal fluids and plumes from the Mid-Atlantic Ridge, *Mar. Chem.*, 46:217-235.
- McLachlan, A. 1949. *The ecology of sandy shore*. Elsevier. 373 p.
- McManus, 1988. Techniques in sedimentology. En: M. Tucker (Ed.) *Blackwell Sc. Publ*, 65-85.
- Michard, A. & F. Albarede, 1986. The REE content of some hydrothermal fluids. *Chemical Geology*, 55: 51-60.
- Monroy, M., F. Diaz-Barriga, I. Razo & L. Carrizales., 2002. Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P. Nota informativa publicada en la página de la agencia ambiental de la U.A.S.L.P. México.
- Moody, J.R. & R.M. Lindstrom, 1997. Selection and cleaning of plastic containers for storage of trace element samples. *Analytical Chem.* 49(14)2265-2267

- Morrison A.L., 2003. An assessment of the effectiveness of lead pollution reduction strategies in North Lake Macquarie, NSW, Australia. *Sci. Total Environ* 303: 125-138.
- Moss, A. & S. Constanzo, 1998. *Levels of heavy metals in the sediments of Queensland rivers, estuaries and coastal waters*. Environment technical report no. 20. 8p.
- Mugica, V., Ma A. Amador, M Torres & J. J. Figueroa, 2003. Mercurio y Metales tóxicos en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración. *Rev.Int. Contam. Ambient*, 19 (2):93-100.
- Müller, G. 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seitt 1971. *Umschau*. 79, 778.
- Naranjo-Pulido, A., H. Romero-Schmidt, L. Mendez-Rodríguez, B. Acosta-Vargas & A. Ortega-Rubio, 2002. Soil arsenic contamination in the Cape Region, B.C.S., Mexico. *Journal of Environmental Biology*, 23(4):347-352.
- Naranjo, A., 2004. *Estudio de la contaminación por arsénico en agua, suelo y plantas de la Región Del Cabo en Baja California Sur, México*. Tesis de Maestro en Ciencias en Ecología y Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de México. 84 p.
- Narayan, K., 1998. Groundwater contamination: the Omai Case. In: Wheater, H. & C. Kirby (eds.), *Hydrology in a Changing Environment*. (Proceeding of the International Symposium organized by the British Hydrological Society, 6<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> July 1998, Exeter, UK). Wiley, Chichester. Volume II, 41-46 p.
- Nava Sánchez, E. H., 1992. *Sedimentología de la Cuenca San Juan de Los Planes, Baja California Sur, México*. Tesis de Maestro en Ciencias, CICIMAR-IPN, 178 p.

- Navarro Lozano, J.O., 2006. *Caracterización sedimentológica y geomorfológica de los ambientes costeros en La Bahía San Lucas, Baja California Sur, México*. Tesis de Maestro en Ciencias. CICIMAR-IPN, 157 p.
- Nriagu, J.O., 1979. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. *Nature*, 279:409-411.
- Nriagu, J.O. & J.M. Pacyna, 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*: 6169 (333):134-139.
- Olmez, I., E.R. Sholkovitz, D. Hermann, & R.P. Eganhouse, 1991. Rare Earth element geochemistry of southern California: a new anthropogenic indicator. *Environmental Science and Technology*, 25:310–316
- Olvera D., 2008. *Uso de la planta gobernadora (Larrea tridentada) como indicador de contaminación por metales pesados (As, Cd y Pb)*. Tesis de Licenciatura, ITMAZ. 78p.
- Ortega Gutiérrez, F., 1982. Evolución magmática y metamórfica del complejo cristalino de La Paz, baja California Sur. *Soc. Geol. Mex. Resúmenes VI convención*, 90 p.
- Osher, L.J., L. Leclerc, G.B. Wiersma, C.T. Hess & V.E. Guiseppe, 2006. Heavy metal contamination from historic mining in upland soil and estuarine sediments of Egypt Bay, Maine, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70:169-179.
- Pérez Briceño, A., 2009. *Elaboración de un modelo hidrogeológico de la Cuenca San Juan de Los Planes, B.C.S., Mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG) y un modelo digital de elevación (MDE)*. Tesis de Licenciatura en Geología. Universidad Autónoma de Baja California Sur, 132 p.
- Pérez Venzor, J.A., 1993. *Estudio geológico de las sierras Santa Martha y La Gata, B.C.S.* Segunda reunión internacional sobre la geología de la Península, p. 52 (resumen).

- Poulton S.W. and R. Raiwell, 2000. Solid phase associations, oceanic fluxes and the anthropogenic perturbation of transition metals in world river particulates. *Mar. Chem.*, 72, 17-31.
- Polyakov D.M., M. Virtsavs. S.I. Kozlova, A.A. Lobanov, T.A. Zadonskaya, & E .N. Shumilin, 1992. Mercury content in components of the ecosystem of the Gulf of Peter the Great. *Vodnye-Resursy*, num.5, pp.484- 490
- Raisz, E.W., 1959. (2a Ed. Corregida 1964) Landforms of Mexico: Physiographic Provinces. Geography Branch of the Office of Naval Research, USA. (1 carta)
- Razo, I., L. Carrizales & J. Castro, 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152:129-152.
- Riley, J.P. & R. Chester, 1971. *Introduction to marine chemistry*. London; Academic Press, 465 p.
- Robles, G., S., 1985, *Estudio Geográfico del Estado de Baja California Sur*. Dir. De Cult., Gob. de B.C.S., México, 203 p.
- Roden, G.I., 1964. Oceanographic aspects of Gulf of California. Marine geology of the Gulf of California, T.H. Van Andel, G.G. Shor, (Eds.), *American Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 3: 30-58.
- Rodríguez Castañeda, A.P., 2002. Elementos mayores y traza en sedimentos y macroalgas de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, 153 p.
- Rodríguez Figueroa, G., E. Shumilin, F. Páez-Osuna, E. Nava-Sánchez & D. Sapozhinikov, 1998. *Ocurrencia de metales y metaloides en sedimentos superficiales de cuatro abanico-delta de la costa oriental de Baja California Sur*. *Actas INAGEQ*, 4:43-50

- Rodríguez Figueroa G., 2004. *Geoquímica de los elementos mayoritarios, oligoelementos y lantánidos en los sedimentos del distrito minero de Santa Rosalía, La Paz, B.C.S.* Tesis de Maestro en Ciencias. CICIMAR-IPN, 137 p.
- Rodríguez Figueroa G., 2010. *Niveles de contaminación por metales pesados en las zonas costeras de Santa Rosalía: sedimentos y macroalgas.* Tesis de Doctor en Ciencias. CICIMAR-IPN, 178 p.
- Rodríguez Meza, G.D., 2004. Caracterización geoquímica por componentes mayores y elementos traza de sedimentos de los ambientes marinos adyacentes a la península de Baja California. Tesis Doctoral CICIMAR-IPN, 279 p.
- Rodríguez Meza D., Choumiline E., Méndez Rodríguez L., Acosta Vargas B., Sapozhnikov D., 2007. *Caracterización geoquímica del complejo lagunar Magdalena-Almejas: sedimentos y macroalgas.* En: Funes Rodríguez R, Gómez Gutiérrez J, Palomares García R (eds). *Estudios Ecológicos en Bahía Magdalena.* CICIMAR, La Paz
- Romero, F.M., M.A. Armienta, M.E. Gutiérrez & G. Villaseñor, 2008. Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de los jales mineros. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 24(2): 43-54.
- Romero Gil, J.M., H.J. Heath & I. Rivas Hernández, 2002. Noroeste minero La minería en Sonora, Baja California y Baja California Sur durante el porfiriato. Playa y Valdez editores. México, 168 p.
- Romero-Guadarrama, J.A., A.J. Marmolejo-Rodríguez, M.A. Sánchez-Martínez, A. Sánchez-González & V.R. Magallanes-Ordóñez, 2010. Mercury in sediments from a drainage catchment basin of the Au mining district of El Triunfo, B.C.S., Mexico. En: Torres-Alvarado, I.S. (Ed.) *Water-Rocks Interaction XIII.* CRC Press. London UK. 1008 p.

- Romero, L., H. Alonso, P. Campano, L. Fanfani, R. Cidu, C. Dadea, T. Keegan, I. Thornton & M. Farago, 2003. Arsenic enrichment in waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile). *Applied Geochemistry*, 18:1399-1416.
- Rose, M., J. Lewis, N. Langford, M. Baxter, S. Oraggi, M. Barber, H. MacBain & K. Thomas, 2007. Arsenic in seawater-Forms, concentration and dietary exposure. *Food and Chemical Toxicology*, 45(7):1263-1267
- Ross, T.S. & S. McLennan, 1985. The Continental Crust: its composition and evolution: An examination the geochemical record preserved sedimentary rocks. Geoscience Texts. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- Rubio, B., M.A. Nombela & F.Vilas, 2000. La contaminación por metales pesados en las Rías Baxias gallegas: nuevos valores de fondo para la Ría de Vigo (NO de España). *Journal of Iberian Geology*, 26:121-149.
- Rubio, B., M. A. Nombela & F. Vilas, 2000a. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): An assessment of metal pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 40: 968-980.
- Rubio, B., M.A. Nombela & F.Vilas, 2001. A critical evaluation of the use of cluster analysis to identify contaminated sediments in the Ría De Vigo (NW Spain). *Ciencias Marinas*, 27(2):175-208.
- Ryan, J.D. & H.L. Windom, 1988. A geochemical and statistical approach for assessing metal pollution in coastal sediments. En: U. Seeliger (ed.) *Metals in Coastal environments of LatinAmerica*. Springer-Verlag, Berlin. pp. 47-58.
- Salomons, W. & U. Förstner, 1984. *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag, Berlin, 349 p.
- Schiff K. C. and S. B. Weisberg, 1999. Iron as a reference elements for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments; *MarineEnvironmental Research*, 48: 161–176.

- Sholkovitz, E.R., 1995. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquatic Geochem.*, 1:1-34.
- Shulkin V.M., 1998. Pollution of the coastal bottom sediments at the Middle Primorie (Russi) due to mining activity. *Environ. Pollut.*, 101:401-404.
- Shumilin, E.N., G. Rodriguez-Figueroa, O. Morton-Bermea, E. Lounejera, E. Hernandez & G. Rodríguez-Meza, 2000. Anomalous trace elements composition of coastal sediments near the copper mining district of Santa Rosalía, Península of Baja California, México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 65:261-268.
- Shumilin E., F. Páez- Osuna, C. Green- Ruiz, D. Sapozhnikov, G. Rodríguez-Meza & L.Godínez- Orta, 2001. Arsenic, antimony, selenium and other trace elements in sediments of the La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico. *Mar.Pollut.Bull.*,42, 174-178.
- Shumilin E., Grajeda-Muñoz M., Silverberg N. and D. Sapozhnikov, 2002. Observations on trace element hypersaline geochemistry in surficial deposits of evaporation ponds of Exportadora de Sal, Guerrero Negro, Baja California Sur, Mexico. *Mar. Chem.*,79, 133-153.
- Shumilin E., G. Rodríguez-Figueroa & D. Sapozhnikov. 2005, Lanthanide contamination and strong europium positive anomaly in the surface sediments of the Santa Rosalia copper mining region, Baja California peninsula, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 75:308:315.
- Shumilin E., A. Meyer-Willerer, A.J. Marmolejo-Rodríguez, O. Morton-Bermea, M.A. Galicia-Pérez, E. Hernández & G. González-Hernández, 2005a. Iron, cadmium, chromium, copper, cobalt, lead and zinc distribution in the suspended particulate matter of the tropical Marabasco River and its estuary, Colima, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74:518-525.
- Shumilin E., G.D. Rodríguez Meza, D. Sapozhnikov, S. Lutsarev & J. Murillo de Nava, 2005b. Arsenic concentrations in the surface sediments of the

- Magdalena-Almejas Lagoon complex, Baja California Peninsula, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74: 493-500.
- Shumilin E., V. Gordeev, G. Rodriguez Figueroa, L. Demina & K. Choumilin, 2011. Assessment of geochemical mobility of metals in surface sediments of the Santa Rosalia mining region, western Gulf of California. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 60:8-25.
- Siegel F. R., J. H. Kravitz & J. J. Galasso, 2000. Arsenic and mercury contamination in 31 cores taken in 1965, St. Anna Trough, Kara Sea, Arctic Ocean; *Environmental Geology*, 40: 528–542.
- Sifeta, K., B.P. Roser & J.I. Kimura, 2005. Geochemistry, provenance, and tectonic setting of Neoproterozoic metavolcanic and metasedimentary units, Werri área, Northern Ethiopia. *Journal of African Earth Science*, 41: 212-234.
- Sinex, S.A. & D.A. Wright, 1998. Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 19:425-431.
- Taylor S.R. & S.M. McLennan, 1985. *The continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific, Oxford, 312 p.
- Thornton, I., 1993. Environmental Geochemistry and health in the 1990s: a global perspective. *Applied Geochemistry, Suppl. 2*:203-210.
- Valente T.M. & C.L. Gomes, 2007. The role of two acidophilic algae as ecological indicators of the acid mine drainage site. *Journal of Iberian Geology*, 33(2):238-294.
- Van Andel, T.H., 1964. Recent marine sediments of Gulf of California. En: T.H. Van Andel and G.G. Shor, Jr., eds.; *Marine Geology of the Gulf of California*. AAPG, *Memoir* 3:216-310.
- Van Aardt, W.J. & Erdmann R., 2004. Heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn) in mudfish and sediments from three hard-water dams of the Mooli River catchment, South Africa. *Water SA*, 30(2):211-213.

- Viers, J., B. Dupré & J. Gaillardet, 2008. Chemical composition of suspended sediments in World River: New insights from a new database. *Science of the total Environment*, 407:853-868.
- Vizcaíno, F., 1975. *La contaminación en México*. Fondo de cultura económica. México, D.F. 513p.
- Wedepohl, Kh., 1995. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59:1217-1232.
- Willerer A.O.M., Kot F.S., Shumilin E.N., Lutsarev S., Marmolejo Rodríguez A.J., 2003. Mercury in Bottom Sediments of the Tropical Rio Marabasco, its Estuary and Laguna Navidad, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 70, 1213-1219.
- Wilson, B., B. Lang & F. Brian Pyatt, 2005. The dispersion of heavy metals in the vicinity of Britannia Mine, British Columbia, Canada. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60:269-276.
- Wray, D.S., 1998. The impact of unconfined mine tailing and anthropogenic pollution on a semi-arid environment – an initial study of the Rodalquilar mining district, south east Spain. *Environmental Geochemistry and Health*, 20:29-38.
- Zitko, V., 1994. Principal Component Analysis in the Evaluation of Environmental Data. *Marine Pollution Bulletin*, 28:718-722.
- Züllig, H., 1956. Sedimente als Ausdruck des Zustandes eines Gewässers. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 18: 7-143.

## Apéndice 1

**Tabla 11.** Localización de las muestras tomadas de los desechos de minería y fundición en San Antonio

<b>Muestra</b>	<b>Descripción</b>	<b>Longitud W</b>	<b>Latitud N</b>
C1	Pared de la cámara de sublimación	110.05492	23.78682
C2	Piso de la cámara de sublimación	110.05492	23.78682
J1	Jale	110.05492	23.78682
T1	Terrero	110.05492	23.78682
T2	Terrero	110.05691	23.79844
T3	Terrero	110.05218	23.80122

**Tabla 12.** Parámetros texturales de los sedimentos de arroyos, donde A=arcilla, LMF=limo muy fino, AF=arena fina, AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobrementemente seleccionado, MPS=muy pobrementemente seleccionado; MSG=muy sesgado a los gruesos, SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos

<b>Muestra</b>	<b>Longitud W</b>	<b>Latitud N</b>	<b>% Limos</b>	<b>% Arenas</b>	<b>% Gravas</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Grado de selección</b>	<b>Tendencia</b>
A 1	110.05552	23.76034	6.0	71.0	23.0	0.903/AG	2.166/MPS	1.173/SF
A 2	110.05422	23.76564	3.0	76.0	21.0	0.262/AF	1.697/PS	2.43/MSF
A 3	110.01509	23.77011	0.0	18.0	82.0	-0.695/AMG	0.419/BS	-2.097/MSG
A 4	110.05668	23.78533	1.0	69.0	30.0	-0.102/AG	1.477/PS	1.759/MSF
A 5	110.0564	23.78869	4.0	66.0	30.0	0.450/AG	2.130/MPS	1.120/SF
A 6	110.0566	23.79004	2.0	65.0	33.0	0.068/AMF	1.848/PS	1.604/MSF
A 7	110.02515	23.79249	0.3	82.8	16.9	0.574/AG	1.356/PS	-0.026/S
A 8	110.0571	23.79273	4.0	64.0	32.0	0.104/AG	1.94/PS	1.99/MSF
A 9	110.05691	23.79844	2.0	70.0	28.0	0.037/AG	1.663/PS	1.999/MSF
A10	110.0579	23.8005	5.0	87.0	8.0	0.364/AM	1.756/PS	2.280/MSF
A11	110.0558	23.80864	1.0	64.0	35.0	-0.960/AMG	1.490/PS	1.830/MSF
A12	110.05672	23.81073	2.0	56.0	42.0	-0.414/AMG	1.612/PS	2.351/MSF
A13	110.0543	23.81754	0.0	75.0	25.0	-0.208/AG	0.94/MS	1.48/MSF
A14	110.0499	23.82978	2.0	83.0	15.0	0.37/AG	1.514/PS	2.212/MSF
A15	110.0447	23.84737	2.0	46.0	52.0	-0.659/AMG	1.627/PS	2.852/MSF
A16	110.0326	23.859	3.0	79.0	19.0	0.463/AG	1.759/PS	2.109/MSF
A17	110.0248	23.86229	2.0	88.0	10.0	0.439/AG	1.464/PS	2.797/MSF
A18	110.0007	23.876	2.0	92.0	6.0	0.491/AG	1.404/PS	2.886/MSF
A19	109.90853	23.87863	3.0	89.0	8.0	0.952/AG	1.658/PS	2.203/MSF
A20	109.9865	23.88679	1.0	89.0	10.0	0.362/AG	1.296/PS	2.452/MSF
A21	109.90497	23.89197	0.0	88.0	12.0	0.496/AG	1.165/PS	-0.008/S
A22	109.9715	23.89734	3.0	79.0	18.0	0.38/AG	1.76/PS	2.25/MSF
A23	110.06517	23.90552	0.4	40.4	59.2	-0.581/AMG	0.915/MS	0.862/SF

**Tabla 12 continuación.....** Parámetros texturales de los sedimentos de arroyos, donde A=arcilla, LMF=limo muy fino, AF=arena fina, AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobremente seleccionado, MPS=muy pobremente seleccionado; MSG=muy sesgado a los gruesos, SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos

<b>Muestra</b>	<b>Longitud W</b>	<b>Latitud N</b>	<b>% Limos y arcillas</b>	<b>% Arenas</b>	<b>% Gravas</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Grado de selección</b>	<b>Tendencia</b>
A24	109.9652	23.9132	2.0	93.0	5.0	0.878/AG	1.323/PS	2.75/MSF
A25	109.90644	23.9153	0.0	94.0	6.0	0.668/AG	1.95/PS	-0.016/S
A26	110.06272	23.91739	0.5	46.6	52.9	-0.474/AMG	0.992/MS	0.86/SF
A27	109.9097	23.92304	0.0	92.0	8.0	0.342/AG	1.027/PS	0.506/SF
A28	109.90966	23.92327	1.0	74.0	25.0	0.202/AG	1.607/PS	1.836/MSF
A29	109.90066	23.92327	1.0	95.0	4.0	0.511/AG	1.145/PS	2.63/MSF
A30	109.91246	23.92369	3.0	93.0	4.0	1.224/AM	1.547/PS	2.502/MSF
A31	109.91651	23.92499	18.0	81.0	1.0	3.111/AM	1.902/PS	1.766/MSF
A32	109.9613	23.92974	3.0	82.0	15.0	0.157/AG	1.563/PS	3.353/MSF
A33	109.89397	23.93095	4.0	84.0	12.0	0.67/AG	1.954/PS	1.784/MSF
A34	110.07218	23.93664	0.8	56.7	42.5	-0.292/AMG	1.061/PS	0.668/SF
A35	110.01146	23.93876	0.6	79.0	20.4	0.337/AG	1.277/PS	0.085/S
A36	109.89967	23.94001	2.0	90.0	8.0	0.523/AG	1.458/PS	2.845/MSF
A37	109.9579	23.94589	10.0	83.0	7.0	1.893/AM	2.130/MPS	1.336/MSF
A38	109.87514	23.94679	5.0	64.0	31.0	0.444/AG	2.179/MPS	1.379/MSF
A39	110.06432	23.94749	1.8	56.9	41.3	0.093/AG	1.384/PS	0.52/SF
A40	109.87961	23.95371	3.0	88.0	9.0	0.681/AG	1.588/PS	2.239/MSF
A41	109.99529	23.95653	0.5	92.5	7.0	0.61/AG	1.042/PS	0.041/S
A42	110.06841	23.95722	1.4	71.2	27.4	0.188/AG	1.373/PS	0.429/SF
A43	109.89874	23.95865	4.0	96.0	0.0	1.397/AM	1.496/PS	3.138/MSF
A44	109.9516	23.96171	3.0	89.0	8.0	0.467/AG	1.668/PS	3.091/MSF
A45	109.92142	23.96279	15.0	83.0	2.0	2.375/AF	2.132/MPS	1.746/MSF
A46	110.06841	23.96383	2.3	45.0	52.7	-0.396/AMG	1.19/PS	0.881/SF

**Tabla 12 continuación....** Parámetros texturales de los sedimentos de arroyos, donde A=arcilla, LMF=limo muy fino, AF=arena fina, AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobrementemente seleccionado, MPS=muy pobrementemente seleccionado; MSG=muy sesgado a los gruesos, SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos

<b>Muestra</b>	<b>Longitud W</b>	<b>Latitud N</b>	<b>% Limos y arcillas</b>	<b>% Arenas</b>	<b>% Gravas</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Grado de selección</b>	<b>Tendencia</b>
A47	109.9494	23.97048	6.0	91.0	3.0	2.011/AF	1.737/MBS	2.156/MSF
A48	110.06598	23.97107	2.0	60.2	37.8	-0.015/AMG	1.346/PS	0.582/SF
A49	109.99777	23.97114	2.0	70.0	28.0	0.072/AG	1.703/PS	2.491/MSF
A50	109.90102	23.97479	9.0	85.0	6.0	1.718/AM	2.127/MPS	1.466/MSF
A51	109.9476	23.97751	0.0	92.0	8.0	0.118/AG	0.875/MS	0.474/SF
A52	109.90885	23.98029	99.5	0.2	0.3	11.051/LMF	2.055/MPS	-1.259/SG
A53	109.87457	23.98235	0.0	70.0	30.0	-0.465/AMG	0.9/MS	0.233/S
A54	110.06043	23.98683	0.7	48.8	50.5	-0.445/AMG	1.02/PS	0.858/SF
A55	109.91772	23.98903	38.0	62.0	0.0	10.013/A	1.717/PS	0.121/S
A56	109.9429	23.99476	16.0	84.0	0.0	2.834/AF	1.988/PS	1.987/MSF
A57	110.05557	23.99526	0.6	48.6	50.8	-0.572/AMG	0.884/MS	0.834/SF
A58	110.00552	24.00661	0.4	21.1	78.5	-0.813/AG	0.736/MS	0.856/SF
A59	109.9316	24.00808	42.0	58.0	0.0	9.295/LMF	1.112/PS	0.301/S
A60	109.92907	24.01094	100.00	0.0	0.0	8.318/LMF	1.246/PS	0.804/SF
A61	109.9309	24.02399	7.0	85.0	8.0	1.555/AM	2.014/MPS	2.144/MSF
A62	110.07523	24.02637	0.9	62.9	36.2	0.04/AG	1.244/PS	0.4/MSF
A63	109.84757	24.03301	53.0	47.0	0.0	9.151/A	1.531/PS	0.876/SG
A64	109.98277	24.04065	1.8	87.3	10.9	1.555/AM	1.33/PS	-0.198/SG
A65	109.9926	24.05793	0.8	67.5	31.7	0.084/AG	1.274/PS	0.449/SF
A66	109.99824	24.10851	0.4	73.1	26.5	0.062/AG	1.213/PS	0.384/SF
A67	109.99936	24.11713	0.2	67.0	32.8	0.005/AG	1.219/PS	0.495/SF
A68	109.99787	24.12546	1.4	67.0	31.6	-0.135/AMG	1.166/PS	0.537/SF

**Tabla 13.** Parámetros texturales de los sedimentos de duna, donde AM=arena media, AG=arena gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado; S=simétrico

Muestras	Longitud W	Latitud N	% Limos y arcillas	% Arenas	% Gravas	Tamaño medio	Grado de selección	Tendencia
D1	109.98827	24.05692	0	100.0	0.0	1.606/AM	0.353/BS	0.074/S
D2	109.9813	24.04064	0	100.0	0.0	1.386/AM	0.457/BS	0.051/S
D3	109.95047	24.0367	1	98.0	1.0	0.945/AG	0.754/MS	0.057/S
D4	109.92699	24.02884	0	99.5	0.5	0.910/AG	0.522/MS	-0.044/S

**Tabla 14.** Parámetros texturales de los sedimentos de playa, donde AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; MBS=muy bien seleccionada, BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobrememente seleccionado; SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos

Muestra	Longitud W	Latitud N	% Limos y arcillas	% Arenas	% Gravas	Tamaño medio	Grado de selección	Tendencia
P 1	110.00021	24.13134	0	57	43	-0.757/AMG	0.487/BS	0.567/MSF
P 2	109.99935	24.11574	0	65	35	-0.039/AMG	1.272/PS	0.696/MSF
P 3	109.99376	24.10847	0	94	6	1.062/AM	1.081/PS	-0.318/SG
P 4	109.988	24.05928	0	42	58	-0.271/AMG	1.125/PS	0.887/MSF
P 5	109.97676	24.04131	0	99	1	0.982/AG	0.594/MS	-0.243/SG
P 6	109.95099	24.03836	0	88	12	-0.420/AMG	0.431/BS	-0.096/S
P 7	109.93406	24.03025	0	99	1	0.320/AG	0.579/MS	0.165/SF
P 8	109.92711	24.03071	0	98	2	0.236/AG	0.532/MS	0.158/SF
P 9	109.90646	24.0353	0	96	4	0.880/AG	0.976/MS	-0.042/S
P10	109.88077	24.04032	0	100	0	0.050/AG	0.247/MBS	-0.015/S
P11	109.83755	24.05932	0	67	33	-0.734/AMG	0.510/MS	0.438/MSF
P12	109.8272	24.05648	0	77	23	-0.107/AMG	1.021/PS	0.528/MSF

**Tabla 15.** Parámetros texturales de los sedimentos de plataforma, donde LMF=limo muy fino, LM=limo medio, AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobremente seleccionado, MPS=muy pobremente seleccionada; MSG=muy sesgado a los gruesos, SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos

Muestra	Longitud W	Latitud N	% Gravas	% Arenas	% Limos y arcillas	Tamaño medio	Grado de selección	Tendencia
PI 1	110.076	24.2078	0.9	99.1	0.0	1.142/AM	0.778/MS	0.048/S
PI 2	110.037	24.2058	13.8	75.8	10.4	1.133/AM	2.236/MPS	0.425/MSF
PI 3	109.989	24.1045	0.6	99.4	0.0	1.472/AM	0.668/MS	-0.154/SG
PI 4	109.984	24.0787	0.7	99.1	0.2	1.954/AM	0.8/MS	-0.269/SG
PI 5	109.981	24.0787	0.5	99.4	0.1	1.652/AM	0.895/MS	-0.078/S
PI 6	109.972	24.0455	1.6	98.1	0.3	2.078/AF	1.011/PS	-0.211/SG
PI 7	109.943	24.0403	0.7	99.2	0.1	1.064/AM	0.468/BS	0.069/S
PI 8	109.932	24.0348	0.0	99.4	0.6	2.297/AF	0.716/MS	-0.184/SF
PI 9	109.916	24.0360	1.2	98.5	0.3	0.937/AG	0.77/MS	0.12/SF
PI10	109.878	24.0445	1.9	98.1	0.0	1.029/AM	0.407/BS	0.241/SF
PI11	109.850	24.0560	8.4	91.6	0.0	0.134/AG	0.736/MS	-0.137/SG
PI12	109.826	24.0597	11.1	88.9	0.0	0.784/AG	1.283/PS	-0.213/SG
PI13	109.954	24.0402	0.6	99.3	0.1	1.185/AM	0.456/BS	0.09/S
PI14	109.941	24.0445	3.1	96.6	0.3	0.967/AG	0.84/MS	0.069/S
PI15	109.927	24.0428	0.0	0.0	100.0	6.908/LM	1.657/PS	0.271/SF
PI16	109.913	24.0448	1.5	98.5	0.0	0.779/AG	0.628/MS	0.025/S
PI17	109.964	24.1432	6.1	93.9	0.0	0.88/AG	1.071/PS	-0.214/SG
PI18	109.955	24.0493	28.3	61.1	10.6	1.484/AM	2.32/MPS	-0.011/S
PI19	109.950	24.0603	11.4	87.8	0.8	0.767/AG	1.382/PS	0.119/SF
PI20	109.921	24.0475	0.0	0.0	100.0	8.1/LMF	1.262/PS	0.35/MSF
PI21	109.940	24.0517	27.9	63.6	8.5	1.164/AM	2.21/MPS	0.231/SF
PI22	110.068	24.2303	1.6	97.6	0.8	0.839/AG	1.046/PS	0.479/MSF

**Tabla 15 continuación.** Parámetros texturales de los sedimentos de plataforma, donde LMF=limo muy fino, LM=limo medio, AM=arena media, AG=arena gruesa, AMG=arena muy gruesa; BS=bien seleccionado, MS=moderadamente seleccionado, PS=pobremente seleccionado, MPS=muy pobremente seleccionada; MSG=muy sesgado a los gruesos, SG=sesgado a los gruesos, S=simétrico, SF=sesgado a los finos, MSF=muy sesgado a los finos

<b>Muestra</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>% Gravas</b>	<b>% Arenas</b>	<b>% Limos y arcillas</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Grado de selección</b>	<b>Tendencia</b>
PI23	109.995	24.1842	4.8	94.6	0.6	1.027/ <b>AM</b>	1.23/ <b>PS</b>	0.087/ <b>S</b>
PI24	109.979	24.1052	0.0	0.0	100.0	7.541/ <b>LF</b>	1.389/ <b>PS</b>	0.371/ <b>MSF</b>
PI25	109.948	24.0738	15.0	83.5	1.5	0.933/ <b>AG</b>	1.649/ <b>PS</b>	0.096/ <b>S</b>
PI26	109.956	24.0635	5.4	94.3	0.3	1.394/ <b>AM</b>	1.125/ <b>PS</b>	-0.243/ <b>SG</b>
PI27	109.934	24.0567	39.5	60.1	0.4	-0.046/ <b>AMG</b>	1.305/ <b>PS</b>	0.767/ <b>MSF</b>
PI28	109.911	24.0563	0.0	0.0	100.0	6.679/ <b>LM</b>	1.8/ <b>PS</b>	0.275/ <b>SF</b>
PI29	109.880	24.0703	19.6	72.7	7.7	1.668/ <b>AM</b>	2.176/ <b>MPS</b>	-0.264/ <b>SG</b>
PI30	109.497	24.0748	5.3	94.4	0.3	1.332/ <b>AM</b>	1.293/ <b>PS</b>	-0.537/ <b>MSG</b>
PI31	109.827	24.0788	4.0	95.9	0.1	1.007/ <b>AM</b>	1.073/ <b>PS</b>	-0.215/ <b>SG</b>

**Tabla 16.** Concentraciones (%) de los elementos mayoritarios en sedimentos de los desechos de minería y fundición en San Antonio

Muestra	Elementos mayoritarios								
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Ti
J1	3.390	1.460	11.600	0.500	0.560	0.665	0.039	0.240	0.052
C1	1.420	13.400	1.370	0.270	1.150	0.434	0.038	0.210	0.015
C2	7.300	4.000	6.040	0.680	2.250	1.310	0.054	5.930	0.019
T2	6.440	17.000	4.620	1.700	1.020	0.998	0.036	0.005	0.191
T1	4.220	1.430	9.490	1.430	0.790	1.880	0.038	0.590	0.135
T3	9.260	1.560	8.590	1.460	3.650	1.990	0.112	0.020	0.467

**Tabla 17.** Concentraciones (mg kg<sup>-1</sup>, excepto el Hg µg kg<sup>-1</sup>) de los elementos traza en sedimentos de los desechos de minería y fundición en San Antonio

Muestra	Elementos traza																										
	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Hg	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	Y	Zn	Zr
<b>C1</b>	208000	63	0.2	2.6	8.4	36.3	0.49	40.6	0.1	-	8.2	185	0.4	9.3	107	8.6	2.8	27	1.3	171	0.05	0.6	0.1	86	4.5	67.1	640
<b>C2</b>	82400	313	0.9	5.5	24.4	171	1.97	133	0.1	-	18.1	780	0.5	30.7	321	44.9	27.9	5	4.1	321	0.05	2.4	0.5	209	19.9	135	269
<b>J1</b>	92800	372	0.4	27.1	16.9	143	1.1	337	0.05	7	2.4	305	1.7	13.2	3280	30.4	6800	15	7.3	165	0.05	1.4	0.6	75	9.7	338	515
<b>T2</b>	6870	597	1.2	6.7	35	88	5.65	24.5	0.05	-	14.2	627	1.5	43.7	94.1	133	1.5	19	0.05	178	0.05	6.5	1.2	142	14.3	300	31
<b>T1</b>	35600	743	0.7	15.9	103	67.1	3.41	266	0.05	-	10.8	401	4.6	17.5	12100	81.1	327	14	2.7	322	0.05	2.7	2.4	134	10.1	509	115
<b>T3</b>	4420	845	0.9	0.4	57	85.5	8.48	84.8	0.5	-	25.8	865	1.2	32.1	18	147	3.3	33	0.8	470	0.05	1.3	0.7	259	25.6	51.8	36

**Tabla 18.** Concentraciones (%) de los elementos mayoritarios en sedimentos de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

Muestra	Elementos mayoritarios								
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Ti
A1	7.760	4.600	5.650	0.790	2.860	2.310	0.056	0.020	0.132
A4	7.850	4.650	7.010	0.670	2.680	1.830	0.111	0.005	0.000
A5	2.940	3.220	24.300	0.280	2.180	0.999	0.121	0.020	1.730
A8	7.230	5.510	9.420	0.670	3.290	1.960	0.106	0.030	0.348
A11	7.820	5.480	7.190	0.960	3.450	1.860	0.102	0.060	0.343
A12	8.440	4.530	5.320	0.880	2.610	2.460	0.087	0.030	0.356
A13	8.230	4.880	6.290	1.010	2.820	2.400	0.078	0.010	0.268
A14	7.040	4.620	8.000	0.850	2.580	1.980	0.099	0.020	0.188
A15	7.250	3.720	3.910	1.180	1.610	2.550	0.070	0.020	0.277
A16	6.110	2.020	1.520	1.230	0.510	1.500	0.031	0.005	0.209
A19	6.210	1.790	4.280	1.240	1.370	1.130	0.048	0.040	0.229
A20	7.250	2.700	3.700	0.960	1.350	2.680	0.061	0.005	0.232
A21	6.820	1.790	3.750	1.710	1.280	1.490	0.040	0.020	0.264
A23	6.960	1.230	0.520	1.570	0.090	1.500	0.010	0.005	0.045
A29	6.410	1.260	3.180	1.610	1.100	1.280	0.035	0.020	0.129
A34	8.790	1.630	0.570	1.720	0.130	1.500	0.012	0.005	0.064
A38	8.050	3.550	4.540	1.270	2.040	1.840	0.044	0.005	0.152
A41	8.250	2.450	3.340	1.680	1.120	2.740	0.059	0.020	0.208
A43	5.870	1.010	2.350	1.580	0.730	1.460	0.030	0.010	0.087
A44	7.280	2.300	1.690	1.570	0.690	1.500	0.037	0.005	0.173
A45	7.870	2.250	3.620	1.680	1.210	2.400	0.055	0.005	0.213
A49	8.170	1.520	0.380	1.850	0.080	1.500	0.012	0.005	0.060
A50	7.020	2.340	3.590	1.710	1.220	1.690	0.048	0.010	0.000
A51	7.730	2.240	1.870	1.710	0.720	2.740	0.043	0.005	0.161
A52	8.030	1.990	3.750	1.770	1.220	2.080	0.066	0.020	0.166
A53	7.960	3.380	3.780	1.400	1.400	2.490	0.056	0.005	0.211
A55	9.270	2.680	5.200	2.090	1.780	2.540	0.087	0.020	0.252
A57	7.900	1.690	0.400	1.650	0.080	1.500	0.008	0.005	0.036
A58	8.490	1.570	0.660	1.940	0.120	1.500	0.014	0.005	0.078
A59	6.960	2.390	4.150	1.510	1.760	1.500	0.067	0.350	0.376
A60	5.570	1.760	3.310	1.240	2.030	1.500	0.054	0.700	0.277
A61	6.840	2.110	2.160	1.860	0.930	2.470	0.042	0.110	0.226
A63	6.160	2.930	1.340	1.410	1.280	1.500	0.046	1.010	0.164

**Tabla 19.** Concentraciones (mg kg<sup>-1</sup>, excepto el Hg µg kg<sup>-1</sup>) de los elementos traza en sedimentos de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

Muestra	Elementos traza																											
	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Hg	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	Y	Zn	Zr	
A1	107	342	1	0.5	19.8	127	4.11	26	0.4	2.5	13	937	0.05	22	21	48.9	0.5	29	0.4	520	0.05	2.9	0.5	83	18.4	74.5	16	
A2	8.2	-	-	0.03	-	-	-	7	-	6.3	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.6	-
A3	2.7	-	-	0.4	-	-	-	2	-	4.6	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.8	-
A4	477	279	1	0.2	20.6	102	1.9	28	0.6	2.0	13	1100	0.05	30.2	11	35	0.3	15	0.4	488	0.05	6.9	1.4	132	20.3	62.9	19	
A5	1468	132	0.5	5.8	30.9	368	0.76	44	0.8	4.8	7	1740	0.9	33	128	3.8	17.7	19	0.8	287	0.6	1.6	0.3	1000	10.5	75	35	
A6	10754	-	-	4.4	-	-	-	50	-	9.7	-	-	-	-	938	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77.6	-
A7	76	-	-	4	-	-	-	26	-	0.9	-	-	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.9	-
A8	1240	279	1.2	3.5	28.5	226	1.76	39	0.8	5.4	11.4	1250	0.05	31	56	39	0.8	33	0.4	490	0.05	2.2	0.6	228	26	115	32	
A10	814	-	-	10	-	-	-	33	-	6.1	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77	-
A11	1100	522	1	1.2	27.1	119	1.67	37	0.5	26.1	11	1100	0.05	29	76	47.6	5.7	32	0.3	430	0.05	3	0.6	162	24	55	23	
A12	613	477	1.1	1.2	18.1	96	1.57	28	0.6	3.2	11	849	0.1	22	32.4	40.8	3.5	27	0.2	480	0.05	2	0.5	152	17.7	57	22	
A13	1218	517	1.1	2	22.9	122	1.77	27	0.5	34.5	12	926	0.05	24	107	51.5	2.7	28	0.3	475	0.05	4.1	0.6	142	21.7	64	24	
A14	1294	421	1	2.3	26	118	1.44	95	0.4	2.7	10	1160	0.05	24	329	41	17.8	29	0.3	361	0.05	2.8	0.7	94	23	77	18	
A15	1740	580	1.2	0.9	13.1	79	1.63	25	0.4	3.9	12	637	0.2	17	91.1	54.2	4.2	19	0.05	373	0.05	3.8	0.8	113	15.1	62	19	
A16	94.8	870	1.5	0.6	5.2	37	1.11	9.4	0.05	0.1	9	253	0.3	7	17.2	33.2	4.5	6	0.05	566	0.3	1.3	0.4	64	5.8	22	9	
A17	113	-	-	0.4	-	-	-	14	-	2.1	-	-	-	-	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	-
A18	51	-	-	0.23	-	-	-	12	-	11.9	-	-	-	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-
A19	95	488	1.6	0.2	12.9	126	2.22	26	0.1	-	17	795	0.05	30	16.5	76.2	< 0.1	19	0.3	122	0.05	12	1.5	55	16.3	69.3	10	
A20	160	605	1.3	0.4	12.3	77	1.58	17	0.3	1.6	10	578	0.05	14	67.5	45.1	< 0.1	16	0.05	428	0.05	6.4	1.1	75	14.6	52	12	
A21	13	714	2.1	0.2	12.4	92	2.3	25	0.2	-	20	482	0.2	27	15.2	99.5	< 0.1	15	0.4	145	0.05	7	1.4	105	14.2	74.2	14	
A22	54			0.11				11		16.6					18												25	
A23	153	1140	1.1	0.23	1	6	0.75	41	0.05	8.2	5	66	0.05	2	34	48.1	0.2	1	0.05	597	0.1	1.2	0.3	17	2.1	50	6	
A24	35			0.15				1.4		10.9					4												10	

**Tabla 19 continuación.** Concentraciones (mg kg<sup>-1</sup>, excepto el Hg µg kg<sup>-1</sup>) de los elementos traza en sedimentos de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

Muestra	Elementos traza																											
	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Hg	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	Y	Zn	Zr	
A26	1.3			0.12				1.5		17.3					6												12	
A29	8.9	588	1.6	0.2	9.4	82	2.35	22	0.1	-	17	434	0.05	21	15.4	87	< 0.1	15	0.05	108	0.05	6.7	1.3	51	11.6	69.5	10	
A32	50			0.17				12		-					31												31	
A34	7.9	1110	1.6	4.8	1.2	12	1.02	1.5	0.05	25.8	8	99	0.5	2	9	51.9	0.5	2	0.05	766	0.2	2	0.3	21	3.3	16.1	4	
A35	0.65	-	-	0.11	-	-	-	1.9	-	47.5	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-
A37	54	-	-	0.21	-	-	-	12	-	9.8	-	-	-	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-
A38	4.2	644	1.5	0.2	16.9	164	3.08	24	0.2	11.3	22	751	0.05	28	11.8	77.3	0.05	21	0.2	244	0.05	6.7	1.3	76	15.9	88.1	13	
A39	2.7	-	-	0.16	-	-	-	1.4	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.6	-
A41	610	937	1.5	0.35	10.9	57	2.52	16	0.1	1.0	17	488	0.05	15	61	72.1	2.5	13	0.2	508	0.05	4.1	1	70	12.3	55	12	
A42	3.4	-	-	0.09	-	-	-	1.4	-	22.4	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.6	-
A43	7.2	576	1.5	0.2	6.4	96	2.53	15	0.05	5.7	16	331	0.05	15	15.3	89.3	0.05	11	0.05	120	0.05	6.6	1.2	29	10.6	54.7	8	
A44	87.5	773	1.4	0.2	6.1	48	1.95	11	0.2	-	10	272	0.5	11	20	63.5	2.4	8	0.05	467	0.05	2.3	0.5	59	7.5	27	11	
A45	11	673	1.7	0.1	10	65	6.33	13	0.6	20.5	23	616	0.05	12	16.6	109	0.05	17	0.05	259	0.05	9	1.7	60	19.4	70.2	23	
A46	4.3	-	-	0.04	-	-	-	1.7	-	2.9	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-
A47	35	-	-	0.17	-	-	-	12	-	2.7	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.6	-
A48	5.9	-	-	0.13	-	-	-	1.3	-	0.1	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	-
A49	118843	1320	1.5	22.5	0.9	5	1.09	459	0.05	1.6	7	78	0.05	1	3965	58	0.1	1	0.05	770	0.2	0.8	3.3	23	4.1	365	5	
A50	5.4	617	1.7	0.5	11	93	3.23	19	0.4	-	21	605	0.05	22	109	95	0.05	16	0.2	210	0.05	11.8	1.9	43	20.1	77.3	18	
A51	121	778	1.3	0.5	6.6	32	2.21	29	0.2	8.2	11	272	0.1	10	109	69.8	0.5	9	0.05	407	0.05	3.9	0.6	52	8.4	77.3	11	
A52	84.7	640	1.8	0.2	11	82	4.26	12	0.7	-	22	670	0.05	19	24.1	99.8	0.05	18	0.1	196	0.05	14	2	48	21.5	33.5	24	
A53	5.7	670	1.4	0.1	12.2	53	1.59	19	0.3	-	12	686	0.2	15	11.7	62.6	0.4	16	0.05	436	0.1	7.5	1.2	57	16.6	58.1	10	
A54	12.7	-	-	0.01	-	-	-	2.2	-	16.1	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-
A55	8.6	726	2.3	0.2	15.8	108	8.42	18	1	-	40	907	0.05	23	17.3	144	0.05	22	0.4	268	0.05	13	2.4	91	32.5	79	35	

**Tabla 19 continuación.** Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el Hg  $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de los arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

Muestra	Elementos traza																											
	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Hg	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	Y	Zn	Zr	
A56	7.6	-	-	0.2	-	-	-	11	-	1.2	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.8	-
A57	15.3	1200	1.6	0.2	0.9	6	1.05	24	0.05	29.9	11	82	0.05	1	18.5	47.4	0.3	1	0.05	748	0.05	0.6	0.2	22	1.2	114	4	
A58	20	1340	1.5	0.05	1.3	5	1.15	1.2	0.05	22.6	11	103	0.3	2	6	54.1	0.4	2	0.05	713	0.2	1.2	1.3	22	4.3	18	6	
A59	86.5	581	1.7	0.4	15.3	87	6.68	17	0.7	1.9	34	742	0.6	21	42	106	2.6	18	0.7	265	0.1	7.7	1.6	106	22.5	46	26	
A60	319	348	1.1	1.6	14.1	69	3.79	17	0.3	2.0	30	707	0.7	17	85	64.3	12.4	12	0.7	266	0.2	4.1	1	89	9.5	66	12	
A61	63.9	712	1.4	7	6.4	45	3.08	36	0.3	3.4	16	352	0.7	11	33	95.3	0.2	10	0.6	251	0.05	5.2	1.2	49	11.3	78	14	
A62	6.9	-	-	0.03	-	-	-	1.3	-	54.2	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	
A63	16.1	195	1.1	0.1	4.5	21	1.54	57	0.5	-	13	267	0.4	6	19.5	51.5	0.6	7	0.4	564	0.2	2.6	1.9	37	8.3	83.3	13	
A64	0.1	-	-	0.04	-	-	-	0.7	-	4.0	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	
A65	0.1	-	-	0.09	-	-	-	0.8	-	5.8	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	

**Tabla 20.** Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el  $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de playa de Bahía La Ventana

<b>Muestra</b>	<b>Elementos traza</b>					
	<b>As</b>	<b>Cu</b>	<b>Cd</b>	<b>Hg</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
P1	0.1	0.5	0.01	16.6	6.2	10.9
P2	0.5	0.7	0.08	8.4	3.9	31
P3	0.5	0.6	0.11	1.9	3.7	23
P4	0.1	0.5	0.03	1.3	4.4	16.1
P5	0.1	0.5	0.02	206.0	2.2	10.4
P6	0.1	0.2	0.01	19.7	4.2	5.8
P7	0.2	0.3	0.03	6.7	5.0	6.1
P8	0.2	0.2	0.10	4.9	2.2	4.8
P9	0.7	1.1	0.04	5.7	2.5	12.6
P10	0.1	0.1	0.07	5.8	2.9	3.6
P11	0.1	0.5	0.10	7.4	4.8	9.0
P12	0.1	0.4	0.06	6.6	4.0	2.3

**Tabla 21.** Concentraciones (%) de componentes y elementos mayoritarios en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

Muestra	Elementos mayoritarios y Componentes										
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Ti	C <sub>org</sub>	CaCO <sub>3</sub>
PI 1	0.270	1.730	0.700	1.990	8.860	3.000	0.011	0.040	0.078	0.080	0.451
PI 2	0.160	2.920	0.800	1.680	8.350	3.000	0.012	0.040	0.059	0.025	2.157
PI 3	0.240	3.900	0.560	1.630	7.620	3.000	0.013	0.040	0.062	0.070	3.973
PI 5	1.010	13.900	0.740	1.090	6.080	3.000	0.047	0.140	0.087	0.160	21.300
PI 6	1.000	13.300	0.830	1.070	5.880	3.000	0.065	0.150	0.109	0.320	19.388
PI 7	0.280	4.990	0.250	1.330	7.750	3.000	0.014	0.070	0.028	0.090	6.881
PI 8	0.890	3.650	2.280	1.790	7.780	3.000	0.042	0.050	0.188	0.180	2.676
PI 9	0.180	3.210	0.340	1.530	7.640	3.000	0.013	0.040	0.047	0.110	2.867
PI 10	0.290	4.260	0.300	1.290	6.940	3.000	0.017	0.050	0.045	0.130	5.134
PI 11	0.230	3.360	0.240	1.180	4.910	2.780	0.012	0.040	0.058	0.025	4.888
PI 12	0.250	5.360	0.180	1.230	5.100	2.740	0.025	0.050	0.024	0.025	8.670
PI 13	0.320	6.000	0.230	1.150	7.320	3.000	0.014	0.060	0.033	0.025	9.394
PI 14	0.540	7.960	0.200	1.100	5.720	3.000	0.020	0.130	0.023	0.180	12.671
PI 15	0.410	4.740	0.460	1.570	6.810	3.000	0.018	0.120	0.054	0.170	5.325
PI 16	1.280	9.210	2.660	1.490	6.910	3.000	0.076	0.170	0.300	0.720	11.442
PI 17	0.640	17.300	0.440	1.170	4.370	2.610	0.032	0.120	0.046	0.330	24.576
PI 18	1.420	13.200	2.590	1.240	5.500	2.660	0.073	0.290	0.246	0.760	19.798
PI 21	1.290	13.400	2.180	1.100	5.140	2.330	0.071	0.270	0.222	0.870	22.255
PI 22	0.400	8.790	0.660	1.840	5.560	2.850	0.031	0.080	0.052	0.230	11.469
PI 23	0.740	17.500	0.680	1.100	3.840	2.310	0.039	0.140	0.041	0.370	27.307
PI 24	0.660	13.300	0.810	1.050	4.930	3.000	0.048	0.150	0.094	0.470	21.300
PI 25	0.720	16.300	0.630	1.030	3.820	2.280	0.037	0.130	0.054	0.310	24.030
PI 26	0.480	12.400	0.420	1.140	5.090	2.920	0.025	0.110	0.050	0.240	20.207

**Tabla 21 continuación.** Concentraciones (%) de componentes y elementos mayoritarios en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

Muestra	Elementos mayoritarios										
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S	Ti	C <sub>org</sub>	CaCO <sub>3</sub>
PI 27	0.380	7.980	0.510	1.470	4.940	2.490	0.027	0.070	0.056	0.430	10.977
PI 28	0.430	9.430	0.600	1.270	5.820	3.000	0.032	0.090	0.066	0.190	12.821
PI 29	0.770	5.000	1.590	1.680	6.640	2.860	0.041	0.060	0.181	0.310	6.513
PI 30	0.410	8.890	0.560	1.180	5.410	2.910	0.029	0.090	0.060	0.260	12.903
PI 31	0.420	9.350	0.170	1.420	5.340	2.890	0.015	0.070	0.018	0.025	14.473

**Tabla 22.** Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el  $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

Muestra	Elementos traza																										
	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Hg	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	Y	Zn	Zr
PI 1	0.05	1150	1.8	0.5	1.7	9.6	2.4	2.3	0.05	3.42	19.3	109	0.05	2.4	18.4	82	0.4	2	0.4	775	0.2	0.7	0.4	22	3.2	21.0	5
PI 2	0.05	1040	1.9	0.2	1.0	10.1	1.1	37	0.05	2.49	10.1	78	0.10	2.2	15.0	54	0.6	1	0.4	831	0.3	1.2	0.4	14	6.2	15.3	5
PI 3	3.1	981	1.7	2.6	1.1	19.4	1.3	3.9	0.05	1.44	13.2	72	0.05	3.6	15.4	47	0.9	0.05	0.4	907	0.3	1.4	0.4	9	5.5	19.6	4
PI 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PI 5	0.05	635	1.5	0.4	2.1	13.1	1.7	1.8	0.05	2.1	18.2	122	0.30	6.1	10.4	52	1.5	2	0.4	1000	0.1	1.7	1.9	23	6.3	25.8	6
PI 6	1.3	583	1.4	1.0	2.3	16.6	1.7	2.6	0.05	1.7	17.1	135	0.20	5.8	9.7	48	1.7	3	0.5	1000	0.2	2	1.8	16	7.5	33.5	6
PI 7	2.7	933	1.6	0.9	0.5	11.4	0.8	1.8	0.05	7.4	10.3	28	0.05	2.4	12.5	42	1.0	0.05	0.4	1000	0.1	1.1	0.6	10	3.4	14.9	5
PI 8	4.2	835	2.0	1.1	6.0	49.1	3.4	10.3	0.1	1.1	20.5	283	0.20	13.3	14.8	97	0.4	10	0.7	569	0.2	4.1	0.9	54	12.6	53.3	12
PI 9	0.05	1070	1.5	0.9	0.7	9.2	0.9	0.9	0.05	0.6	9.8	50	0.05	2.3	11.0	46	0.8	1	0.4	764	0.1	0.7	0.3	5	3.2	9.2	5
PI 10	1.1	931	1.5	0.4	0.6	17.2	0.8	0.8	0.05	0.5	9.1	47	0.05	3.2	11.2	42	0.8	2	0.3	810	0.1	0.7	0.4	12	3.3	8.3	5
PI 11	1.9	970	1.1	0.05	0.4	6.9	0.7	0.9	0.05	1.2	7.3	46	0.05	2	9.5	39	0.6	0.05	0.4	669	0.2	1.2	0.5	4	3.5	6.2	6
PI 12	0.05	976	1.0	0.05	0.4	4.5	0.7	0.6	0.05	2.9	7.5	27	0.1	2.2	9.1	37	0.7	0.05	0.2	807	0.05	1	0.3	0.5	2.0	5.9	4
PI 13	1.7	864	1.2	0.5	0.4	11.3	0.7	3.4	0.05	12.3	9.1	40	0.3	2.1	12.8	35	0.8	0.05	0.2	1000	0.2	1.4	0.6	1	4.8	7.3	4
PI 14	1.7	764	1.3	1.1	0.5	12.9	0.7	0.9	0.05	1.9	8.3	23	0.1	3.5	20.4	28	0.9	0.05	0.3	1000	0.1	1.5	0.8	0.5	3.1	9.2	5
PI 15	1.6	969	1.3	6.1	1.2	15.1	1.1	1.9	0.05	1.2	10.8	59	0.2	4	11.2	47	1	2	0.4	785	0.1	1.7	0.5	8	4.2	15.2	7
PI 16	6.7	579	1.7	0.3	7.5	60.1	4.0	10.3	0.6	4.1	28.6	355	0.4	15.9	14.4	85	0.8	11	0.9	1000	0.2	0.8	1.9	74	17.9	64.9	21
PI 17	0.05	601	1.0	0.2	0.9	14.7	1.1	3.2	0.05	2.9	9.3	67	0.2	6.4	9.6	44	0.4	2	0.5	1000	0.1	6	1.2	15	6.2	12.8	7
PI 18	9.3	441	1.5	2.8	8.4	57.5	4.3	13.9	0.4	3.1	35.7	298	0.6	17.4	56.5	86	1.5	10	0.9	1000	0.3	9	2.5	60	15.3	76.3	18
PI 19	0.6	-	-	1.6	-	-	-	2.0	-	1.8	-	-	-	-	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.4	-
PI 20	12	-	-	1.7	-	-	-	13.6	-	1.2	-	-	-	-	17.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70.0	-
PI 21	7.0	392	1.2	0.4	6.8	42.1	3.8	10.9	0.4	39.0	30.3	263	1.2	15.3	14.1	70	1.7	9	0.8	1000	0.4	1.3	3.3	42	13.4	57.9	15
PI 22	2.2	895	1.3	0.1	1.1	15.1	2.1	2.8	0.05	7.5	11.9	86	0.3	5.4	13.5	71	0.5	2	0.4	1000	0.1	1.5	0.8	20	4.4	14.8	8
PI 23	0.05	545	0.9	0.2	1.3	26.5	1.2	10.3	0.05	2.9	10.5	74	0.2	7.5	9.5	42	0.5	2	0.4	1000	0.2	1.7	1.4	9	6.1	22.6	8

**Tabla 22 continuación.** Concentraciones ( $\text{mg kg}^{-1}$ , excepto el  $\text{Hg } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) de los elementos traza en sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

Muestra	Elementos traza																										
	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Hg	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	Y	Zn	Zr
PI 24	4.0	534	1.1	0.2	2.3	17.3	1.8	5	0.3	2.1	15.3	128	1.8	7.7	11.4	46	0.8	3	0.5	1000	0.2	2.0	1.7	23	7.6	29.5	11
PI 25	0.05	575	1.2	0.2	1.5	14.6	1.2	3.4	0.05	2.0	11.0	72	0.2	6.6	10.1	40	0.5	2	0.5	1000	0.1	1.7	1.5	12	6.6	17.7	8
PI 26	3.1	787	1.3	0.2	1.1	14.9	1.0	1.8	0.05	27	9.1	46	0.1	4.8	12.4	41	0.6	2	0.5	1000	0.2	5	1.1	8	5.7	13.2	6
PI 27	1.6	819	1.4	0.1	1.2	9.3	1.6	2.3	0.05	3	12.2	66	0.6	4.2	11.8	61	0.6	2	0.5	938	0.2	1.2	0.9	10	5.3	13.4	7
PI 28	1.2	835	1.5	0.1	1.5	15.1	1.1	3.5	0.05	0.6	11.9	87	0.2	5.2	12.1	50	1.1	3	0.4	1000	0.2	1.8	0.8	17	6.2	17.9	6
PI 29	4.8	1010	1.6	0.9	5.1	34.2	3.2	8.2	0.3	14.9	21.6	216	0.4	11.2	14.1	82	0.5	7	0.6	768	0.05	3	1.2	51	10.4	46.1	15
PI 30	0.05	771	1.2	0.1	1.3	10.7	1.0	2.5	0.05	1.0	10.1	69	0.1	4.5	12.5	44	0.9	2	0.4	1000	0.2	1.3	0.7	6	5.0	15.5	7
PI 31	0.05	1110	1.0	0.1	0.4	6.6	0.7	0.8	0.05	18.8	8.1	30	0.2	3.2	8.9	45	0.6	0.05	0.5	1000	0.05	0.5	0.5	6	2.3	5.9	4

**Tabla 23.** Exactitudes (%) de la determinación de los componentes y elementos de los diferentes materiales de referencia estándar

Componente o elemento	CaCO <sub>3</sub>	DMMAS -110	DNC 1 <sup>a</sup>	GXR -1	GXR -4	GXR -6	MESS -3	OREAS 13b	PACS -2	SDC -1	SCO -1	SY-4
CaCO <sub>3</sub>	<10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<10
C <sub>org</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ag	-	-	-	10 - 15	20 - 30	> 30	20 - 30	<10	15 - 20	> 30	10 - 15	-
Al	-	-	-	> 30	<10	> 30	<10	-	<10	<10	<10	-
As	-	-	-	<10	<10	15 - 20	20 - 30	10 - 15	10 - 15	> 30	20 - 30	-
Ba	-	-	15 - 20	<10	> 30	<10	-	-	-	<10	<10	-
Be	-	-	-	<10	<10	20 - 30	<10	-	<10	10 - 15	<10	-
Bi	-	-	-	20 - 30	<10	> 30	-	-	-	> 30	10 - 15	-
Ca	-	-	-	<10	<10	<10	<10	-	<10	15 - 20	<10	-
Cd	-	-	-	<10	> 30	> 30	<10	-	15 - 20	> 30	> 30	-
Ce	-	-	-	<10	<10	<10	-	-	-	-	-	-
Co	-	-	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	-
Cr	-	-	15 - 20	10 - 15	<10	<10	15 - 20	-	> 30	<10	10 - 15	-
Cs	-	-	-	20 - 30	<10	<10	<10	-	<10	-	-	-
Cu	-	-	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	10 - 15	-
Dy	-	-	-	20 - 30	<10	10 - 15	-	-	-	-	-	-
Er	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eu	-	-	<10	<10	15 - 20	15 - 20	-	-	-	-	-	-
Fe	-	-	-	<10	<10	<10	<10	-	<10	<10	<10	-
Ga	-	-	-	> 30	<10	15 - 20	-	-	-	-	-	-
Gd	-	-	-	<10	<10	15 - 20	-	-	-	-	-	-
Ge	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hf	-	-	-	> 30	> 30	> 30	-	-	-	-	-	-
Ho	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

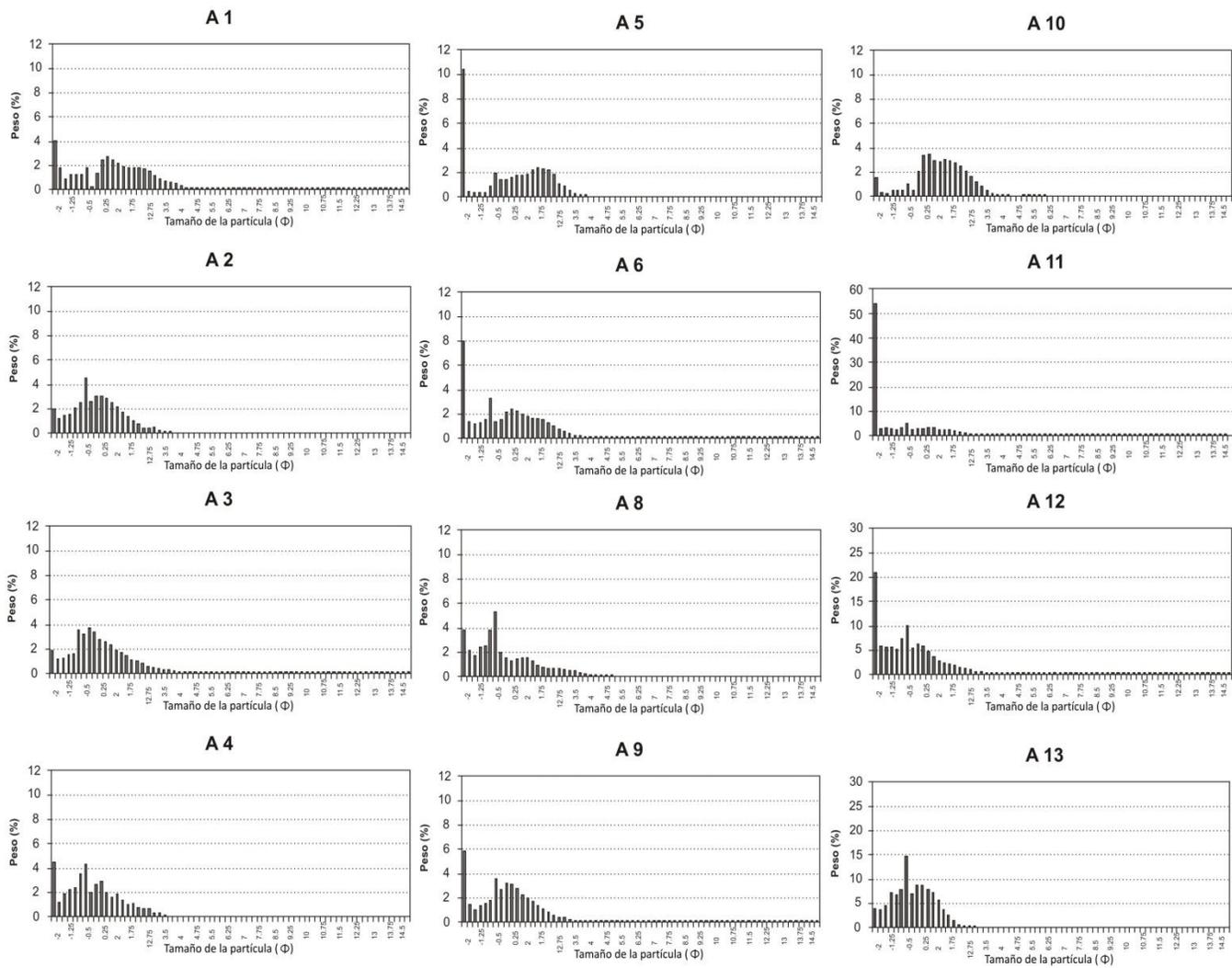
**Tabla 24.** Selección del elemento normalizador de sedimentos superficiales de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes

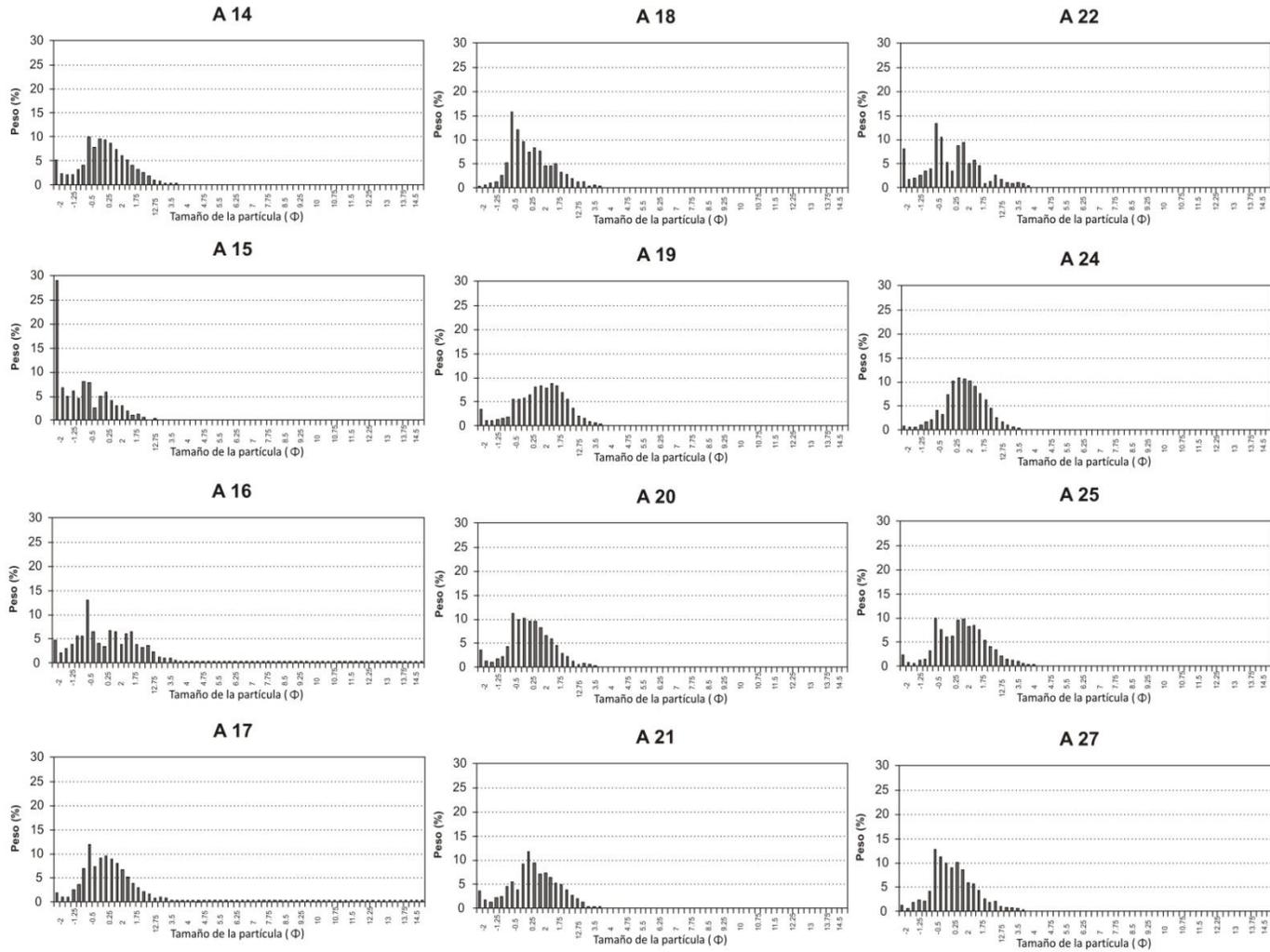
	Al	Co	Fe	Li	Mn	Sc	Th	Ti
<b>Al</b>		0.049	0.274	0.013	0.079	0.003	0.010	0.414
<b>As</b>	0.001	0.310	0.093	0.044	0.205	0.317	0.062	0.026
<b>Ba</b>	0.228	0.564	0.392	0.032	0.596	0.527	0.037	0.233
<b>Be</b>	0.180	0.206	0.260	0.355	0.187	0.076	0.386	0.219
<b>Ca</b>	0.028	0.662	0.249	0.027	0.530	0.718	0.038	0.060
<b>Cd</b>	0.001	0.452	0.140	0.013	0.309	0.424	0.042	0.021
<b>Co</b>	0.274		0.666	0.009	0.942	0.837	0.004	0.344
<b>Cr</b>	0.247	0.706	0.876	0.003	0.781	0.430	0.010	0.651
<b>Cs</b>	0.049	0.012	0.002	0.805	0.029	0.061	0.458	0.005
<b>Cu</b>	0.274	0.474	0.233	0.013	0.420	0.431	0.007	0.080
<b>Fe</b>		0.666		0.004	0.777	0.325	0.002	0.842
<b>Hf</b>	0.000	0.482	0.360	0.186	0.562	0.474	0.186	0.238
<b>K</b>	0.167	0.606	0.519	0.132	0.578	0.422	0.115	0.322
<b>Li</b>	0.013	0.009	0.004		0.022	0.034	0.492	0.004
<b>Mg</b>	0.002	0.876	0.372	0.021	0.764	0.908	0.002	0.128
<b>Mn</b>	0.079	0.942	0.777	0.022		0.747	0.023	0.462
<b>Mo</b>	0.279	0.001	0.068	0.003	0.001	0.084	0.060	0.274
<b>Na</b>	0.080	0.218	0.059	0.015	0.000	0.400	0.155	0.003
<b>Ni</b>	0.054	0.193	0.485	0.088	0.777	0.761	0.134	0.229
<b>P</b>	0.026	0.000	0.607	0.019	0.868	0.734	0.012	0.019
<b>Pb</b>	0.006	0.166	0.046	0.003	0.118	0.133	0.002	0.001
<b>Rb</b>	0.086	0.021	0.139	0.646	0.047	0.004	0.611	0.127
<b>S</b>	0.099	0.006	0.011	0.080	0.004	0.018	0.004	0.080
<b>Sb</b>	0.297	0.287	0.415	0.010	0.302	0.065	0.090	0.397
<b>Sc</b>	0.003	0.837	0.325	0.034	0.747		0.054	0.079
<b>Se</b>	0.196	0.346	0.344	0.167	0.390	0.175	0.004	0.335
<b>Sr</b>	0.151	0.107	0.070	0.327	0.138	0.144	0.541	0.046
<b>Ta</b>	0.405	0.000	0.193	0.055	0.010	0.118	0.157	0.418
<b>Te</b>	0.016	0.034	0.001	0.200	0.007	0.038	0.609	0.015
<b>Th</b>	0.010	0.004	0.002	0.492	0.023	0.054		0.011
<b>Ti</b>	0.414	0.344	0.842	0.004	0.462	0.079	0.011	
<b>U</b>	0.030	0.062	0.064	0.248	0.033	0.022	0.305	0.048
<b>V</b>	0.060	0.446	0.002	0.017	0.290	0.613	0.001	0.000
<b>Y</b>	0.045	0.535	0.147	0.267	0.516	0.756	0.312	0.017
<b>Zn</b>	0.006	0.658	0.276	0.250	0.614	0.691	0.163	0.093
<b>Zr</b>	0.010	0.604	0.509	0.158	0.663	0.529	0.092	0.368

**Tabla 25.** Selección del elemento normalizador de sedimentos de la plataforma continental de Bahía La Ventana

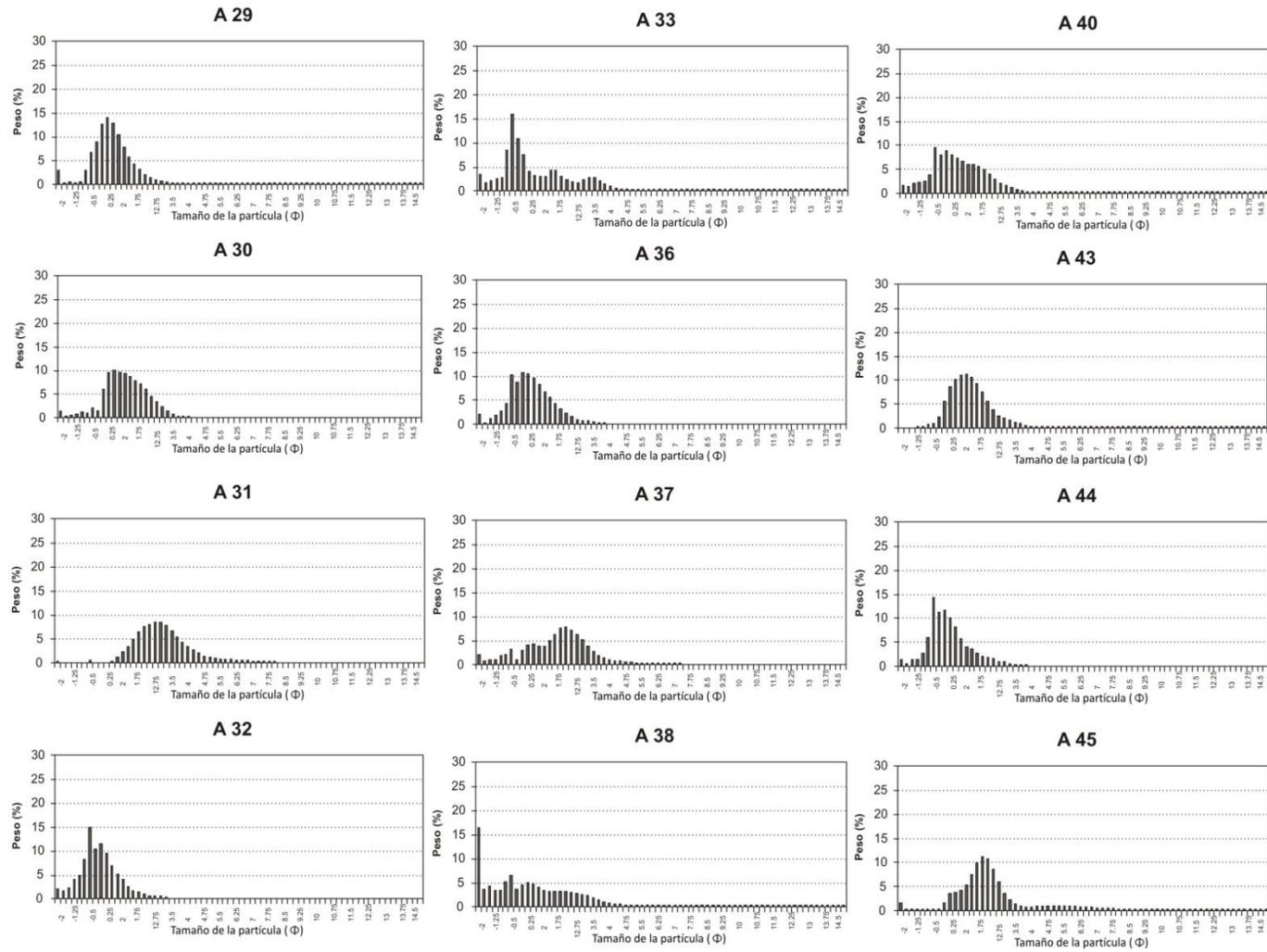
	Al	Co	Fe	Li	Mn	Sc	Th	Ti
<b>Al</b>		0.790	0.750	0.761	0.760	0.094	0.798	0.749
<b>As</b>	0.573	0.820	0.768	0.807	0.765	0.115	0.878	0.757
<b>Ba</b>	0.636	0.295	0.276	0.277	0.265	0.106	0.374	0.268
<b>Be</b>	0.069	0.286	0.331	0.316	0.340	0.081	0.224	0.298
<b>Ca</b>	0.273	0.022	0.016	0.021	0.014	0.005	0.037	0.011
<b>Cd</b>	0.007	0.022	0.015	0.026	0.010	0.055	0.028	0.015
<b>Co</b>	0.790		0.982	0.938	0.973	0.099	0.954	0.963
<b>Cr</b>	0.619	0.824	0.810	0.800	0.823	0.102	0.858	0.743
<b>Cs</b>	0.717	0.953	0.948	0.950	0.955	0.060	0.876	0.921
<b>Cu</b>	0.112	0.242	0.309	0.215	0.254	0.000	0.243	0.227
<b>Fe</b>	0.750	0.982		0.896	0.983	0.090	0.928	0.961
<b>Hf</b>	0.647	0.834	0.802	0.777	0.818	0.083	0.819	0.867
<b>K</b>	0.030	0.030	0.053	0.036	0.053	0.016	0.003	0.036
<b>Li</b>	0.761	0.938	0.901		0.914	0.086	0.896	0.894
<b>Mg</b>	0.015	0.034	0.047	0.060	0.055	0.018	0.016	0.046
<b>Mn</b>	0.760	0.973	0.983	0.914		0.083	0.913	0.972
<b>Mo</b>	0.254	0.215	0.190	0.015	0.202	0.043	0.249	0.203
<b>Na</b>	0.000	0.003	0.007	0.015	0.017	0.185	0.007	0.009
<b>Ni</b>	0.864	0.949	0.933	0.850	0.915	0.101	0.923	0.894
<b>P</b>	0.918	0.724	0.698	0.690	0.717	0.086	0.737	0.726
<b>Pb</b>	0.204	0.297	0.266	0.327	0.210	0.017	0.267	0.234
<b>Rb</b>	0.417	0.746	0.783	0.737	0.792	0.023	0.603	0.728
<b>S</b>	0.754	0.493	0.433	0.522	0.405	0.136	0.578	0.244
<b>Sb</b>	0.339	0.205	0.156	0.300	0.167	0.155	0.284	0.191
<b>Sc</b>	0.749	0.961	0.966	0.847	0.958		0.894	0.241
<b>Se</b>	0.741	0.886	0.876	0.818	0.861	0.108	0.837	0.862
<b>Sr</b>	0.252	0.048	0.038	0.047	0.040	0.009	0.087	0.032
<b>Ta</b>	0.147	0.223	0.255	0.262	0.217	0.100	0.286	0.229
<b>Te</b>	0.275	0.032	0.025	0.053	0.020	0.001	0.051	0.016
<b>Th</b>	0.798	0.954	0.928	0.928	0.913	0.135		0.901
<b>Ti</b>	0.749	0.963	0.961	0.894	0.972	0.095	0.901	
<b>U</b>	0.843	0.569	0.523	0.589	0.518	0.077	0.615	0.541
<b>V</b>	0.695	0.936	0.947	0.871	0.966	0.070	0.838	0.541
<b>Y</b>	0.800	0.936	0.951	0.836	0.941	0.121	0.915	0.944
<b>Zn</b>	0.818	0.981	0.968	0.945	0.962	0.085	0.939	0.946
<b>Zr</b>	0.738	0.911	0.898	0.808	0.895	0.075	0.872	0.911

## Apéndice 2





**Figura 53.** Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos



**Figura 54.** Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos

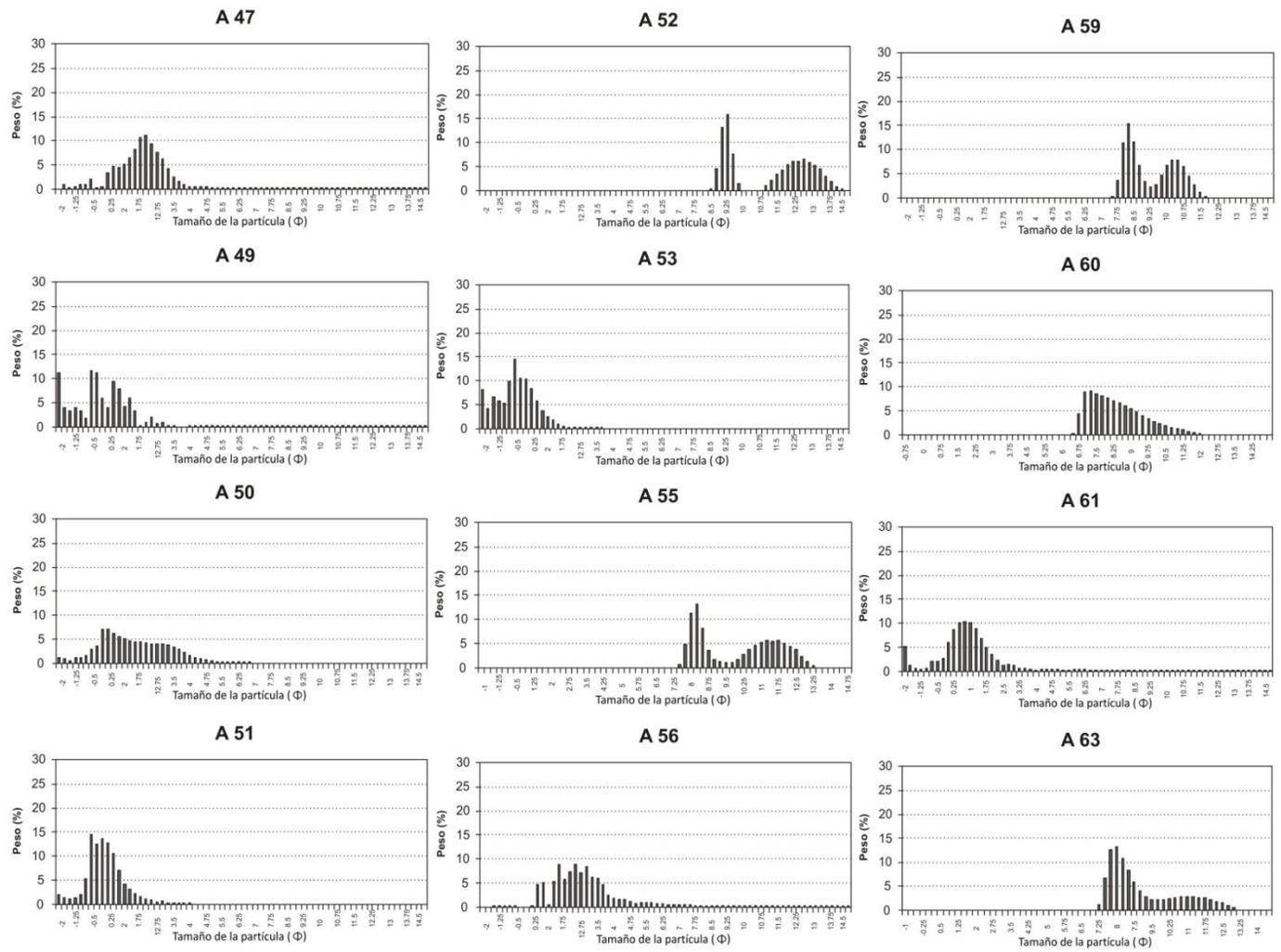


Figura 55. Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos

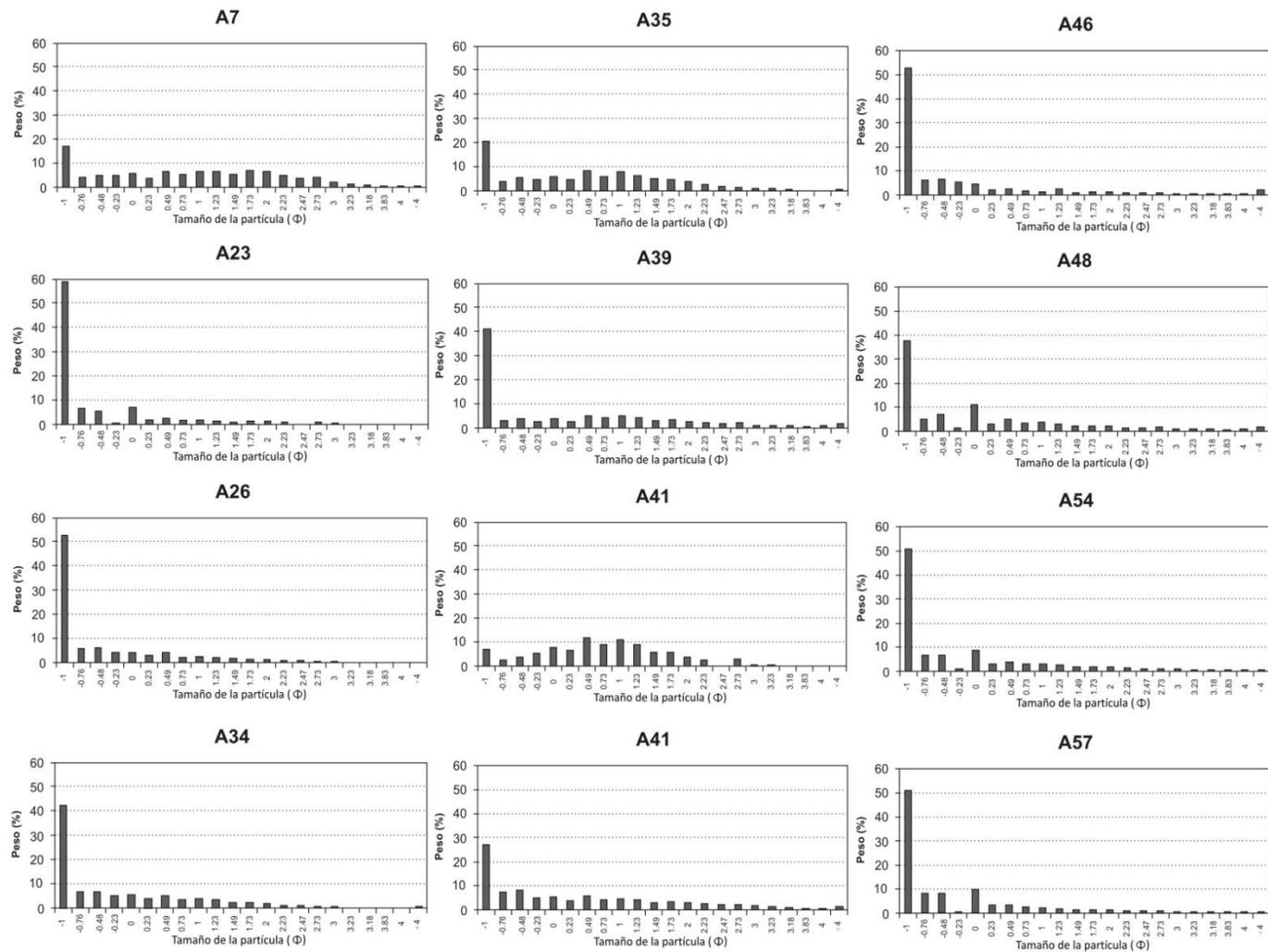


Figura 56. Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos

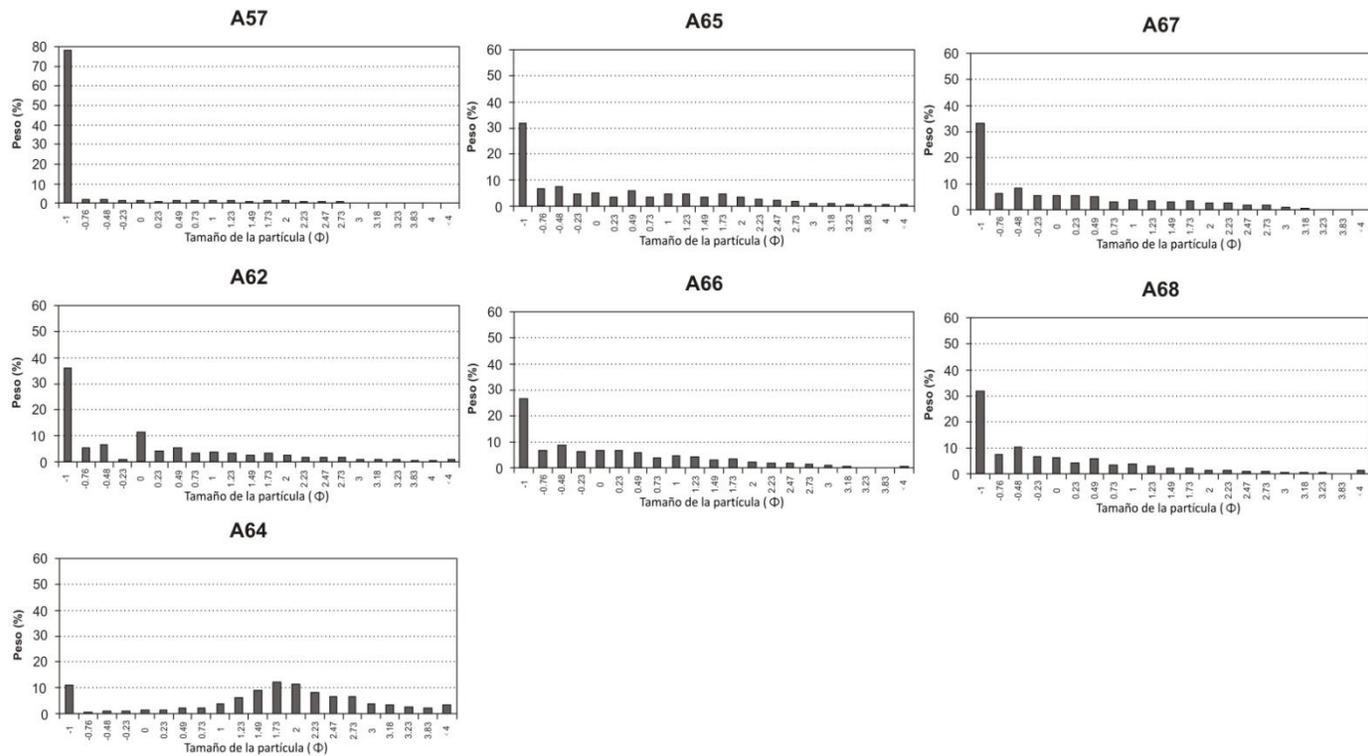
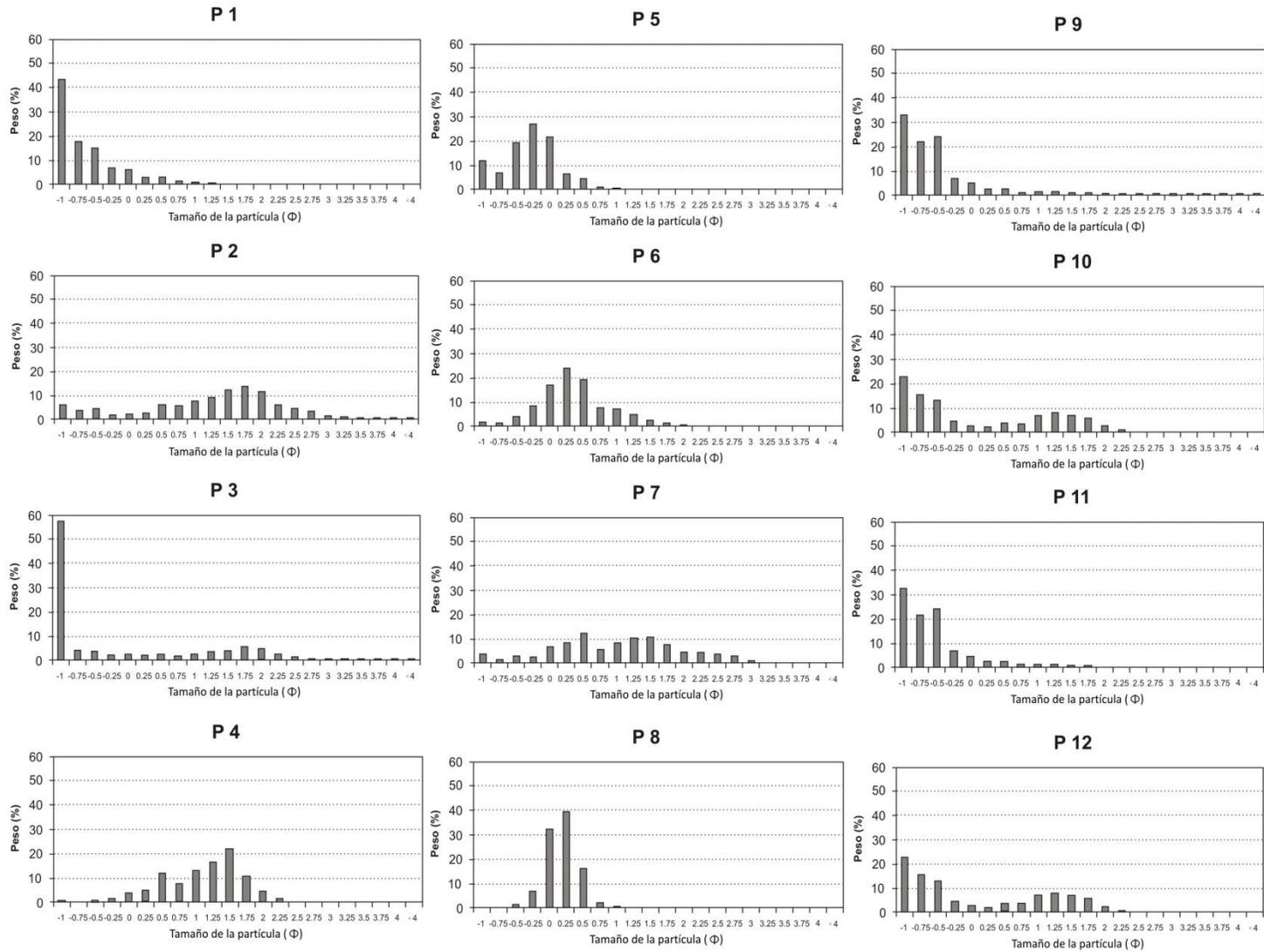
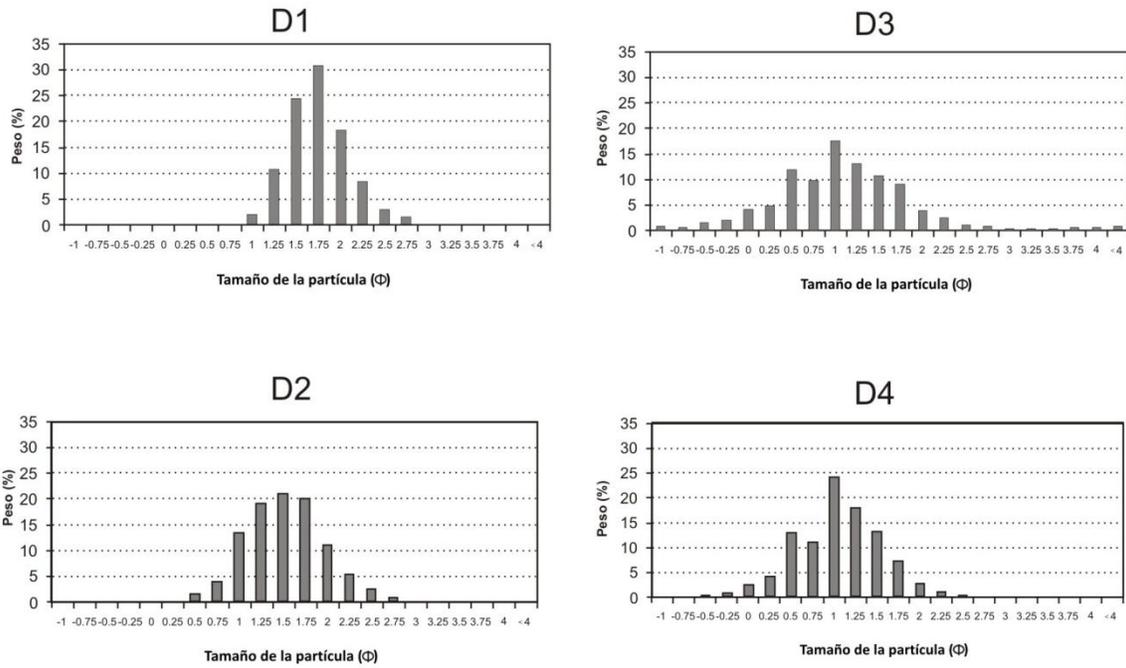


Figura 57. Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de arroyos



**Figura 58.** Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de playa



**Figura 59.** Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de dunas frontales

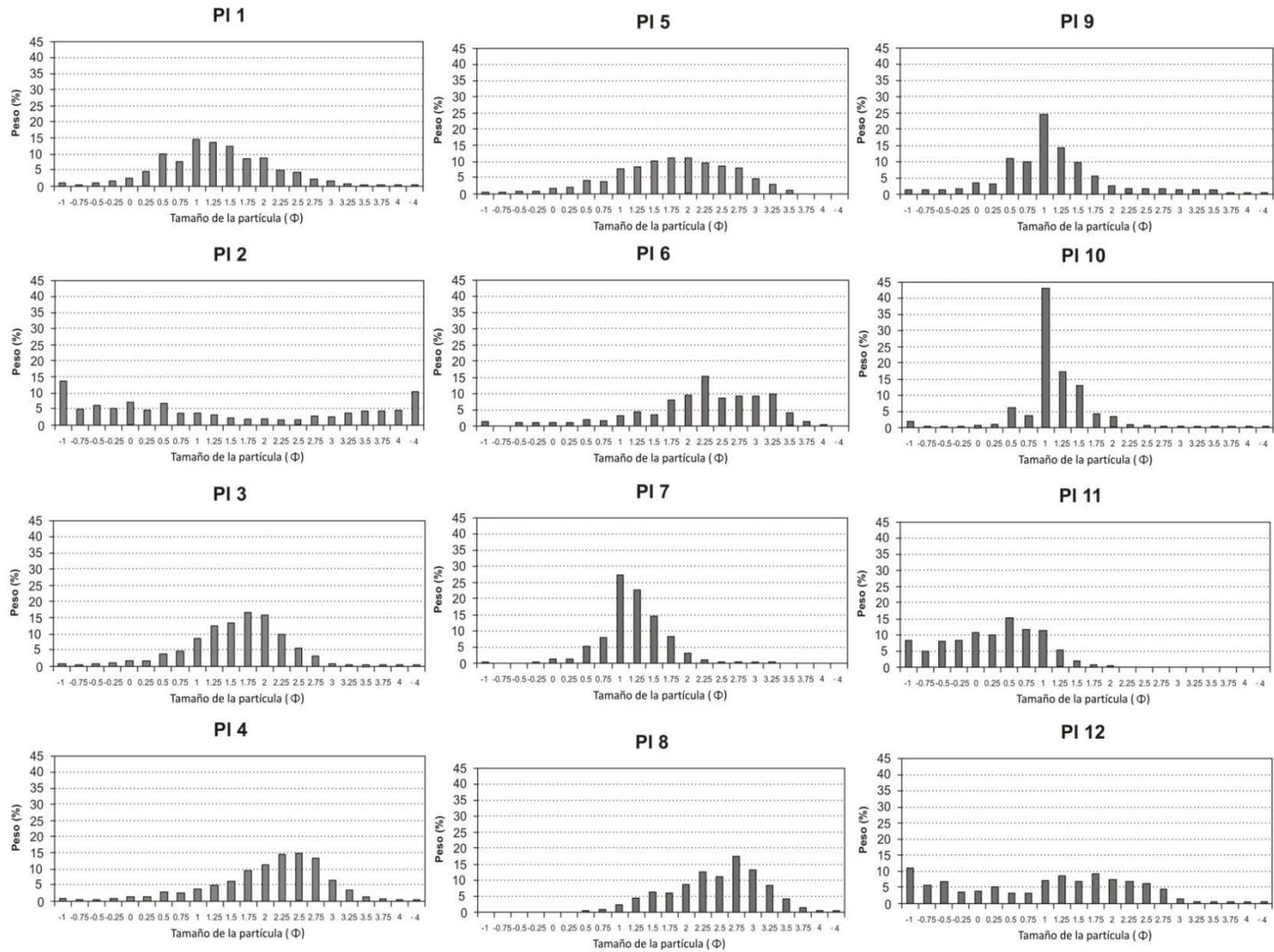
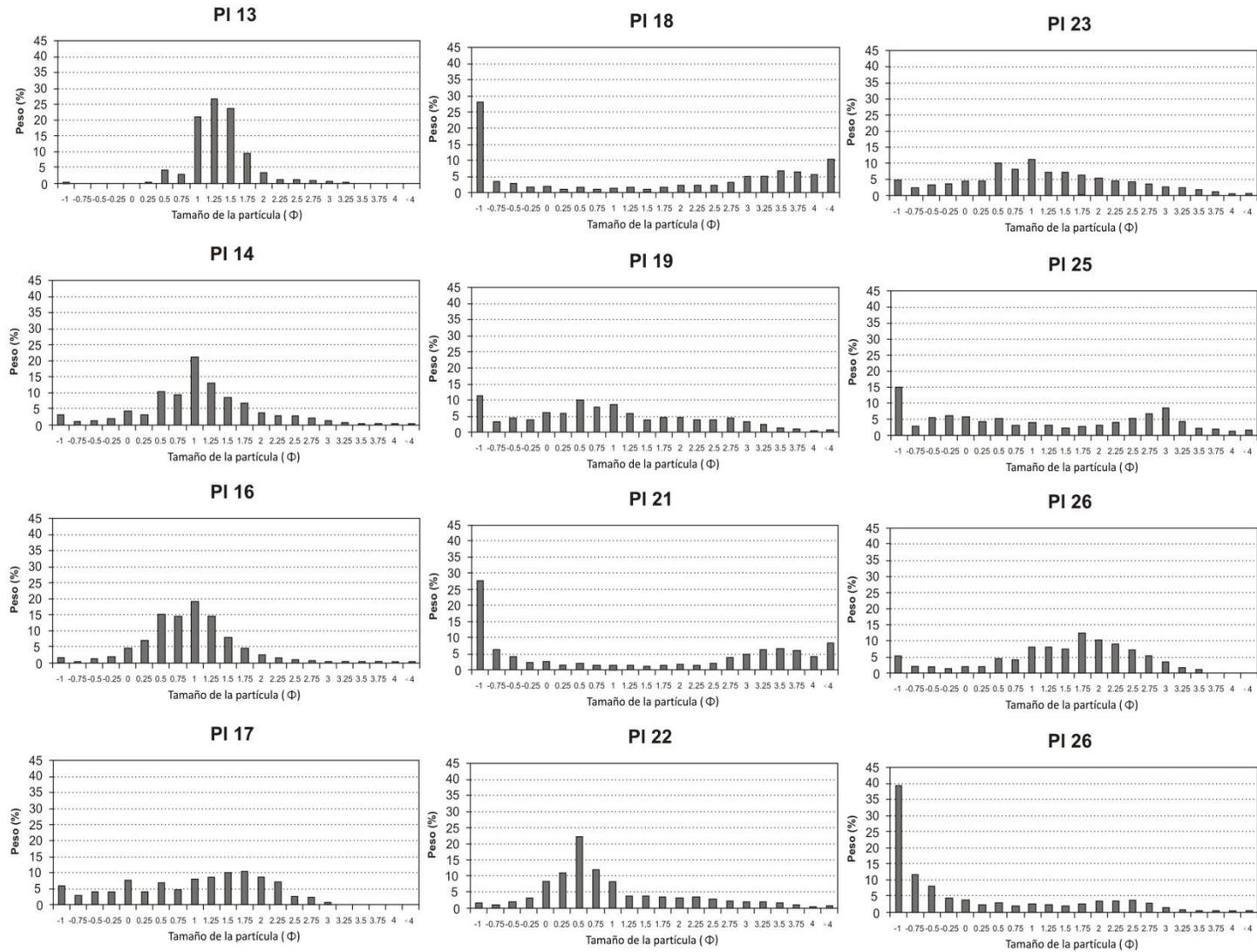
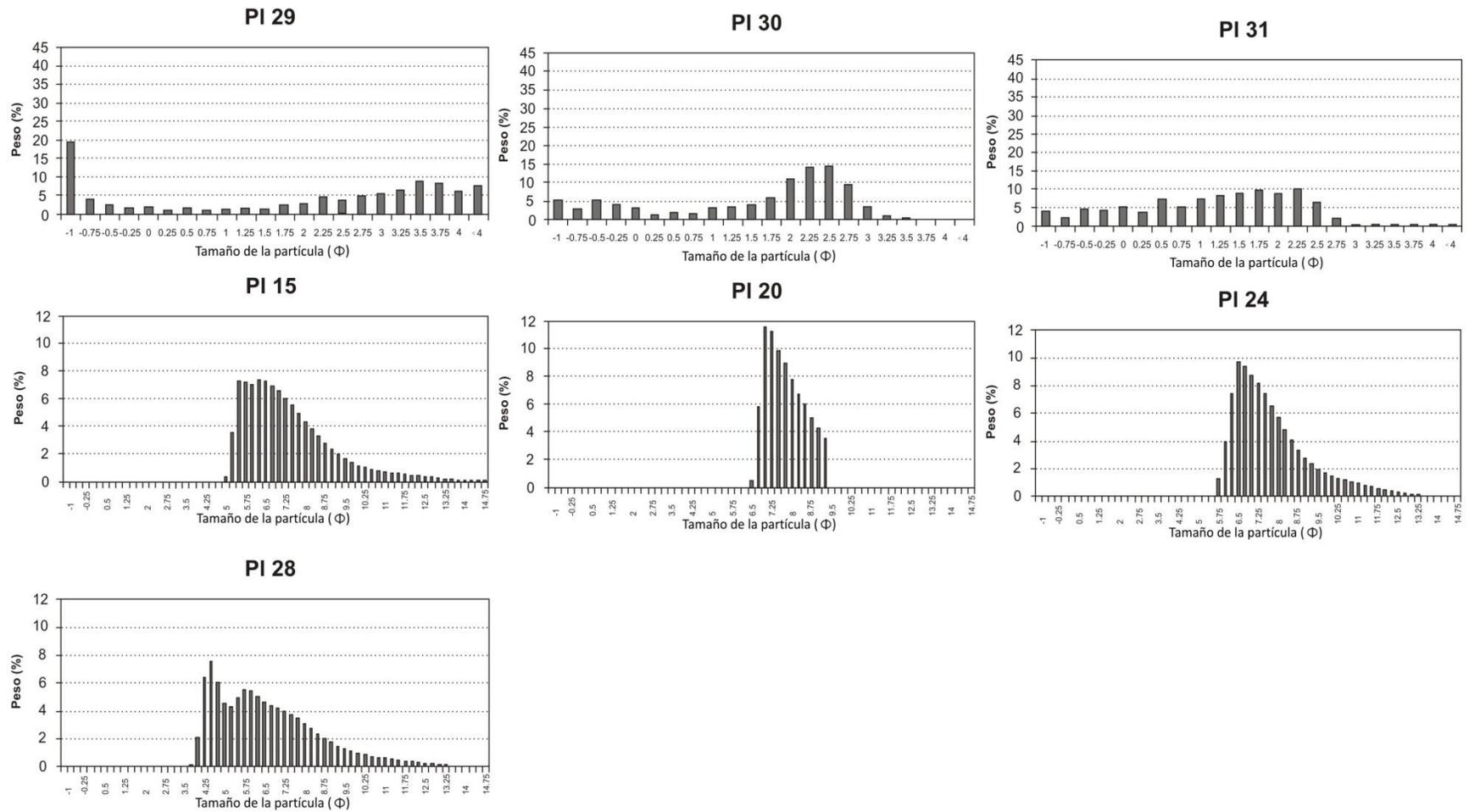


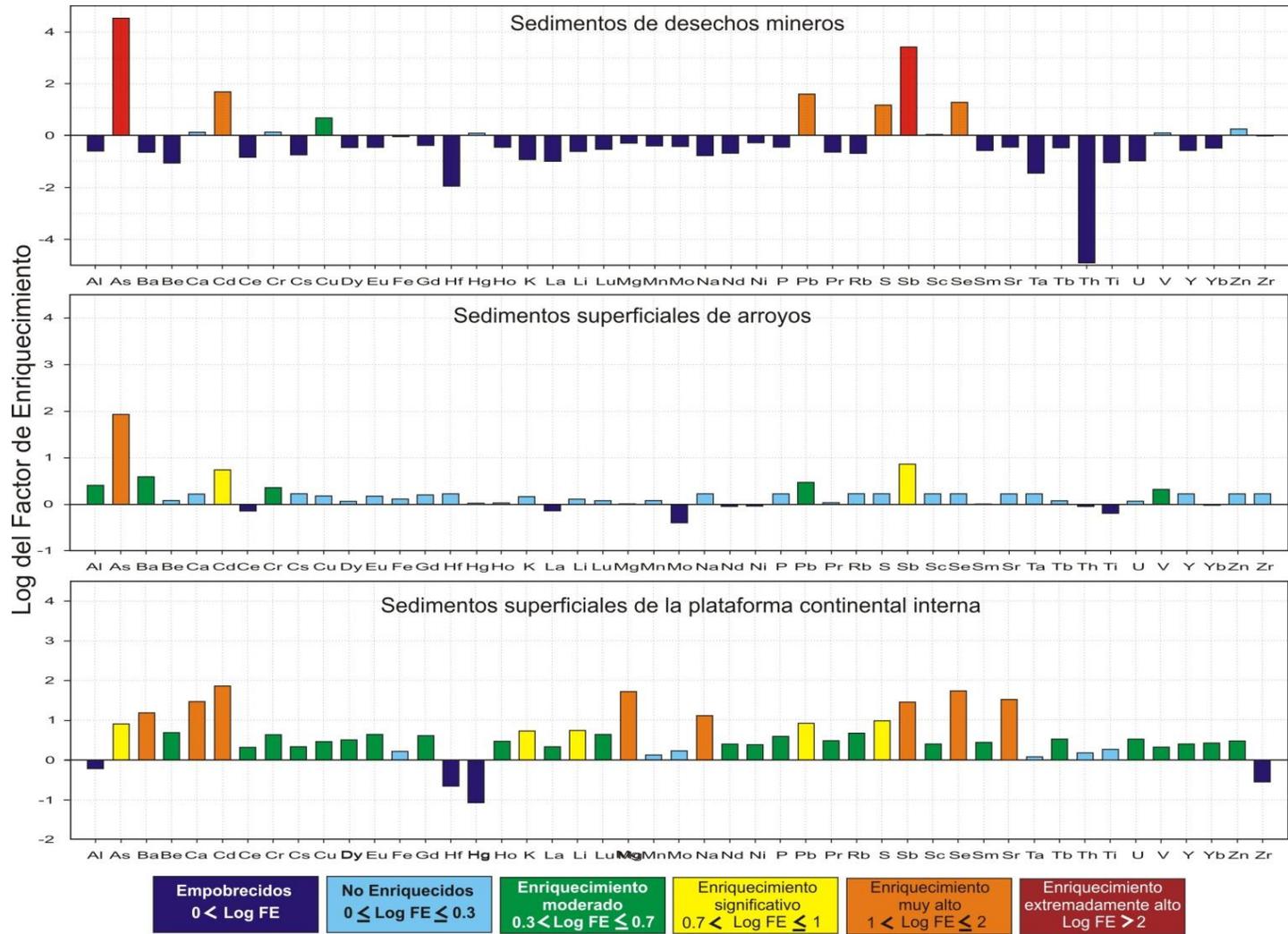
Figura 60. Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de la plataforma continental



**Figura 61.** Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de la plataforma continental



**Figura 62.** Histograma de distribución del % en peso del tamaño de grano para el sedimento de la plataforma continental



**Figura 63.** FE de los elementos mayores y traza en el material sedimentario de los desechos de minería y fundición en San Antonio, sedimentos de arroyos de la Cuenca de San Juan de Los Planes y de la plataforma de Bahía La Ventana



**Figura 64.** Fotografía de la chimenea de fundición de Los San Juanes en San Antonio y diagrama esquemático de la generación de arsenolita dentro de las cámaras de sublimación, tomada de Carrillo (1996)

