

DETERMINACION DE LOS NIVELES DE METALES PESADOS MANGANESO,
PLOMO, COBRE, HIERRO, ZINC, CADMIO Y MERCURIO EN AGUAS Y
SEDIMENTOS EN EL SECTOR "EL BOQUERON" DE LA BAHIA DE SANTA
MARTA

TOMAS GARCIA DIAZ
ROMUALDO MACIAS SOBRINO
MANUEL ENRIQUE TABORDA MARTINEZ

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA
INSTITUTO DE FORMACION AVANZADA
ESPECIALIZACION EN CIENCIAS AMBIENTALES
SANTA MARTA D.T.C.H.
1998

DETERMINACION DE LOS NIVELES DE METALES PESADOS MANGANESO,
PLOMO, COBRE, HIERRO, ZINC, CADMIO Y MERCURIO EN AGUAS Y
SEDIMENTOS EN EL SECTOR "EL BOQUERON" DE LA BAHIA DE SANTA
MARTA

TOMAS GARCIA DIAZ
ROMUALDO MACIAS SOBRINO
MANUEL ENRIQUE TABORDA MARTINEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE ESPECIALISTA EN
CIENCIAS AMBIENTALES

DIRECTOR:
GUSTAVO RAMIREZ TRIANA MSc

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA
INSTITUTO DE FORMACION AVANZADA
ESPECIALIZACION EN CIENCIAS AMBIENTALES
SANTA MARTA D.T.C.H.
1998

PCA
00028
EJ1

NOTA DE ACEPTACIÓN

Fernando Lopez Rios
JURADO

JURADO

DEDICATORIA

A mi hija MARIA ALEJANDRA TABORDA Lo más importante en my vida
A mi Esposa ESTELA DE LA HOZ PERTUZ . Por su apoyo y dedicación.
A mi madre DELFINA MARTINEZ Por sus oportunos consejos y orientaciones.
A mis hermanos José, Juan, Cádiz Gilma, Omaris, Juana y Nicasio Q.E.P.D.

MANUEL ENRIQUE

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA. Nuestra Alma Mater.

A ARMANDO LACERA. Por su incondicional colaboración y orientaciones.

A JOSE PACHECO RICAURTE. Por sus permanentes consejos.

A JESUS TINOCO DEL VALLE Por su permanente estímulo.

A GUSTAVO RAMIREZ TRIANA. Por sus valiosas observaciones.

A GUSTAVO COTES BLANCO. Por su apoyo incondicional.

A RAFAEL GARCIA MERCADO Por su colaboración desinteresada.

AI CENTRO DE INFORMACION DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS.

AL CENTRO DE INFORMACIÓN DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO.

A LA EMPRESA METROPOLITANA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARRILLADO DE SANTA MARTA.

A todas aquellas personas y amigos que de una u otra forma contribuyeron a este gran paso.

INDICE

Pág.

1 INTRODUCCIÓN	
1.1 PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	
1.1.1 Aspectos Generales	
1.2 ASPECTOS TOXICOLOGICOS DE ALGUNOS CONTAMINANTES TIPICOS	10
1.2.1 Mercurio	11
1.2.2 Cadmio	16
1.2.3 Plomo	18
2. ANTECEDENTES.	22
3 . METODOLOGIA	23
3.1 AREA DE ESTUDIO	23
3.1.1 Descripción del Area de Estudio	23
3.1.2 Régimen de Vientos	23
3.1.3 Corrientes	24
3.2 ESTACIONES DE MUESTREOS	27
3.2.1 Sedimentos	27
3.3 ANALISIS EN CAMPO	27

3.3.1 Variables físicas y químicas	27
3.3.2 Muestras de sedimentos	28
3.4 ANALISIS EN LABORATORIO	29
3.4.1 Tratamiento de las muestras.	29
3.4.1.1 Muestras de agua	29
3.4.1.2 Muestra de sedimento	29
3.4.1.3 Metales pesados (Cobre, Zinc, Plomo, Hierro y Manganeso).	30
3.5 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	31
3.5.1 Análisis estadístico para aguas y sedimentos	31
4. RESULTADOS	32
4.1. CONTENIDO DE METALES PESADOS EN AGUAS Y SEDIMENTO.	33
4.2 ANÁLISIS DE VARIANZA EN AGUAS Y SEDIMENTOS	37
5. DISCUSION Y CONCLUSIONES	49
5.1 VARIABLES FISICO-QUIMICAS	49
5.1.1 Aguas Marinas	49
5.1.2 Aguas Residuales	50
5.1.3 Metales pesados en Aguas Marinas y Sedimentos	51
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

INDICE DE TABLAS



	Pág.
Tabla 1. Valores promedio de parámetros físicos y fisico-químicos de las aguas marinas del sector El Boquerón de la ciudad de Santa Marta.	32
Tabla 2. Valores promedio de parámetros físicos y fisicoquímicos de las aguas residuales en el sitio de vertimiento (E ₅) del sector de El Boquerón de la ciudad de Santa Marta.	32
Tabla 3. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del Sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).	33
Tabla 4. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).	33-34
Tabla 5. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).	34

Tabla 6. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).	35
Tabla 7. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas residuales del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).	35
Tabla 8. Concentración (en $\mu\text{g/g}_{(\text{peso seco})}$) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en sedimentos marinos del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).	36
Tabla 9. Concentración (en $\mu\text{g/g}_{(\text{peso seco})}$) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en sedimentos de agua residual del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).	36
Tabla 10. Análisis de varianza a dos vías para comparar las cuatro estaciones marinas (E ₁ , E ₂ , E ₃ y E ₄), y las profundidades (superficie, 3,0, 6,0, y 9,0 metros). y su interacción, respecto a los niveles de metales pesados (mg/l) determinados en agua marina.	37
Tabla 11. Análisis de varianza a una vía para comparar las cinco estaciones de muestreo consideradas, respecto a los niveles de metales pesados (mg/l) encontrados en el nivel superficial.	42
Tabla 12. Pruebas de comparación múltiple por el método de	

diferencia mínima significativa para los análisis de
varianza de una vía en que se comparan los niveles
de metales pesados encontrados en agua superficial
de las cinco estaciones de muestreo. 43

Tabla 13. Análisis de varianza a una vía para comparar las cinco
estaciones de muestre consideradas, respecto a los niveles
de metales pesados ($\mu\text{g/g}_{(\text{peso seco})}$) y porcentaje de materia
orgánica determinados en el sedimento. 44

Tabla 14. Pruebas de comparación múltiple por el método de
diferencia mínima significativa para los análisis de
varianza de una vía en que se comparan los niveles
de metales pesados y el % de materia orgánica
encontrados en los sedimentos de las cinco estaciones
de muestreo adjuntas al sitio de vertimiento de las aguas
residuales de la ciudad de Santa Marta 46

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Interrelación entre los ciclos geológicos y biológicos	7
Figura 2. Producción y transformación de materias primas y su impacto en el medio ambiente	8
Figura 3. Esquema del ciclo biogeoquímico de metilación y demetilación del mercurio	13
Figura 4a. Relación entre los factores estación y profundidad de la columna de agua para Manganeso	38
Figura 4b. Relación entre los factores estación y profundidad de la columna de agua para Hierro	39
Figura 4c. Relación entre los factores estación y profundidad de la columna de agua para Plomo	40
Figura 4d. Relación entre los factores estación y profundidad de la columna de agua para Cobre	41

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Comparación de la concentración mínima y máxima de los metales pesados ($\mu\text{g/g}$ peso seco) en los sedimentos ,marinos y residuales del sector de "El Boquerón" Bahía de Santa Marta con otras áreas tropicales e subtropicales. Los sedimentos fueron analizados en fracción total y extracción parcial. La concentración permisible por la EPA (Lacera, 1983) es mostrada para comparación.

ANEXO B. Mapa, Ubicación del área del estudio

RESUMEN

A través de análisis físicos y químicos se determinaron los niveles de metales pesados Hierro, Cobre, Zinc, Cadmio, Plomo, Mercurio y Manganeso en el sedimento y agua residual Municipal de la ciudad de Santa Marta, así como también en los sedimentos de la rada de "La Aguja" (sitio donde se alojan los desechos líquidos de la Ciudad Bahía de Santa Marta). Este estudio se realizó en el sector "El Boquerón" tomando cinco estaciones de muestreo: a 50 metros; 75 metros; 100 metros; lado este y 100 metros; lado oeste del sitio de vertimiento de las aguas residuales y la estación cinco en el sitio de Descarga de las aguas residuales. Se establecieron niveles de dichos metales que comparados con estudios similares en la Costa caribe y regiones tropicales y subtropicales de otros países resultaron mayores, por lo cual existe la posibilidad, en un futuro, del rompimiento de la cadena trófica.

SUMMARY

In this study were established the levels of some heavy metals (Iron, Copper, Zinc, Cadmium, Lead, Mercury and Manganese), at sediments and Municipal waste water from Santa Marta City.

This study was also carried out in sediments from "La Aguja", in Santa Marta Bay, in front of "EL Boqueron", where the Santa Marta City discharges her waste water. In fact, it was located five reference stations: 1) to 50 meters; 2) to 75 meters; 3) to 100 meters (east side); 4) and 100 meters (West side) from discharges point; and 5) discharges point.

Results indicated that levels of heavy metals are higher than another values established in similar studies carried out in Caribbean coast and tropical and subtropical area of the world. It's possible this that heavy metals accumulation affect The Food chain, in the future.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

1.1.1 Aspectos Generales

Todos los organismos vivientes mantienen una continua y compleja interacción con el entorno inorgánico en el cual se encuentran insertados y en el que desarrollan todos sus procesos vitales. Como consecuencia de su evolución y desarrollo, han logrado adaptarse a ese entorno y, asimismo, han generado mecanismos adecuados de defensa y protección para enfrentar situaciones riesgosas a las que el entorno los puede someter.

Sin embargo, debido a los cambios profundos que el medio ha venido sufriendo, debido a la actividad del hombre y a la continuada y creciente explotación de la naturaleza, el entorno ha comenzado a plantear problemas ante los cuales muchos mecanismos de defensa se encuentran impotentes o resultan inefficientes. Este es, básicamente, el aspecto central de los problemas actuales que plantea la creciente contaminación ambiental.

En primer lugar es necesario destacar que la mano del hombre ha alterado notablemente el ritmo geológico en el movimiento de los elementos.

Así por ejemplo, estudios recientes han demostrado que la concentración de plomo en la atmósfera ha aumentado más de 100 veces en los últimos 3000 años. Y variaciones de magnitud similar o superior se dan, obviamente, para muchos otros elementos.

Los elementos que entran en el medio ambiente pueden ser clasificados, en principio, en tóxicos y no-tóxicos, a pesar de que esta clasificación es relativa ya que, como también se ha discutido aun ciertos elementos esenciales absorbidos en exceso por los organismos, se transforman en tóxicos o perjudiciales.

Por otra parte, es interesante tener presente que varios de los elementos reconocidos como tóxicos para casi todos los organismos están ubicados, en el sistema periódico de los elementos, muy cerca de otros que son esenciales.

Este hecho permite sacar la inmediata conclusión de que el posible modo de acción de estos elementos tóxicos se origina en algún tipo de competencia con los elementos esenciales que son químicamente similares a ellos, por ejemplo Zn/Cd,Hg; Ca / Pb,Cd; K/ Ti; Mg/Be,Al; P/As, S/Se.

Otro aspecto que debe tenerse siempre presente, y que muestra la enorme complejidad del tema tratado, es que los problemas de la

contaminación no involucran sólo a los ciclos biológicos sino también a los geológicos, como los muestra la Figura 1. Es decir, una correcta y adecuada comprensión de todos los equilibrios que este gráfico sugiere, es indispensable para poder encarar y tratar de solucionar correctamente los problemas que actualmente plantea el medio ambiente, para cuyo tratamiento incluso ha llegado a acuñarse el nuevo término de Química Ecológica y que sugiere la aparición y consolidación de una nueva y específica actividad multidisciplinaria.

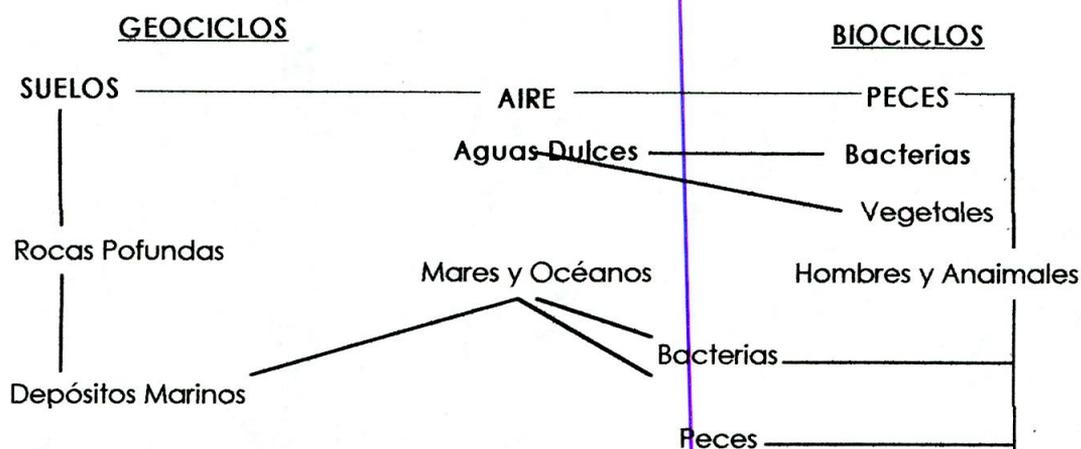


Figura 1. Interrelación entre los ciclos geológicos y biológicos.

Por otro lado, hay que tener bien en claro que en todos los procesos que involucran la obtención de una determinada materia prima, su transformación, depósito y transporte y luego su utilización y consumo, se produce algún tipo de emisión material o de residuo, los que llegan al medio ambiente a través de la cadena alimenticia al hombre, como se esquematiza en la Figura 2. y el fin último de esta química ecológica sería el de conocer y analizar las interacciones de estos procesos y sistemas químicos en los

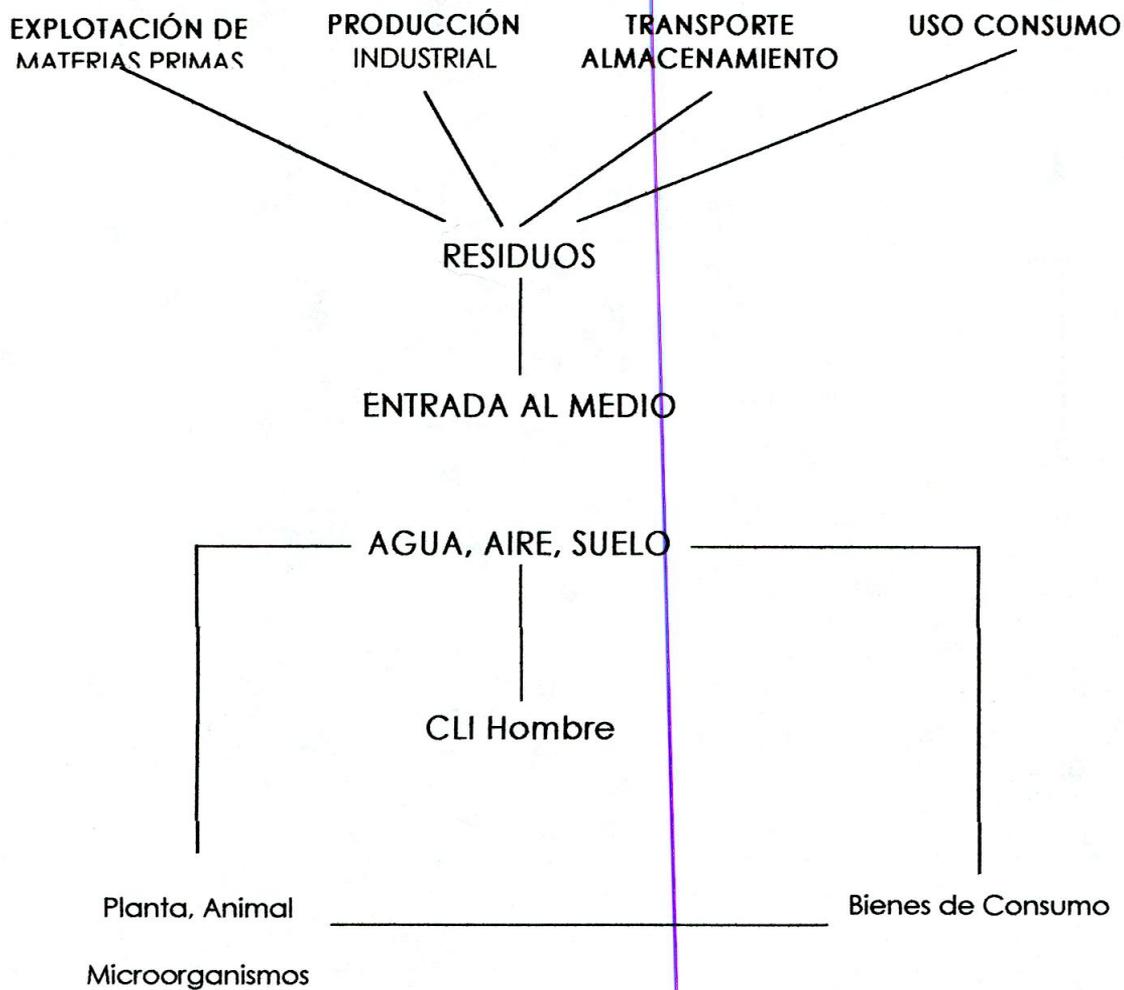


Figura 2. Producción y transformación de materias primas y su impacto en el medio ambiente.

Diferentes comportamientos del ecosistema y con los organismos que los habitan a efectos de determinar, o mejor aun de prever y prevenir, efectos adversos de esas interacciones.

Trataremos ahora de analizar los efectos de toxicidad con relación a los sistemas bioinorgánicos ya estudiados, dado que a través de este enfoque se puede lograr una imagen bastante clara de la cuestión. En principio, los

mecanismos de toxicidad originados por metales pesados están asociados a uno o más de los siguientes procesos:

1. El bloqueo de un grupo funcional esencial de alguna biomolécula, incluyendo enzimas o polinucleótidos.
2. El desplazamiento de un metal esencial de una biomolécula.
3. La modificación estructural de algún sitio activo importante.
4. La ruptura de biomoléculas.

Todos estos mecanismos de toxicidad, se basan de alguna manera en la fuerte capacidad de coordinación del elemento tóxico. Como ya hemos visto, en muchos sistemas biológicos la actividad está ligada con la presencia de sitios metálicos coordinados a residuos de aminoácidos (nitrógenos imidazólicos, grupos carboxilatos, sulfhidrilo, etc.). Consecuentemente, el metal invasor puede desplazar al esencial de esa posición de coordinación tornando inactivo el sistema.

Así por ejemplo, todos los metales pesados tóxicos, tales como el Pb (II), Hg (II), Cd (II) o Ag (I) se caracterizan por formar sulfuros muy insolubles y por lo tanto han de, manifestar una fuerte afinidad por los radicales -SH de la cisteína y pueden bloquear este residuo que es esencial en muchos procesos biológicos y, en ciertas ocasiones, este simple bloqueo puede producir modificaciones estructurales o conformacionales muy importantes.

Por otro lado, el Be (II) debido a su fuerte poder polarizante, puede desplazar fácilmente al Mg (II) de ciertos sitios activos y de la misma manera el Zn (II) puede ser desplazado por el Cd (II) o el Hg (II).

Estos pocos ejemplos sugieren que muchos de los problemas básicos asociados a la toxicidad de elementos metálicos pueden ser tratados y comprendidos mediante el empleo de ideas muy simple tales como la comparación de la constante del producto de solubilidad, el conocimiento de constante de estabilidad de complejos, las relaciones de tamaño, los efectos ácido-base, las características de polarización y el conocimiento de parámetros termodinámicos y cinéticos. Con esto no queremos de ninguna manera minimizar la complejidad de estos problemas, pero sí enfatizar que muchos de ellos, y sobre todo los procesos que ocurren a nivel molecular suelen poder manejarse muy clara y precisa con herramientas muy simples extraídas de la química inorgánica y de los modelos bioinorgánicos.

Otro problema importante a tener en cuenta es que, de la misma manera que los elementos esenciales, también los tóxicos tienen una determinada ruta de absorción y de incorporación a los organismos, que eventualmente es alguna de las utilizadas por los esenciales, pero la que de todas maneras debe conocerse para poder eventualmente bloquearla en forma eficiente. Y, por otra parte, existen cierto tipo de competencia y de potenciaciones entre diferentes elementos, tóxicos y no-tóxicos, las que también es necesario conocer, para tener una visión completa de esta intrincada y compleja problemática.

1.2 ASPECTOS TOXICOLÓGICOS DE ALGUNOS CONTAMINANTES TÍPICOS

Con el objeto de clarificar algunos de los conceptos generales desarrollados en la sección anterior, analizaremos con mayor detalle el comportamiento de algunos metales típicamente tóxicos.

1.2.1 Mercurio. El mercurio es tóxico en cualquiera de sus formas y además por ser sumamente móvil, la toxicidad de este elemento es un problema de alcance mundial.

Aun en su forma elemental suele ser más tóxico de lo que habitualmente se presupone, produciendo enfermedades crónicas que a todos los que están en continuado contacto con él, tal como los trabajadores de industrias que lo utilizan (procesos electrolíticos con celda que usan cátodos de mercurio, fabricación de termómetros, etc.) o los técnicos de laboratorios químicos.

Estos efectos son especialmente importantes cuando se trabajan espacios poco o mal ventilados y causan diversos tipos de trastornos, ante todo de tipo neurológico.

En su forma oxidada habitual, como Hg(II) , el mercurio es un agente tóxico muy agudo, fundamentalmente por que a pH fisiológico es muy soluble y no es precipitado por ninguno de los aniones mayoritariamente presentes en los fluidos biológicos.

Se admite que alrededor de un gramo de cualquier sal mercúrica es letal. Pero más tóxicos aun resultan sus derivados organometálicos, como él $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ y especialmente el catión $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}^+$, los que son generados por bacteria alquilantes.

La especial toxicidad de estos compuestos se puede explicar sobre la base de su carácter ambivalente lipofílico/hidrofílico, lo que les permite penetrar con mucha facilidad las membranas.

La metilación del mercurio tiene lugar en sedimentos o suspensiones particuladas en lagos y océanos y estos compuestos son rápidamente acumulados por los organismos acuáticos y a través de ellos pueden llegar a la dieta humana.

La acidificación de los cuerpos naturales de agua parece favorecer estos procesos de biometilación. En la figura 3 se esquematiza este ciclo biogeoquímico.

El catión monometilmercurio es una especie ávidamente acumulada por los organismos, mientras que el dimetil mercurio por ser menos soluble y muy volátil tiende a eliminarse hacia la atmósfera, donde es descompuesto fotoquímicamente.

Si bien todos los procesos aun no se conocen en detalle es evidente la participación de diferentes tipos de bacterias, no sólo en el proceso de alquilación sino también en los de degradación de las especies organometálicas.

A pesar de que el mercurio, en algunas o varias de las formas comentadas, puede distribuirse muy rápidamente, grandes acumulaciones del mismo en espacios acotados han llegado a producir importantes desastres.

Dos de los ejemplos más conocidos y difundido en su momento estuvieron asociados primordialmente al $(\text{CH}_3)\text{Hg}^+$. Entre 1940 y 1960 ocurrió la famosa intoxicación en la bahía de Minamata, en el sur de Japón, la que, como

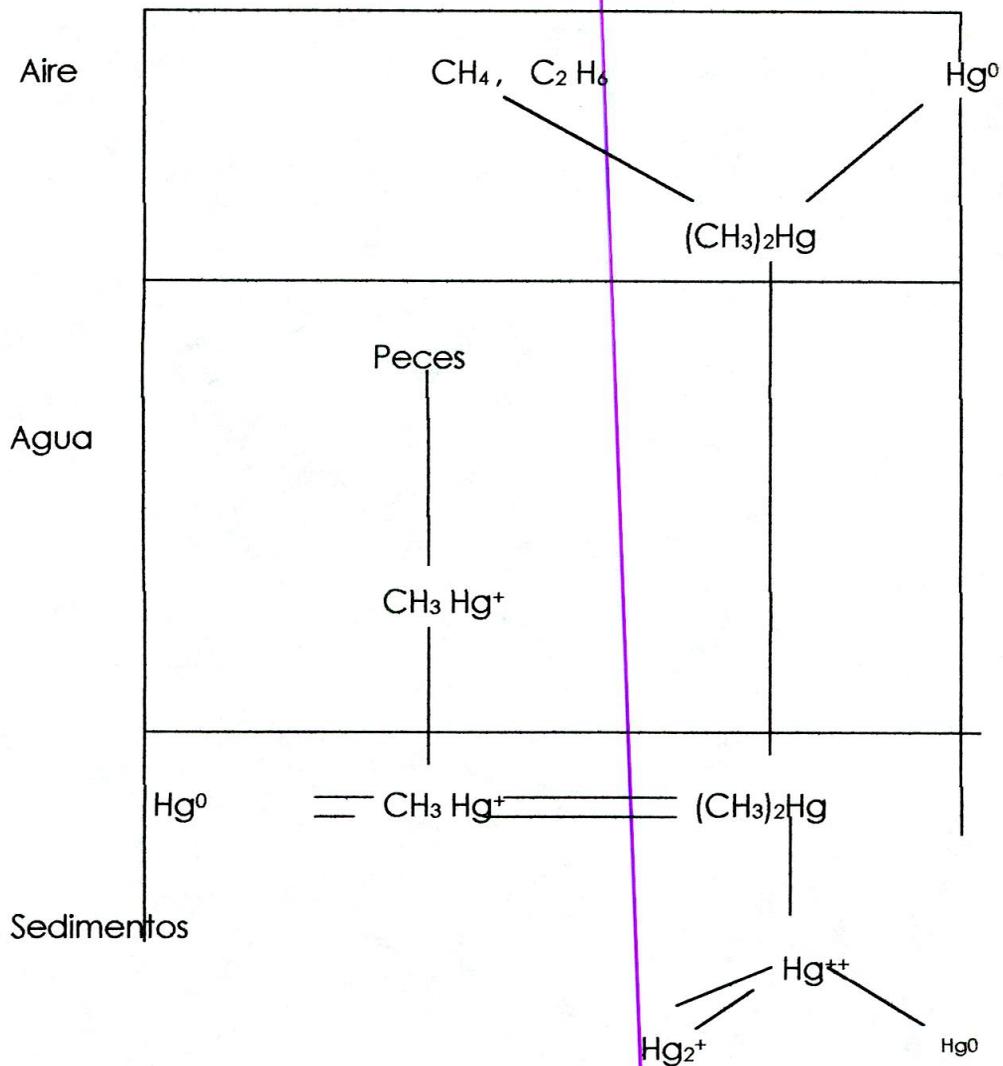


Figura 3. Esquema del ciclo biogeoquímico de metilación y demetilación del mercurio.

finalmente se demostró, estaba asociada con el consumo de pescado contaminado con el mencionado catión, originado por descargas de compuestos mercuriales por parte de una industria química radicada en la bahía. La concentración de mercurio era tan alta, que muchísimos peces murieron, lo mismo que muchas aves que se alimentaban de peces y aun muchos animales domésticos resultaron rápidamente afectados. En los

seres humanos, la intoxicación comenzaba por manifestarse en forma de entumecimiento en diversas partes del cuerpo, seguida de problemas sensoriales y dificultades en el movimiento de las manos. En estadios más avanzados conducía a dificultades generales de coordinación, temblores, dificultades en el habla y la audición y finalmente solía desembocar en una parálisis total, con trastornos respiratorios y convulsiones que finalmente llevaban a la muerte. También se encontró que numerosos recién nacidos, aun en casos en que sus madres solían presentar sólo síntomas leves de intoxicación, aparecían gravemente afectados, lo que demuestra que el monometilmercurio puede descargarse fácil y eficientemente a través de la barrera placental, afectando el feto. Las madres con afecciones más serias generalmente eran incapaces de dar a luz criaturas vivas.

Otra tragedia similar ocurrió en Irak entre 1971 y 1972, donde hubo casos de intoxicación masiva por consumo reiterado de pan preparado con grano de trigo que había sido tratado con fungicidas a base de $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}^+$, la que afectó a más de 6.000 personas y produjo 500 muertes. Los síntomas resultaron similares a los observados en Minamata.

Resulta evidente que en los sistemas biológicos tanto el Hg(II) como el $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}^+$ tienen una fuerte tendencia a unirse a restos sulfhidrilo; de hecho el nombre mercaptán deriva de la fuerte unión entre Hg(II) y los tioles: (Mercurio captans). Si bien esta primera y preferente interacción está claramente comprendida, no ocurre lo mismo con el mecanismo posterior que produce el daño y desbalance final de los sistemas proteicos, aunque es seguro que los compuestos de mercurio atacan centros enzimáticos, desplazando a otros metales de sus uniones con restos $-\text{SH}$, bloquean estos mismos grupos presentes en centros con actividad redox o interactúan

también con puentes de disulfuro que suelen ser importantes en el mantenimiento de ciertas estructuras o conformaciones. Asimismo, se ha demostrado que las especies catiónicas de mercurio pueden interactuar fuertemente con algunas bases nucleicas, posibilidad que seguramente origina acciones mutagénicas por parte de los organomercuriales.

En general, los organismos marinos son capaces de retener durante mucho tiempo concentraciones importantes de $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}^+$, las que aparentemente no les producen daños ni desordenes fisiológicos de importancia.

El atún es uno de los peces que es capaz de acumular cantidades importantes de mercurio y esta elevada concentración no parece ser consecuencia de las condiciones ambientales actuales, como ha sido demostrado reiteradamente a través de análisis cuidadosos del contenido de metales en muestras de especies obtenidas de diversas colecciones zoológicas, sugiriendo que este metal es acumulado por algún proceso típico y específico de este pez, el que evidentemente ha desarrollado también mecanismos adecuados para evitar los efectos tóxicos del mismo.

En efecto se ha encontrado que el atún presenta también una concentración anormalmente elevada de selenio, cuyo contenido crece proporcionalmente con el aumento de la concentración de mercurio, aproximándose a la relación $\text{Hg: Se} = 1:1$, para niveles elevados de mercurio. Este comportamiento sugiere que el selenio desempeña un importante papel en la neutralización de la toxicidad del mercurio, lo que ha sido corroborado independientemente al alimentar con carne de atún a animales de laboratorio intoxicados con este elemento en los que se

observó una rápida disminución de los efectos tóxicos.

1.2.2 Cadmio. En su forma catiónica normal, como Cd (II), este elemento presenta fuertes analogías químicas con dos elementos esenciales, el Zn (II) y el Ca (II). Y, de alguna manera, estas analogías dan cuenta de sus principales efectos tóxicos.

Por un lado, puede desplazar al Zinc de algunos de sus sitios activos y por el otro, compite con el calcio en ciertos sistemas biológicos y también puede ser incorporado al hueso, ocupando los sitios del calcio en las apatitas biológicas.

El cadmio puede entrar a los organismos, ya sea por vía respiratoria o bien a través de los alimentos.

Una enfermedad crónica bien conocida y asociada a exposiciones prolongadas a excesos de cadmio es el mal conocido con el nombre de <<itai-itai>> y que ocurre en forma endémica en la cuenca del río Jintsu, en el Japón. Este río tiene niveles de cadmio marcadamente elevados, de forma tal que esa sobrecarga afecta de alguna manera a toda la región, e incluso ha aumentado los niveles de este elemento en el arroz que se cosecha en la misma. En esta enfermedad ocurre una paulatina incorporación de Cd(II) a los tejidos duros, la que finalmente genera una gran fragilidad y dolorosas deformaciones del material óseo.

El cadmio se acumula principalmente a nivel del riñón, donde tiene un tiempo de residencia extremadamente largo, lo que genera una continuada acumulación del elemento a lo largo de la vida, en este

órgano. Interesante de comentar es que los fumadores presentan, tanto en el riñón como la sangre, niveles de Cd (II) marcadamente más elevados que los no fumadores e, incluso, el humo del cigarrillo constituye una de las fuentes de absorción de cadmio más efectivas; por otro lado, experiencias recientes con animales han demostrado que el cadmio posee acción carcinogénica.

Por otra parte, y a diferencia del mercurio, el cadmio no puede atravesar fácilmente las membranas biológicas, situación seguramente originada en su escasa tendencia a formar complejos organometálicos.

En años recientes, se ha sugerido reiteradamente que el cadmio podría tener algún rol esencial. Experiencias con animales han sugerido un cierto efecto del metal sobre el crecimiento, aunque esto no está todavía definitivamente establecido.

Sus efectos bioquímicos generales son muy variados, actuando como inhibidor de numerosos procesos celulares y asimismo afecta notablemente el metabolismo de algunos otros elementos esenciales, aparte del Zinc (Cu, Fe, Se, Ca). Cuando estos elementos están en defecto, la toxicidad del cadmio resulta potenciada, en cambio, cuando están en exceso, la toxicidad se ve disminuida.

Los mecanismos exactos de toxicidad, que seguramente son múltiples, todavía no se conocen con claridad. Los síntomas de intoxicación incluyen, fuerte dolores de cabeza, vómitos y calambres abdominales, acompañados muchas veces de cuadros de hipertensión. En los casos de intoxicación también se observa una creciente eliminación urinaria de

glucosa, aminoácidos y proteínas de bajo peso molecular así como un aumento de la relación Ca/P.

El papel protector de las metalotioneínas frente a la acumulación de niveles tóxicos de cadmio ya ha sido comentado, y origina sin duda, otra forma de interacción del cadmio con el metabolismo del zinc. Asimismo, se ha reconocido una cierta competencia entre la absorción de Cd (II) y Ca (II), demostrándose que bajos niveles de calcio, favorecen la absorción de cadmio.

También es interesante consignar que algunas levaduras han desarrollado estrategias diferentes para la detoxificación de cadmio, eliminándolo en forma de pequeñas partículas de sulfuro de cadmio (CdS), estabilizadas por péptidos de bajo peso molecular.

1.2.3 Plomo. Este metal se conoce desde hace más de 5.000 años y sus efectos tóxicos ya fueron señalados por los griegos, los árabes y los romanos. Especialmente durante el Imperio Romano, deben haberse dado intoxicaciones continuadas, debido al uso intensivo de vasijas y muchos otros implementos de plomo. También muchos pintores, entre ellos Goya, sufrieron intoxicaciones por el continuado contacto con pinturas a base de este metal. El aire de las grandes ciudades ha sido contaminado crecientemente por la combustión de naftas, conteniendo tetraetilplomo, como antidetonante. La creciente reducción en el uso de este aditivo en muchos países, ya ha mostrados efectos positivos a este respecto.

Aparte de este plomo ambiental, la mayor fuente de incorporación sigue

siendo la dieta la que, afortunadamente, no permite una absorción muy intensa debido a la fácil formación de compuesto insolubles, tales como el fosfato de plomo, $Pb_3(PO_4)_2$, o el carbonato básico de plomo, $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$. Parte del plomo absorbido puede finalmente ser acumulado en el hueso, el que de esta manera actúa seguramente como agente detoxificante.

El plomo Pb (II) tiene también tendencia a unirse a grupos-SH, aunque no en forma tan intensa como el mercurio. Por otro lado, interfiere prácticamente todas las etapas de la síntesis de la ferroporfirinas. En particular afecta a la deshidratasa del ácido δ -aminolevulínico, que controla una de las etapas claves en la formación del anillo porfirínico y a la ferroquelatasa, que cataliza la incorporación del hierro Fe (II) a la porfina.

La toxicidad aguda produce vómitos y falta de apetito así como malfunción renal y desórdenes nerviosos. Estos efectos se ven potenciados en el caso de pacientes que presentan deficiencias de calcio o de hierro.

La contaminación marina es un problema complejo y de carácter mundial por la magnitud de los daños que produce en ecosistemas; y, en general al medio ambiente, afectando de esta forma los aspectos socioeconómicos de un país (PNUMA-CPPS, 1988).

La contaminación por metales tóxicos se ha identificado, quizás, como la más peligrosa para el ambiente (STOKER y SEAGER, 1981; MOORE y RAMAMOORTHY, 1984), ya que no son biodegradables química y biológicamente, a diferencia de la gran mayoría de los contaminantes de

tipo orgánico. Además, pueden ser acumulados en la forma iónica de compuestos orgánicos y permanecer en los organismos por largos periodos (FOXSTARER y MULLER, 1974; CAMPOS, 1990). En la actualidad la demanda sobre la producción energética, industrial, agrícola y minera, unida al aumento poblacional, ha dado como resultado el incremento gradual de la contaminación por metales pesados en la zona costera del Caribe Colombiano (CAMPOS, 1987).

Las descargas indiscriminadas de aguas residuales crudas son fuentes importantes, de material orgánico contaminante, lo que representa alta peligrosidad para sectores de baños próximos a los sitios de descargas permanentes de aguas negras, por lo que la flora y la fauna marinas se encuentran expuestas a la acción degradativa por dicha contaminación.

La finalidad del presente trabajo de tesis se basa en la urgencia de determinar:

a- Los niveles de metales pesados en sedimentos y aguas marinas y residuales vertidas en el sector de "El Boquerón" en la Bahía de Santa Marta.

b- Determinar en aguas marinas, sedimento y aguas residuales los niveles de Manganeseo (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio;.

c- Medir en la zona antes mencionada los parámetros físicos, químicos y fisicoquímicos tales como salinidad, pH, temperatura, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica,

demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno, en las muestras objeto del estudio.

d- Contrastar los resultados del sector de "El Boquerón" y sus alrededores con los previos estudios similares ya referenciados.

e- Establecer las significancias estadísticas entre los diferentes resultados, incluyendo el análisis de correlación para determinar posibles fuentes de contaminación.

2. ANTECEDENTES

El Distrito de Santa Marta carece de plantas de tratamiento para la recuperación de aguas residuales, es así como en la parte urbana y "El Rodadero" se vierten crudas, sin tratamiento y de forma superficial en la caleta El Boquerón, situada al norte de la ciudad, en el cerro de "El Ancón".

En consecuencia hay pruebas de contaminación ambiental de los recursos naturales aguas (dulces y marinas) aire, suelo y deterioro del entorno natural, con base en los siguientes estudios previos de Campos (1987), Escobar (1988), Cruz y Ramírez (1990), Castillo, Cotes y Palacio (1996), Altamar, y Gaitan (1996), y Lacera (1994).

3 . METODOLOGIA

3.1 AREA DE ESTUDIO

3.1.1 Descripción del Area de Estudio. La ciudad de Santa Marta, capital del departamento del Magdalena, está localizada en la bahía del mismo nombre el norte de la Costa Caribe de Colombia. Al norte de la ciudad se forma la península denominada "Punta Betín" donde se encuentra la caleta "Boquerón," que es el sitio de vertimiento al mar de las aguas residuales de Santa Marta y de El Rodadero.

3.1.2 Régimen de Vientos. En septiembre los vientos predominantes son NW y SW con 43% de ocurrencia y velocidad promedio de 8.2 nudos. Los periodos de calma son del 16%, los vientos del sur ocurren en un 13.3% de las observaciones, con una velocidad promedio de 12 nudos, pero el FETCH disponible es muy corto por lo que las olas que pueden generar no alcanzan a absorber gran cantidad de energía.

Durante el mes de octubre el porcentaje de ocurrencia de vientos del SW y NW aumentan al 58.1% con una velocidad promedio de 8.8 nudos; los vientos del sur ocurren el 22.6% del tiempo, con velocidad promedio de

12.9 nudos.

En el mes de noviembre se nota la presencia de los alisios y la dirección del viento predominante cambia al N con una ocurrencia del 50% y velocidad promedio de 11,3 nudos. Sin embargo, los vientos del sur continúan presentes con un 16.1 % y velocidad promedio de 12.7 nudos. La presencia de vientos del tercer y cuarto cuadrantes durante estos tres meses tiene gran efecto a nivel local, así como el mar de leva generado por los huracanes y tormentas tropicales durante los meses de junio a septiembre.

En el mes de abril se tiene la influencia de los alisios y la dirección del viento predominante cambia al NE, con ocurrencia del 20 % para velocidades menores de 11 nudos y del 2% para velocidades mayores de 34 nudos.

De noviembre a marzo los vientos predominantes provienen del NE y asumen una característica de "Encajonamiento" cuando llegan al puerto, al pasar a través de la Sierra e ingresar a la Bahía a Través del cañón de Manzanares.

Entre marzo y diciembre se localiza un viento local tipo alisio que se extiende dos a tres millas mar afuera de la costa con dirección SW entre las 10 y 13 horas.

3.1.3 Corrientes. El régimen hidrodinámico de la Costa Caribe Colombiana está influenciado por el brazo Colombia de la corriente del

Caribe, la contracorriente de Panamá o del Darién, el régimen de vientos y el efecto de los cambios de marea. El comportamiento de las corrientes en el área de Santa Marta se inscribe dentro de este concepto general, con variaciones específicas controladas por el campo de viento principalmente y la conformación de la Costa.

El área marina comprendida desde Santa Marta hasta Coveñas es el más significativo para la zona de estudio por cuanto la estructura de la Sierra Nevada y la costa escarpado hacia Oriente y Norte, la protegen de las condiciones reinantes frente a la Costa de la Guajira.

La corriente frente a la costa de la Guajira tiene una dirección permanente hacia el Oeste y su velocidad se intensifica durante los meses de enero, febrero y marzo como consecuencia de la acción de los vientos alisios y genera una importante zona de Surgencia debido a la aceleración de Coriolis y la barrera que la costa le ofrece al transporte horizontal de las masas de agua. Esta situación cambia cuando la costa deja de ser paralela a la dirección del viento, como ocurre entre Santa Marta y Boca de Cenizas y, más particularmente, entre Taganga y Ciénaga, donde la dirección es N-S, todo lo cual genera la desaparición de la Surgencia para formar una corriente en dirección semicircular E-NW y finalmente al W al entrar en contacto con la corriente del Caribe.

Las corrientes marinas en la zona de estudio presentan un patrón de circulación muy dependiente del sistema de vientos. En el periodo de sequía, los fuertes y persistentes vientos alisios del EN crean corrientes con flujo EW paralela a la Costa con una velocidad promedio de un nudo; durante el periodo lluvioso, que es cuando la fuerza de los alisios es menor,

la corriente anterior es contrarrestada por una contracorriente WE originada en el Caribe Sur- Occidental a la altura del Golfo de Urabá con velocidad promedio de 0.6 nudos.

En la zona de vertimiento de las aguas residuales ("El Boquerón") mediante seguimiento de la mancha de residuales, se han observado dos corrientes superficiales predominantes:

1. Periodo de lluvias (entre mayo y noviembre). Con vientos predominantes del S-W se produce el desplazamiento de aguas en dirección N hacia la Costa, en este sentido Taganga es la Bahía que podría ser afectado grandemente por las descargas. También, mediante el emisario de emergencia, en esta época lluviosa hay descarga directa de aguas residuales y pluviales en el sector de la Policía Portuaria, en el costado norte de la Bahía de Santa Marta.

2. Periodo de sequía (diciembre - abril). Con vientos predominantes del NE, las aguas residuales descargadas en el Boquerón toman una dirección SW, hacia mar adentro y no logran penetrar en la Bahía de Santa Marta. Esta situación que es la más común, también ocurre durante la época lluviosa bajo ciertas condiciones.

Durante el presente estudio se llevaron a cabo dos muestreos de aguas residuales, aguas marinas y sedimentos, comprendiendo los meses de mayo y septiembre de 1997, que a pesar que corresponde a época lluviosa los volúmenes de precipitación fueron inferiores a los promedios históricos debido a la anomalía climática global originada por el fenómeno del "Niño" que altero el ciclo de las lluvias en la costa caribe, por

la perturbación del movimiento de la zona de confluencia intertropical y el efecto de los alisios del Nor- Este (NE).

3.2 ESTACIONES DE MUESTREOS.

Para los análisis de aguas y sedimentos en el sector del Boquerón se seleccionaron cinco estaciones para la recolecta de las muestras, estableciendo en cada una de ellas estratificaciones verticales. En aguas marinas. Se muestreó agua superficial y de 3, 6 y 9 metros de profundidad, respectivamente. Las estaciones fueron localizadas así: Estación Uno (E₁) a 50 metros del sitio del vertimiento de las aguas residuales; Estación Dos (E₂), a 75 metros del sitio de vertimiento de las aguas residuales; Estación Tres (E₃), a 100 metros y en dirección este (E) del sitio de vertimiento de las aguas residuales (cerca del litoral rocoso). Estación Cuatro (E₄), a 100 metros y en dirección Oeste (W) del sitio del sitio del vertimiento de las aguas residuales (cerca del litoral rocoso) y Estación Cinco (E₅) en el sitio de descarga del agua residual.

3.2.1 Sedimentos. El muestreo se localizó en las mismas estaciones anteriormente descritas, recolectando muestras de sedimento superficial.

3.3 ANALISIS EN CAMPO

3.3.1 Variables físicas y químicas. En cada una de las estaciones y para cada período de muestreo se midieron *in situ* la salinidad en o/oo y el oxígeno disuelto (en mg/l) con un oxímetro WTW, Modelo 320 set El pH se

determinó con un pH-metro WTW modelo 320 set.

La conductividad Eléctrica y sólidos disueltos se midieron con un conductímetro WTW modelo 320 set.

La Turbidez se midió con un turbidímetro Obrero Hellige Modelo 966.

Las muestras de agua marina, se recolectaron, en cada área de estudio, con una botella Ruttner de capacidad de un litro.

Las muestras de agua residual se recolectaron directamente en recipientes de vidrio de capacidad de un litro. Se tomaron dos muestras, una de las cuales fue acidificada con ácido nítrico para la determinación de metales totales y la otra muestra se usó para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno.

Las muestras se tomaron entre las 7.45 A.M. y las 10:30 A. M.

3.3.2 Muestras de sedimentos. Las tomas de sedimentos se realizaron con una draga tipo Ekman, de la cual se tomó sólo la parte central de la muestra de sedimento, esto con el fin de evitar posibles contaminaciones de las muestras con las paredes metálicas de la draga (González, 1991. Linhars; *et al*, 1996).

Las muestras fueron transportadas en bolsas plásticas previamente esterilizadas.

3.4 ANALISIS EN LABORATOIO

3.4.1 Tratamiento de las muestras.

3.4.1.1 Muestras de agua. En el Laboratorio las muestras de agua fueron sometidas a una digestión con 5 ml con ácido Nítrico concentrado grado espectroscópico, a temperatura de 40°C (a temperaturas mayores los compuestos mercuriales se volatilizan), con el fin de determinar los niveles de metales pesados (Cobre, Cadmio, Zinc, Hierro, Plomo, Manganeso y Mercurio).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se realizaron en las muestras de agua residual utilizando el método manométrico y la oxidación fuerte con dicromato de Potasio, habiendo eliminado el exceso de cloruros con Sulfato de Mercurio (HgSO₄).

Los sólidos totales, sedimentables y filtrables se realizaron utilizando los procedimientos Standard Methods(18),

3.4.1.2 Muestra de sedimento. Secado y Tamizado. Las muestras de sedimento se secaron en estufa a 40°C; una vez secas, las muestras se pasaron a través de un tamíz con ojo de malla de 63 µm (González, 1991; Hernández y Gonzales, 1993);y luego fueron fraccionadas para la determinación de los metales pesados Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) y para la cuantificación de la materia orgánica.

Digestión. Se pesaron entre 0.5 y 1.0 g de sedimento, que fueron colocados en un erlenmeyer de 250 ml, agregando 10 ml de la mezcla HNO_3 : HClO_4 (en relación 2:5) y 3 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30%. El sistema se calentó a 95°C , por 45 minutos; luego se centrifugó a 3000 r.p.m. durante 5 minutos y el sobrenadante se separó y aforó a 100 ml con agua desionizada

Materia Orgánica. El contenido de materia orgánica (MO) en sedimentos ($< 63 \mu\text{m}$) se cuantificó mediante calcinación, para lo cual se pesaron 5 g de sedimento seco (W_1), se colocaron en un crisol de porcelana previamente tarado y se calcinó en mufla a 550°C , durante 3 horas aproximadas. Los crisoles se dejaron, enfriar en un desecador de vidrio. Se realizó la pesada de los crisoles con el residuo (W_2), y por diferencia se determinó el contenido de materia orgánica (Paez - Osuna *et. al*, 1984; González y Brugmann, 1991; Hernández y González, 1993; Coquey y Welboun, 1995).

3.4.1.3 Metales pesados (Cobre, Zinc, Plomo, Hierro y Manganeso). Una vez tratadas las muestras de aguas y sedimentos se realizaron lecturas de Absorción Atómica en un Espectrofotómetro Marca Unicam Modelo 919. Con base en la metodología recomendada por el fabricante del equipo.

La determinación de Cadmio se efectuó también por Espectrofotometría de Absorción Atómica, con un equipo PERKIN ELMER MODELO 2380; el análisis de mercurio, en un analizador de Mercurio Perkin Elmer Modelo 50A, en el "Laboratorio Microbiológico de Barranquilla".

Todos los análisis se hicieron por duplicado y su precisión se evaluó de acuerdo al coeficiente de variación, el cual fue siempre menor al 10%.

La calidad analítica de los resultados se verificó usando muestras de referencia (Patrón Estándar), de cada uno de los metales analizados.

3.5 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Las concentraciones de metales pesados en las aguas marinas como residuales se expresaron en mg/l y la de los sedimentos en microgramos/gramo (peso seco).

3.5.1 Análisis estadístico para aguas y sedimentos. Se realizó el análisis de varianza a dos vías con interacción y dos réplicas por tratamiento, utilizando intervalos de confianza del 95% en las pruebas de diferencia mínima significativa empleadas para comparar las medias de los diferentes niveles de profundidad del agua, en cada una de las estaciones. Asimismo, se utilizó el análisis de varianza a una vía con cinco tratamientos (estaciones) y dos réplicas.



4. RESULTADOS

Tabla 1. Valores promedio de parámetros físicos y fisico-químicos de las aguas marinas del sector El Boquerón de la ciudad de Santa Marta.

Estaciones	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
Temperatura (°C)	26.8	26.8	26.8	26.8
Oxígeno disuelto (mg/l)	6.28	6.03	6.27	6.27
pH	8.02	8.08	8.09	8.07
Sólidos disueltos totales (mg/l)	37000	36900	36800	36800
Conductividad $\mu\text{s/cm}$	50700	50800	50400	50300
Salinidad ‰	34.5	34.7	35.3	35.2

Tabla 2. Valores promedio de parámetros físicos y fisicoquímicos de las aguas residuales en el sitio de vertimiento (E₅) del sector de El Boquerón de la ciudad de Santa Marta.

Temperatura °C	28.0
Oxígeno Disuelto (mg/l)	0.04
Sólidos Totales (mg/l).	4.592
Sólidos Disueltos totales (mg/l)	139.0
Sólidos Suspendidos (mg/l)	4.453
Sólidos Sedimentables (ml/l)	80
pH	6.8
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	340.0
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	420.0
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{s/cm}$)	196.0
Turbidez (NTU)	187.9
Materia Orgánica Disuelta (mg/l)	183.0
Relación DQO/DBO ₅	1.23

4.1. CONTENIDO DE METALES PESADOS EN AGUAS Y SEDIMENTO.

En las Tablas 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, se observan, para cada una de las estaciones durante los dos meses de muestreos los niveles de metales determinados en las aguas marinas y aguas residuales, expresados en mg/l; y en microgramo/gramo de peso seco ($\mu\text{g/g}_{(\text{peso seco})}$) para los sedimentos.

Tabla 3. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del Sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo-Septiembre1997).

Mes	Muestreo	Estación	Nivel	Mn	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Hg
Mayo	1	1	1	0.165	1.178	0.836	0.098	0.426	ND	ND
Sept.	2	1	1	0.167	1.189	0.875	0.101	0.428	ND	ND
Mayo	1	1	2	0.206	1.208	0.762	0.072	0.472	ND	ND
Sept	2	1	2	0.208	1.301	0.772	0.068	0.465	ND	ND
Mayo	1	1	3	0.205	1.285	0.989	0.118	0.498	ND	ND
Sept.	2	1	3	0.208	1.301	1.081	0.123	0.501	ND	ND
Mayo	1	1	4	0.207	1.364	1.101	0.124	0.432	ND	ND
Sept.	2	1	4	0.208	1.414	0.976	1.135	0.428	ND	ND

Estación E₁ ubicada a 50 metros del sitio de vertimiento de las aguas residuales. Nivel indica las estratificaciones de la columna de agua.

ND no detectable.

Tabla 4. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo-Septiembre1997).

Mes	Muestreo	Estación	Nivel	Mn	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Hg
Mayo	1	2	1	0.160	1.152	0.798	0.097	0.416	ND	ND
Sept.	2	2	1	0.162	1.170	0.772	0.106	0.432	ND	ND
Mayo	1	2	2	0.187	1.249	0.893	0.084	0.474	ND	ND
Sept	2	2	2	0.198	1.306	0.893	0.082	0.484	ND	ND
Mayo	1	2	3	0.202	1.322	1.006	0.121	0.486	ND	ND
Sept.	2	2	3	0.204	1.312	1.122	0.998	0.505	ND	ND
Mayo	1	2	4	0.208	1.398	1.004	0.141	0.493	ND	ND
Sept.	2	2	4	0.206	1.427	1.008	0.138	0.484	ND	ND

Estación 2 (E₂) ubicada a 75 metros del sitio de vertimiento de las aguas residuales. Nivel = indica las estratificaciones de la columna de agua.

ND no detectable (< 0,002).

Tabla 5. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo-Septiembre 1997).

Mes	Muestreo	Estación	Nivel	Mn	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Hg
Mayo	1	3	1	0.204	1.104	0.784	0.132	0.432	ND	ND
Sept.	2	3	1	0.206	1.189	0.464	0.134	0.427	ND	ND
Mayo	1	3	2	0.198	1.116	0.536	0.068	0.427	ND	ND
Sept	2	3	2	0.167	1.189	0.464	0.072	0.441	ND	ND
Mayo	1	3	3	0.253	1.123	0.522	0.074	0.435	ND	ND
Sept.	2	3	3	0.249	1.189	0.484	0.068	0.427	ND	ND
Mayo	1	3	4	0.249	1.142	0.534	0.053	0.418	ND	ND
Sept.	2	3	4	0.246	1.189	0.501	0.054	0.427	ND	ND

Estación 3 (E₃) ubicada a 100 metros y en dirección Este del sitio de vertimiento de las aguas residuales. (Cerca del litoral rocoso). Nivel = indica las estratificaciones de la columna de agua. ND no detectable. (< 0,002)

Tabla 6. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas marinas del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo-Septiembre 1997).

Mes	Muestreo	Estación	Nivel	Mn	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Hg
Mayo	1	4	1	0.202	1.186	0.485	0.128	0.432	ND	ND
Sept.	2	4	1	0.204	1.183	0.482	0.132	0.430	ND	ND
Mayo	1	4	2	0.238	1.183	0.494	0.092	0.429	ND	ND
Sept	2	4	2	0.236	1.178	0.486	0.086	0.430	ND	ND
Mayo	1	4	3	0.239	1.186	0.480	0.083	0.426	ND	ND
Sept.	2	4	3	0.242	1.188	0.479	0.081	0.430	ND	ND
Mayo	1	4	4	0.266	1.192	0.481	0.083	0.428	ND	ND
Sept.	2	4	4	0.284	1.187	0.483	0.082	0.426	ND	ND

Estación 4 (E₄) ubicada a 100 metros y en dirección Oeste del sitio de vertimiento de las aguas residuales. (Cerca del litoral rocoso). Nivel = indica las estratificaciones de la columna de agua. ND no detectable.($< 0,002$)

Tabla 7. Concentración (en mg/l) de Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en aguas residuales del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo-Septiembre 1997).

Mes	Muestreo	Estación	Replica	Mn	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Hg
May	1	5	1	0.249	1.077	2.007	0.151	0.427	ND	0.01
Sept.	2	5	2	0.260	1.118	2.023	0.162	0.460	ND	0.02

Estación 5 (E₅) ubicada en el sitio de vertimiento de las aguas residuales. Nivel Indica las estratificaciones de la columna de agua. ND= no detectable (< 0,002)

Tabla 8. Concentración (en $\mu\text{g/g}_{(\text{peso seco})}$) de Manganeseo (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en sedimentos marinos del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).

Mes	Muestreo	Estación	Mn	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Hg	MO %
Mayo	1	1	132.3	99.9	2385.4	8.66	30.66	ND	0.06	10.83
Sept.	2	1	130.9	97.7	2390.2	8.32	28.32	ND	0.06	11.50
Mayo	1	2	132.0	53.0	2461.4	8.40	27.72	ND	0.08	9.840
Sept.	2	2	132.5	56.9	2435.2	8.28	25.64	ND	0.07	10.23
Mayo	1	3	137.0	63.0	2482.1	8.32	32.48	ND	0.07	12.0
Sept.	2	3	141.0	63.1	2474.1	8.28	30.16	ND	0.06	11.63
Mayo	1	4	140.9	87.9	2362.2	9.64	26.30	ND	0.06	12.40
Sept.	2	4	142.2	84.4	2378.0	9.86	27.42	ND	0.06	11.81

Estación 1 a 4 (E₁ a E₄) ND= no detectable (< 0,002) MO= materia orgánica.

Tabla 9. Concentración (en $\mu\text{g/g}_{(\text{peso seco})}$) de Manganeseo (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) en sedimentos de agua residual del sector de "El Boquerón" de la ciudad de Santa Marta (Mayo- Septiembre 1997).

Mes	Muestreo	Estación	Mn	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Hg	MO %
Mayo	1	5	209.0	77.9	2469.7	48.1	52.1	0.2	1.49	24.36
Sept.	2	5	224.2	69.6	2461.2	46.7	46.8	0.2	1.08	22.63

Estación 5 (E₅) Ubicada en el sitio de vertimiento de las aguas residuales.

4.2 ANÁLISIS DE VARIANZA EN AGUAS Y SEDIMENTOS

Tabla 10. Análisis de varianza a dos vías para comparar las cuatro estaciones marinas (E₁, E₂, E₃ y E₄), y las profundidades (superficie, 3,0, 6,0, y 9,0 metros). y su interacción, respecto a los niveles de metales pesados (mg/l) determinados en agua marina.

(a) MANGANESO

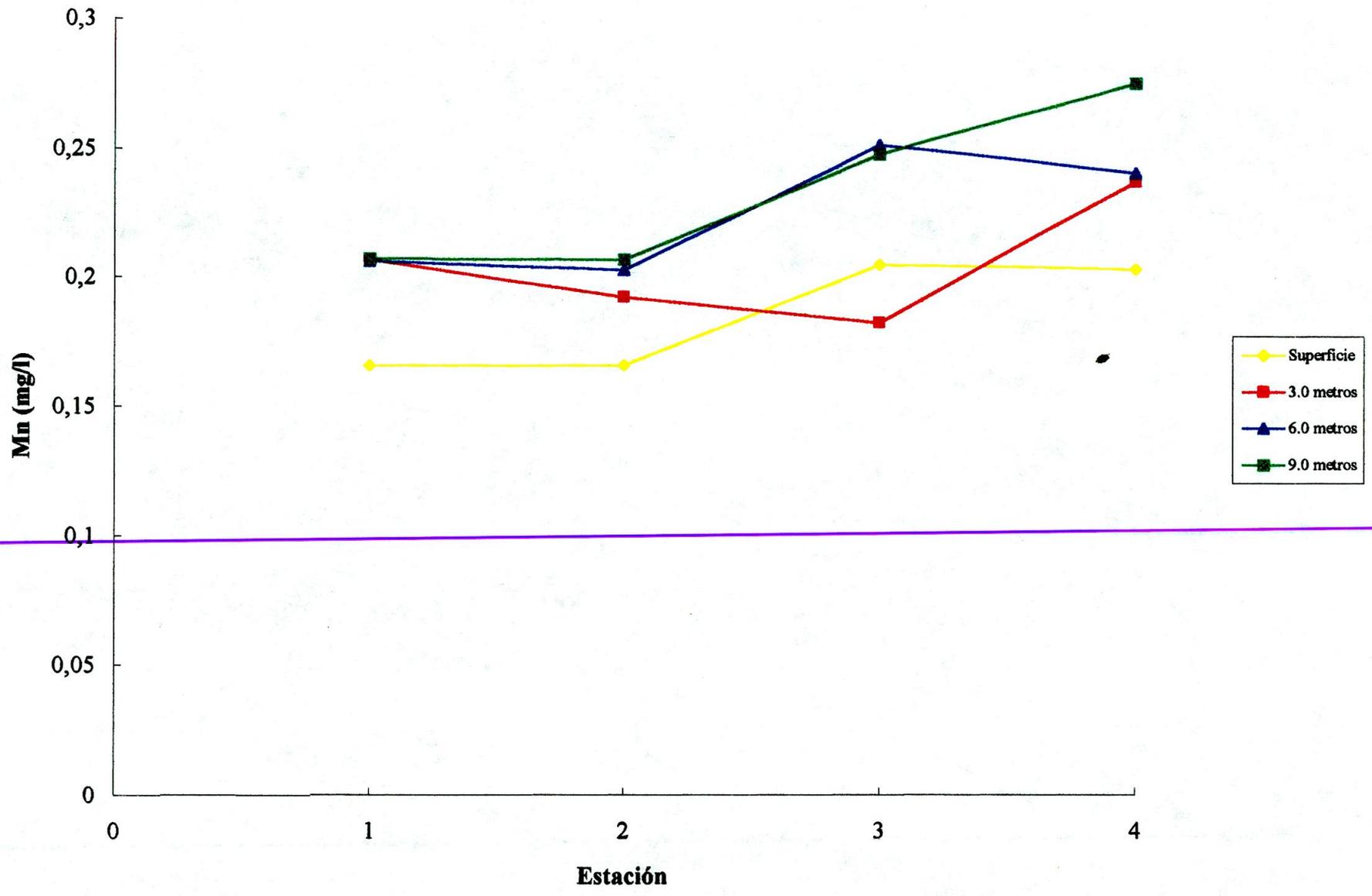
Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	3	0.0119308	0.003976900	85.871	0.0000
Profundidad	3	0.0121700	0.004056700	87.593	0.0000
Estación *Profundidad	9	0.0048322	0.000053691	11.593	0.0000
Residuo	16	0.0007410	0.000046312		
Total (corregido)	31	0.029674			

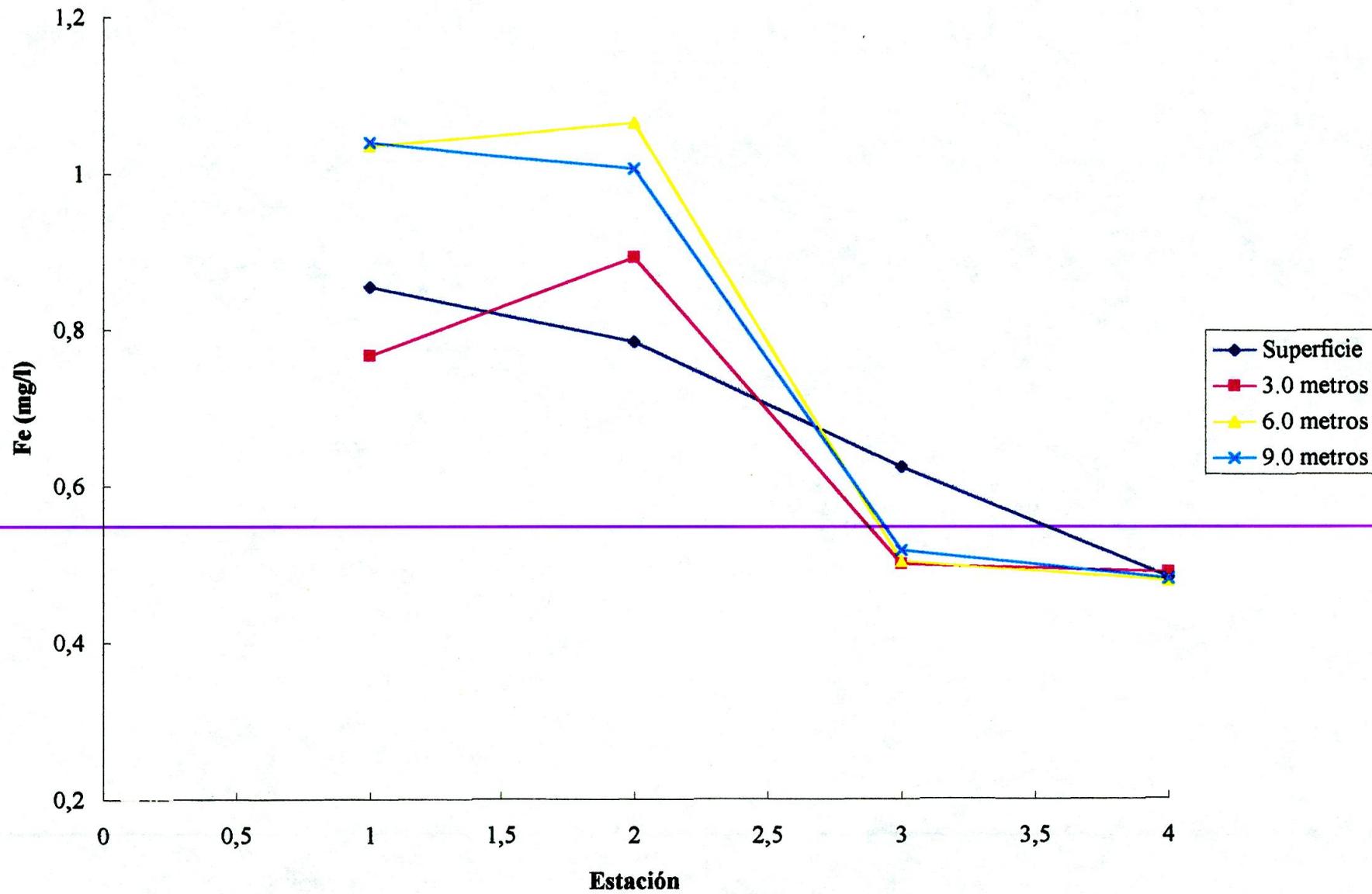
(b) PLOMO

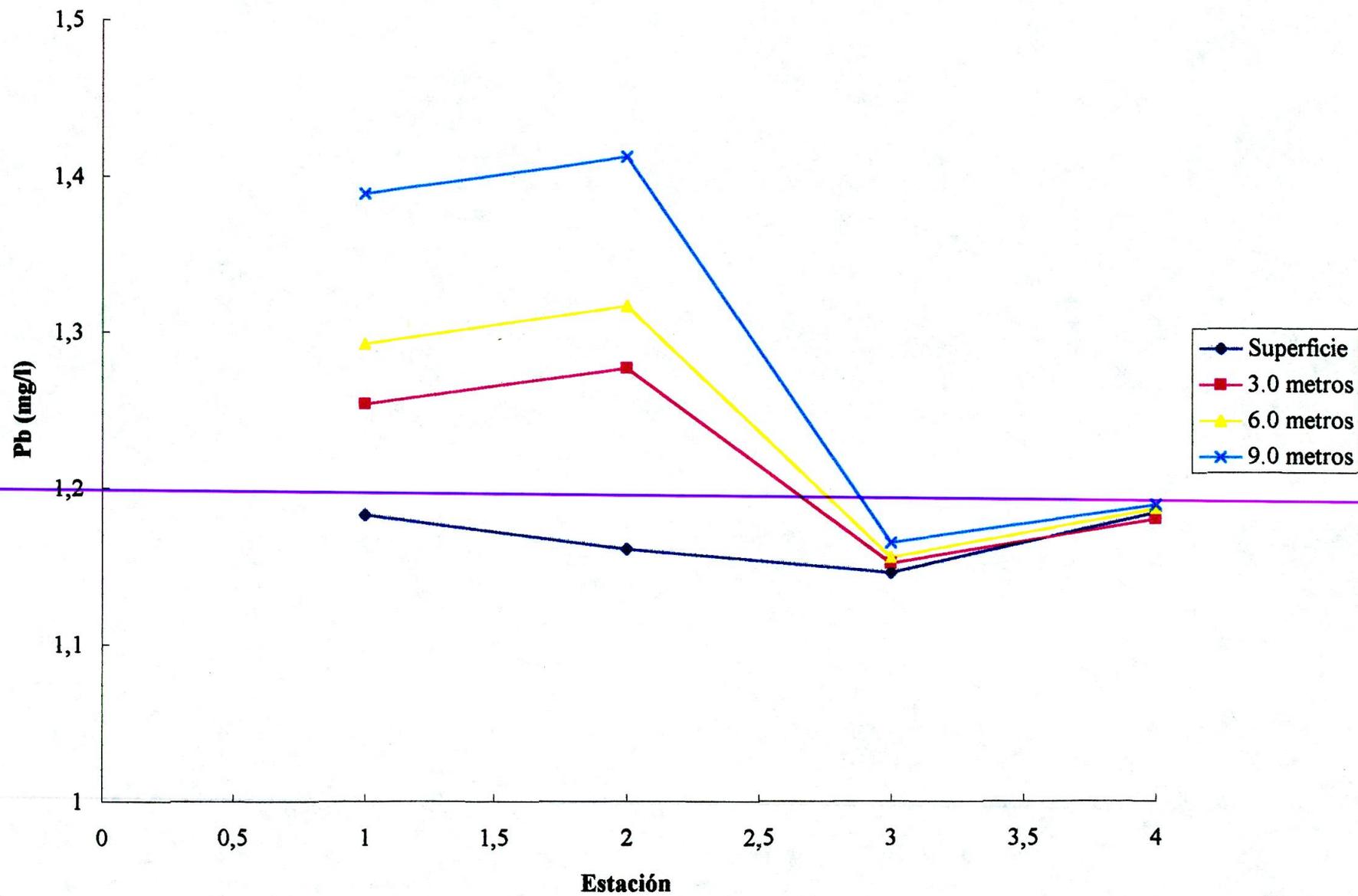
Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	3	0.1116036	0.0372012	33.919	0.0000
Profundidad	3	0.0597221	0.0199074	18.151	0.0000
Estación *Profundidad	9	0.0496022	0.0055114	5.025	0.0025
Residuo	16	0.0175484	0.0010968		
Total (corregido)	31	0.2384763			

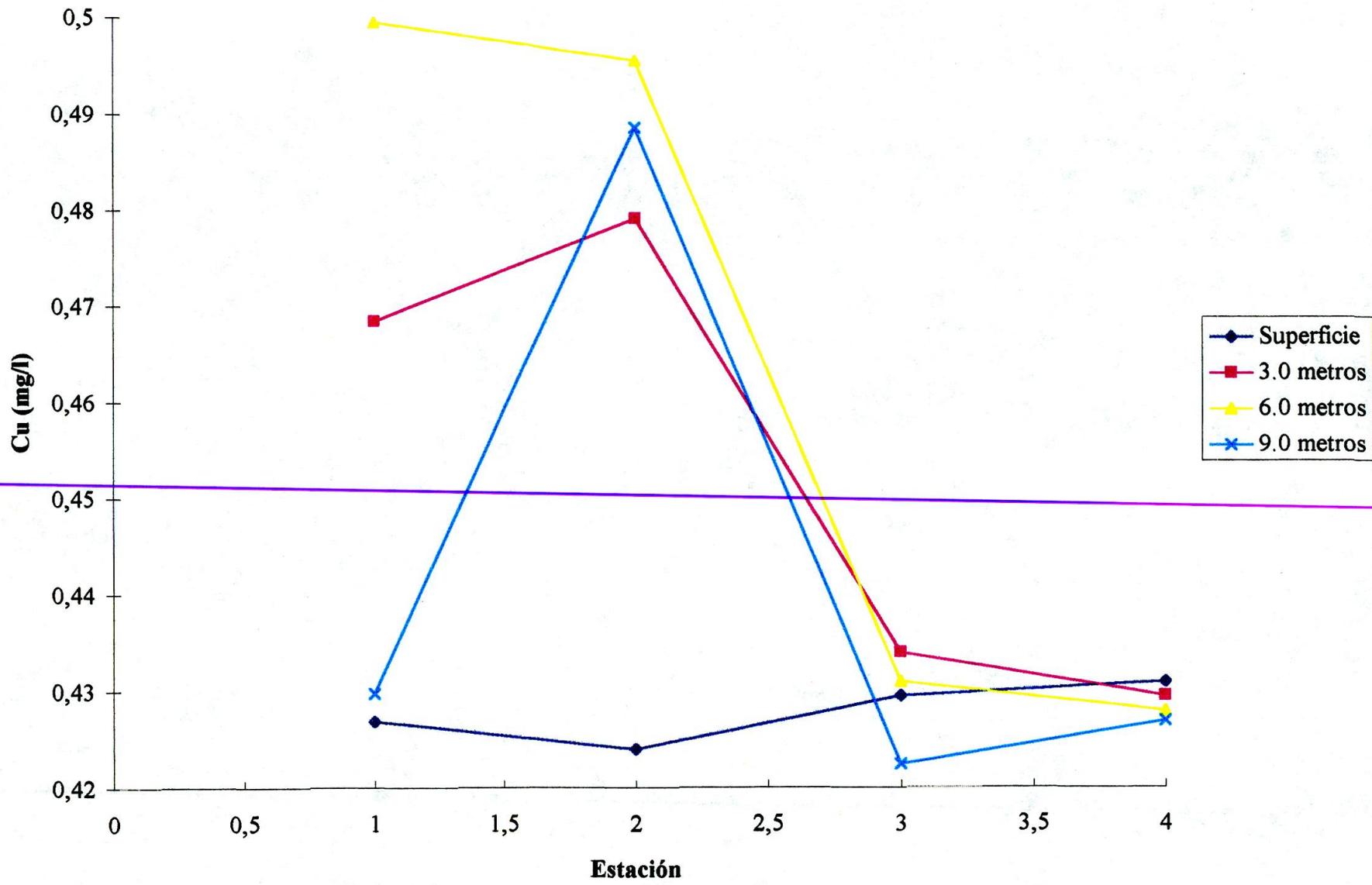
(c) HIERRO

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	3	1.4283138	0.4761046	102.18	0.0000
Profundidad	3	0.0692738	0.0230913	4.956	0.0128
Estación *Profundidad	9	0.1541630	0.0171292	3.676	0.0113
Residuo	16	0.0745485	0.0046593		
Total (corregido)	31	1.7262992			









(d) ZINC

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	3	0.1501369	0.0500456	0.895	0.4653
Profundidad	3	0.1227249	0.0409083	0.731	0.5483
Estación *Profundidad	9	0.6251768	0.0694641	1.242	0.3377
Residuo	16	0.8951476	0.0694641	1.242	
Total (corregido)	31	1.7931861			

(e) COBRE

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	3	0.0107227	0.0035742	90.156	0.0000
Profundidad	3	0.0055634	0.0018545	46.777	0.0000
Estación *Profundidad	9	0.0080930	0.0008992	22.682	0.0000
Residuo	16	0.0006343	0.00003964		
Total (corregido)	31	0.0250134			

Tabla 11. Análisis de varianza a una vía para comparar las cinco estaciones de muestreo consideradas, respecto a los niveles de metales pesados (mg/l) encontrados en el nivel superficial.

(a) MANGANESO

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	0.011318	0.002829	206.5	0.0000
Residuo	5	0.0000685	0.0000137		
Total (corregido)	9	0.0113865			

(b) PLOMO

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	0.0102127	0.0025532	2.73	0.1501
Residuo	5	0.0046768	0.000093535		
Total (corregido)	9	0.0148895			
Total (corregido)	9	0.0148895			

(c) HIERRO (DATOS ELEVADOS AL CUBO)

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	97.719868	24.429967	1262.19	0.0000
Residuo	5	0.0916775	0.0193552		
Total (corregido)	9	97.816644			

(d) ZINC

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	0.0045594	0.0011399	49.344	0.0003
Residue	5	0.0001550	0.0000231		
Total (corregido)	9	0.0046749			

(e) COBRE

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	0.000447	0.00411175	0.811	0.5683
Resido	5	0.0006890	0.00013780		
Total (corregido)	9	0.0011360			

Tabla 12. Pruebas de comparación múltiple por el método de diferencia mínima significativa para los análisis de varianza de una vía en que se comparan los niveles de metales pesados encontrados en agua superficial de las cinco estaciones de muestreo.

(a) MANGANESO

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₂	2	0.161	X
E ₁	2	0.166	X
E ₄	2	0.203	X
E ₃	2	0.205	X
E ₅	2	0.254	X

(b) HIERRO

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₄	2	0.1130321	X
E ₃	2	0.2908938	XX
E ₂	2	0.4841346	X
E ₁	2	0.6270995	X
E ₅	2	8.1817403	X

(c) ZINC

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₁	2	0.0995	X
E ₂	2	0.1015	X
E ₄	2	0.1300	X
E ₃	2	0.1330	X
E ₅	2	0.1565	X

E₁ = Agua marina ubicada a 50 metros del sitio de vertimiento; E₂ = agua marina ubicada 75 metros del sitio de vertimiento; E₃ = agua marina ubicada a 100 metros lado Este del sitio de vertimiento; E₄ = Agua marina ubicada a 100 metros lado Oeste del sitio de vertimiento, E₅ = Agua residual ubicada en el sitio de vertimiento de las aguas residuales sector "El Boquerón" de Santa Marta. Las letras X en la misma columna indican que no hay diferencias significativas entre los diferentes promedios.

Tabla 13. Análisis de varianza a una vía para comparar las cinco estaciones de muestre consideradas, respecto a los niveles de metales pesados ($\mu\text{g/g}_{(\text{peso seco})}$) y porcentaje de materia orgánica determinados en el sedimento.

(a) MANGANESO

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	10519.859	2629.9649	105.13	0.0001
Residuo	5	12522.060	25.044120		
Total (corregido)	9	10645.080			

(b) PLOMO

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	2478.6586	619.66466	60.52	0.0002
Resido	5	51.195050	10.239010		
Total (corregido)	9	2529.8537			

(c) HIERRO

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	18550.345	4637.5861	42.188	0.0005
Resido	5	549.62825	109.92565		
Total (corregido)	9	19099.973			

(d) ZINC

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	2403.5030	4637.5861	3077.62	0.0000
Resido	5	0.9762000	0.1952400		
Total (corregido)	9	2404.4792			

(e) COBRE

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	722.864	180.716	40.391	0.0005
Resido	5	22.3706	4.47412		
Total (corregido)	9	745.234			

(f) MERCURIO (Datos transformados mediante logaritmo natural)

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	14.313015	3.5782539	230.127	0.0000
Resido	5	0.0777451	0.0155490		
Total (corregido)	9	14.390761			

(g) MATERIA ORGÁNICA %

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	cuadrados medios	Valor F	Nivel de significancia
Estación	4	243.7901	60.947540	149.422	0.0000
Resido	5	2.039450	0.4078900		
Total (corregido)	9	245.82961			

Tabla 14. Pruebas de comparación múltiple por el método de diferencia mínima significativa para los análisis de varianza de una vía en que se comparan los niveles de metales pesados y el % de materia orgánica encontrados en los sedimentos de las cinco estaciones de muestreo adjuntas al sitio de vertimiento de las aguas residuales de la ciudad de Santa Marta

(a) MANGANESO

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₁	2	131.55	X
E ₂	2	132.21	X
E ₃	2	138.92	X
E ₄	2	141.52	X
E ₅	2	216.57	X

(b) PLOMO

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₂	2	54.88	X
E ₃	2	63.00	X
E ₅	2	73.68	X
E ₄	2	86.09	X
E ₁	2	98.79	X

(c) HIERRO

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₄	2	2370.075	X
E ₁	2	2387.740	X
E ₂	2	2448.280	X
E ₅	2	2465.390	XX
E ₃	2	2478.79	X

(d) ZINC

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₃	2	8.30	X
E ₂	2	8.34	X
E ₁	2	8.49	X
E ₄	2	9.50	XX
E ₅	2	47.4	X

(e) COBRE

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₂	2	26.68	X
E ₄	2	26.86	X
E ₁	2	29.49	X
E ₃	2	31.32	X
E ₅	2	49.40	X

(f) MERCURIO (DATOS TRANSFORMADOS EN LOGARITMO)

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₂	2	-2.8479072	X
E ₄	2	-2.8059664	X
E ₁	2	-2.7447389	X
E ₃	2	-2.5784089	X
E ₅	2	0.2378686	X

(g) MATERIA ORGÁNICA %

Estación	Numero de replicas	Promedio (mg/l)	Grupos Homogéneos
E ₂	2	10.035	X
E ₁	2	11.165	XX
E ₄	2	11.815	X
E ₃	2	12.105	X
E ₅	2	23.495	X

E₁ = Sedimentos estación ubicada a 50 metros del sitio de vertimiento, E₂ = Sedimento de estación ubicada a 75 metros del sitio de vertimiento, E₃ = Sedimentos de estación ubicada a 100 metros lado Este del sitio de vertimiento, E₄ = sedimento estación ubicada a 100 metros lado Oeste del

sitio de vertimiento y E₅ = sedimentos ubicados en el sitio de descarga de las aguas residuales sector de "El Boquerón" de Santa Marta. La letra X en la misma columna indican que no hay diferencias significativas entre los correspondiente promedios.

5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

5.1 VARIABLES FISICO-QUIMICAS

5.1.1 Aguas Marinas. Salinidad. En general, se observa que los valores de salinidad fueron similares en todas las estaciones en los dos meses de muestreo, presentando el mayor valor promedio la Estación Tres (E_3), y el menor la Estación Uno (E_1), con valor promedio en los dos meses de muestreo de 34.8 o/oo.

pH. En las diferentes estaciones, las aguas marinas presentan valores muy similares siendo el mayor el de la estación E_3 y el menor el de la estación E_1 , siendo 8.06 el pH promedio en los dos meses de muestreo.

Temperatura. En las diferentes estaciones la temperatura mostró un valor promedio de 28,8°C en los dos meses de muestreo, debido posiblemente a que en ambos periodos las condiciones climatológicas fueron similares.

El Oxígeno Disuelto, Sólidos Totales Disueltos y la Conductividad Eléctrica fueron similares para todas las estaciones de muestreo, aunque es necesario señalar que el porcentaje de saturación de Oxígeno fue alto (90%), si se tiene en cuenta que esta es la zona de vertimiento de las aguas residuales de la ciudad de Santa Marta y El Rodadero.

5.1.2 Aguas Residuales. La temperatura observada en las aguas residuales en los dos meses de Muestreo mostró un valor promedio de 28°C, aceptable para calidad de aguas domésticas (Tabla 2).

pH. Este factor interviene en la determinación de la especie química del mercurio en el medio (Phillips y Rainbow, 1993), ya que cambios en el pH pueden inducir a efectos de absorción y desorción en el sedimento (Burton, 1976; De Groot *et al*; 1976; Duursma, 1976; Head, 1976; Salomons *et al*; 1988) el agua residual mostró un valor igual a 6.8, tendiendo hacia la acidez que es característico en este tipo de aguas de descargas domésticas.

Oxígeno Disuelto. En general, las aguas residuales crudas, sin previo tratamiento, tienden a ser sépticas, ello explica el valor observado de oxígeno disuelto (0.04 mg/l); con unas características anaerobias, que facilitan el crecimiento de esas bacterias reductoras que juegan un papel importante en la liberación de los compuestos inorgánicos asociados a sus sedimentos.

La relación entre la Demanda Química de Oxígeno y la Demanda Bioquímica de Oxígeno presentó un valor de 1.23, que muestra que en las aguas residuales de Santa Marta la mayor parte de la materia orgánica es de tipo biodegradable y uso doméstico (Tabla 2).

Turbidez. El alto valor en la turbidez observado se correlaciona fundamentalmente con el gran contenido de sólidos suspendidos (4.453 mg/l) que posibilita la absorción de los rayos de luz, sin ocurrir la reflexión.

5.1.3 Metales pesados en Aguas Marinas y Sedimentos. La información obtenida se puede resumir en las siguientes matrices:

Matriz 1. Contiene datos de niveles de metales pesados (mg/l) medidos en agua en cuatro estaciones de muestreo ubicadas a 50 (E₁), 75(E₂), 100 metros en dirección este (E₃) y 100 metros en dirección oeste (E₄), de las zonas de vertimientos de las aguas residuales de Santa Marta en "El Boquerón". De cada una de estas estaciones se tienen datos a cuatro profundidades de la columna de agua: Superficie (P₁), Tres metros (P₂), Seis metros (P₃) y nueve metros (P₄), de las variables Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Hierro (Fe), Zinc (Zn), y Cobre (Cu) (Cadmio y Mercurio fueron no detectables). Las notaciones E₁ a E₄ y P₁ a P₄ son utilizadas más adelante para mayor claridad y orientación en la presentación del análisis de los resultados.

Matriz 2. Datos de concentración de metales pesados (mg/l), medidos en agua superficial en las cuatro estaciones mencionadas en la Matriz 1 y en la estación "El Boquerón" (E₅) (sitio de vertimiento de las aguas residuales). Además, esta Matriz contiene datos de las mismas variables descritas en la Matriz 1.

Matriz 3. Datos de niveles de metales pesados en muestra de sedimentos ($\mu\text{g/g}_{\text{pesoseco}}$) (dos réplicas) tomadas en las mismas cinco estaciones de la Matriz 2. Además de las variables consideradas en las Matrices 1 y 2 esta matriz incluye medidas de mercurio y porcentaje de materia orgánica.

Método de Análisis. Se realizaron tres análisis de varianza para dar respuesta a las siguientes preguntas.

¿Existe diferencia en los valores promedio de las variables consideradas entre las estaciones ubicadas a 50; 75; 100 metros dirección este y 100 metros dirección oeste del vertimiento de aguas residuales de Santa Marta en el sector "El Boquerón?"

¿Existe diferencia en los niveles promedio de las variables consideradas entre las cuatro profundidades de la columna de agua?

¿Las diferencias entre estaciones, respecto a los metales pesados cuantificados, dependen del nivel de la columna de agua donde se estudien dichas diferencias? Estos aspectos se conocen en términos estadísticos como interacción (En este caso sitio y profundidad).

¿Existe diferencia entre las estaciones alejadas de "El Boquerón" y las correspondientes a este lugar respecto a los niveles promedios de metales pesados, medidos en la superficie de la columna de agua?

¿Existe diferencia entre los valores promedio de metales pesados cuantificados en las muestras de sedimentos tomadas en las cinco estaciones ("El Boquerón y las cuatro alejadas)? Para contestar los interrogantes 1, 2 y 3 se efectuó un análisis de varianza a dos vías con interacción y con dos réplicas por tratamiento para cada una de las variables de la matriz 1. Cuando fue necesario, se realizaron gráficos de interacción para interpretar los resultados, en los cuales, se utilizaron intervalos de confianza del 95% en las pruebas de diferencia mínima significativa empleadas para comparar las medias de los valores determinados a diferentes niveles de profundidad en cada una de las estaciones. En el caso de las preguntas 4 y 5, se empleó un análisis de

varianza a una vía con cinco tratamientos (estaciones) y con dos réplicas. Para la cual se analizaron las Matrices 2 y 3, respectivamente.

El análisis de varianza de dos vías con interacción (Tablas 10 a, 10b, 10c y 10e) determinó que hubo diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre las cuatro estaciones cercanas al sitio de vertimiento de las aguas residuales respecto a los niveles de metales pesados; es decir, dependen de la profundidad en que estos se evalúen. Una excepción a este argumento se da en la variable zinc, en la que teniendo en cuenta las probabilidades asociadas a los valores de F para los factores estación, profundidad y estación * profundidad (Tabla 10d), es posible afirmar que no existe diferencia significativa entre las estaciones y entre las profundidades de la columna de agua.

Dado que la interacción fue significativa en los análisis de varianza de las variables Manganeso, Plomo, Hierro y Cobre, se realizaron gráficos para determinar descriptivamente el comportamiento de las estaciones respecto a cada uno de los niveles de la columna de agua (Figura 4).

En el caso de la variable Manganeso (Figura 4 a) se nota que los comportamientos de las estaciones son similares en el nivel superficial (p_1) y 9,0 metros (p_4). Es evidente que en estas profundidades hay un gradiente creciente respecto a la distancia del sitio de vertimiento (entre más alejada está la estación mayor nivel de manganeso). En la profundidad de 6,0 metros (p_3) se da una tendencia similar a la mencionada para superficie y 9,0 metros sólo que en este caso la mayor concentración se da en la distancia de 100 metros lado este del sitio de vertimiento (E_3) y no a 100 metros lado oeste (E_4). Un comportamiento diferente se observa a 3,0

metros de profundidad (p_2), en donde el nivel promedio de manganeso decrece hasta 100 metros de distancia lado Este del sitio de vertimiento y posteriormente aumenta en la distancia 100 metros lado Oeste del sitio de vertimiento (E_4) para alcanzar su mayor valor promedio (mayor inclusive que en la superficie).

De la Figura 4 a, en general, se puede también concluir que, con excepción de superficie (p_1) en la estación E_3 la mayor concentración de Manganeso corresponde a la profundidad de 9,0 metros (línea continua azul).

Sin embargo, la tendencia es el incremento de la concentración de Manganeso en función del nivel de la columna de agua y con respecto a la distancia de sitio de vertimiento de las aguas residuales, respectivamente.

Respecto a la concentración de Hierro (mg/l), se observa (figura 4b) que existe una relación inversa con respecto a la distancia del sitio de vertimiento de las aguas residuales, tendencia ocurrida en casi todas las profundidades de la columna de agua consideradas; pero hubo un leve alejamiento de este comportamiento a tres metros (P_2), de profundidad en donde hubo un ligero aumento en el nivel promedio del metal a 50 y 75 metros del sitio de vertimiento. Además se observa que las mayores concentraciones promedios en distancias más cercanas del sitio de vertimiento (estaciones E_1 y E_2) corresponden a las mayores profundidades (6.0 y 9.0 metros); mientras que a la distancia de 100 metros (lado este), la mayor concentración promedio de Hierro se estableció a nivel superficial de la columna de agua. A una distancia de 100 metros, lado Oeste, del

sitio de vertimiento (E_4) no hubo diferencia significativa entre las concentraciones de hecho los diferentes niveles de la columna de agua.

La figura 4c, referente a niveles de plomo indica que hay una relación inversa entre su concentración y la distancia del sitio de vertimiento. Entre las distancias 100 metros lado Este y 100 metros lado Oeste aparecieron un leve aumento del nivel promedio a todas las profundidades, sin embargo, no fue significativa. A las distancias más cercanas del sitio de vertimiento (estaciones E_1 y E_2) se presentaron las mayores concentraciones promedios del Plomo, correspondiente a las profundidades de 6,0 y 9,0 metros.

En las estaciones más alejadas del sitio de vertimiento de las aguas residuales (estaciones E_3 y E_4) los promedios resultaron significativamente iguales a todas las profundidades. En las muestras de agua superficial (línea azul) existe bastante homogeneidad en los promedios calculados para las cuatro estaciones. Se puede decir que no hay diferencia significativa entre estos mismos. Por último para el caso de la variable cobre se nota en la (Figura 4d), entre los 50 y 75 metros de distancia del sitio de vertimiento de las aguas residuales hubo una disminución de los valores promedios de este metal, a todas las profundidades de la columna de agua con la única excepción en superficie donde existió hay un leve incremento, pero no significativo.

A distancias de 100 metro, (lado Este), y 100 metros lado, Oeste, del sitio de vertimiento (estaciones E_3 y E_4) los promedios en las profundidades resultaron significativamente iguales, las mayores diferencias entre profundidades se observan a 50 metros del sitio de vertimiento y de acuerdo a los niveles promedios encontrados las mayores concentraciones

de cobre corresponden al centro de la columna de agua, y los menores en la superficie y 9,0 metros de profundidad.

La observación de las figuras revela diversos patrones generales de comportamiento de los cuatro metales que presentaron niveles estadísticamente significativos en su concentración promedio, excluyendo obviamente los aspectos específicos de cada uno de ellos, ya mencionados. Las concentraciones de Hierro, Plomo y Cobre tienden a disminuir a medida que la distancia del sitio de vertimiento de las aguas residuales aumenta.

Caso contrario se presenta en la variable Manganeseo, en donde esta tendencia parecería ser positiva y significativa al menos en algunas profundidades. Las concentraciones promedios de estos cuatro metales tiende a ser mayor a medida en que aumenta la profundidad de la columna de agua, especialmente durante dos estaciones de muestreo más cercanas al sitio de vertimiento de las aguas residuales (estaciones E₁ Y E₂). Sin embargo, a estas mismas distancias aparece también una mayor variabilidad en los valores promedios, contrario a la gran homogeneidad establecida en las estaciones más alejadas del sitio de vertimiento de las aguas residuales (estaciones E₃ y E₄).

El análisis de varianza realizado para comparar los niveles de metales pesados encontrados en las diferentes estaciones de muestreos (Tablas 11 a, a la 11e) determinó que las variables Manganeseo, Hierro y Zinc presentan diferencias significativas ($P < 0.05$); respecto a los valores promedios de las cinco estaciones mientras que la variable Plomo y Cobre, dado el nivel de significancia asociado a los valores F de la fuente

de variabilidad estación presentan valores promedios significativamente similares ($P > 0.05$).

En las pruebas de comparación múltiple, realizadas para determinar cuál de la estación es diferente respecto a las concentraciones de metales pesados encontradas en muestra de agua superficial (Tabla 12), es evidente que el patrón de diferencia es dependiente de la variable considerada. Sin embargo, todas presentan una tendencia común: la mayor concentración promedio del hierro (Tabla 12b) siempre corresponde a la estación ubicada en el sitio de vertimiento de las aguas residuales de Santa Marta.

En los casos de Manganeso y Zinc (Tabla 12a y 12c), las estaciones ubicadas a 100 metros lado este y 100 metros lado Oeste (estaciones E₃ y E₄) presentaron valores promedios significativos iguales y mayores, respectivamente a los de las estaciones (E₁ y E₂) más cercanas al sitio de vertimiento de las aguas residuales de Santa Marta.

El análisis estadístico realizado en las muestras de sedimento (Tabla 13), determinó diferencias significativas ($P < 0.05$) en los valores promedios observados de metales en las cinco estaciones. Sin embargo, de forma similar a lo observado en los resultados de agua superficial, las diferencias entre las estaciones cambian dependiendo de la variable estudiada (Tabla 14). En las variables Manganeso, Zinc, Cobre, Mercurio y porcentaje de materia orgánica, los mayores niveles promedios se presentaron en las estaciones ubicadas en el sitio de vertimiento de las aguas residuales (Tablas 14 a, 14d, 14e, 14f y 14g). La variable plomo, contrario a lo esperado presentó concentraciones promedios mayores en aquellas

estaciones alejadas del sitio de vertimiento de las aguas residuales (50 y 100 metros dirección Oeste del sitio de vertimiento, Tabla 14b). De igual forma, la concentración promedio de Hierro fue mayor en una estación alejada del sitio de vertimiento estación E₃; No obstante este valor promedio no fue significativamente diferente del valor promedio calculado para la estación cinco (E₅) ubicada en el sitio de vertimiento de las aguas residuales de Santa Marta.

Por lo tanto, es necesario aceptar la Hipótesis alternativa planteada para la presente investigación: "Hay diferencias significativas en las variables estudiadas, tanto en aguas superficiales como en sedimentos, en las diferentes estaciones de muestreos (por lo menos en una)".

RECOMENDACIONES

Con el fin de establecer cuál es el comportamiento de los efectos producidos tanto por aniones como cationes se recomienda determinar para cada estación, a diferentes niveles de profundidad y sedimentos la fuerza iónica resultante por la presencia de los iones y cationes más importantes.

Determinar cuáles son las condiciones físicas y químicas que puedan existir entre iones polivalentes (SO_4^{-2} , PO_4^{-3}) con respecto a las concentraciones de Plomo, Mercurio, Cadmio, Zinc, Manganeso, hierro y Cobre y establecer sus relaciones de equilibrio en relación a su producto de solubilidad.

Monitorear los resultados bajo otras condiciones climáticas, diferentes a los efectos recientes del fenómeno de "El Niño".

Realizar estudios similares en los cuales las estaciones y sitios de muestreos estén más cerca de las fuentes productoras de desechos Alimenticios, excretas humanas y residuos químicos, como son los centros dedicados al turismo (hotelería, moteles) y centros educativos, así como también cercanos a la desembocadura actual del río Manzanares.

Establecer un diagnóstico estadístico, de tal forma que se puedan determinar para esta localidad niveles mínimos, medios y críticos propios, capaces de discriminar si habrá o no futuras contaminaciones por elementos pesados de interés ambiental y sanitario.

BIBLIOGRAFIA

ALTAMAR y GAITAN. Determinación de bioacumulación de Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Zinc en dos macroalgas y un pasto marino en la región de Santa Marta, Colombia. Estudio comparado y temporal. Tesis de la Universidad del Magdalena, Santa Marta. 1996. 94p.

BARON, Enrique. Química Bioinorgánica. Edit. Mc Graw Hill, 1995. 321p.

BERNO, Werding y SANCHEZ, Hernando. Deterioro observado en las Formaciones Coralinas de la Bahía de Santa Marta, Colombia. 1988.

CALDERON SERRANO, Agustín y BAYONA, Hernando. Contaminación y supervivencia bacteriales en la bahía de Santa Marta. Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Santa Marta. 1983.

CAMPOS, N. Determinación de metales pesados en Isogonon bicolor en la Bahía de Santa Marta, Colombia, Anales del Instituto de Investigaciones Marinas INVEMAR, 1987. 17: 155 -162 P.P.

----- . Los metales pesados, su contaminación y sus efectos tóxicos Contaminación Ambiental. 1987. 17: 62 -66 p.

----- . Los metales pesados en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. 1990. Caldasia 16(77): 231 - 244.

----- . La ostra comercial de la Ciénaga Grande de Santa Marta Crassostrea rhizophorae y la problemática de la contaminación por metales. 1991. Triana, 4:623-631

----- . Concentraciones de metales traza en Ariopsis bonillai (piscis: Siluriformes) de Santa Marta, Caribe Colombiano. 1992. Rev. Biol. Trop, 40(2): 179-183.

CAMPOS, N.H. y M.C. GALLO. Contenido de Cd, Cu y Zn en Rhizophora mangle y Avicenia germinans de la Ciénaga Grande de Santa Marta y

Bahía de Chengue Caribe Colombiana In: Proceedings 2nd International Symposium: Environmental Geochemistry in Tropical Countries. Cartagena, Colombia. 1996.

CASTILLO, A. COTES, M y PALACIOS, José. Niveles de Mercurio, Plomo, Cobre y Cadmio, Sedimentos de aguas marinas de la Bahía de Santa Marta. Tesis Universidad del Magdalena, Santa Marta, 1996.

COQUERY, M.y P.M. WELBOURN. The relationship between metal concentration and organic matter in sediments and metal concentration in the aquatic macrophyte Eriocaulon septangulare. 1995. Water Research. 29(9): 2094-2102.

CRUZ, E. y RAMIREZ, G. Caracterización química de las aguas residuales del Municipio de Santa Marta, Contaminación Ambiental. 1990 22 -27-34 pp.

ESCOBAR, A. Estudio de algunos aspectos ecológicos de las aguas y De Contaminación bacteriana en la Bahía de Santa Marta, Anales del Instituto de Investigaciones Marinas INVEMAR. 1988. 18: 39 - 57 pp.

ESCOBAR, J. y G. CAMACHO. Concentraciones de mercurio en aguas y sedimentos de la Bahía de Cartagena, Colombia INDERENA- INS. 1977. 36p.

FORSTNER, U.y G. MULLER. Schwemetallen in Flussen und seen. Springer-Verlag, Berlin. 1974. 225p.

GONZALEZ, H. Heavy metal surveys in sediments of five important Cuban Bays. Biogeochemistry. 1991. 14: 113-128.

GONZALEZ, H. Y L. BRUGMANN. Heavy metal in littoral deposit off Havana City, Cuba. Chemistry and Ecology. 1991. 5: 171-179.

HERNANDEZ, J.M. y H. GONZALEZ. Metales pesados en la Bahía de Manzanillo. Cuba An. Inst. Investigaciones Marinas INVEMAR. 1993. 22: 60-68p.

LACERA, A. Fiscalía Regional del Magdalena. Determinación de Plomo, Cobre y Zinc en la Bahía de Santa Marta. Laboratorio de Química, Universidad del Magdalena. 1994.

LINHARES, P, S. MESTRINHO, S. ANDRADE, M. NANO y J. SNATO. Mercury in the cove tainheiros, Salvador. Bahia- Brazil. In: Proceedings 2 nd

International Symposium: Environmental Geochemistry in tropical Countries. Cartagena, Colombia. 1996.

MOORE, J.W.y S. RAMAMOORTHY. Heavy metals in natural waters. Springer-Verlag, New York. 1984. 233p.

PAEZ-OSUNA, F.M. FONG-LEE y H. FERNANDEZ-PEREZ. Comparación de tres técnicas para analizar materia orgánica en sedimento. An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autó. 1984. Mexico 11(1): 257-261.

PNUMA-CPPS. Plan de acción para la protección del Medio Marino y Areas Costeras del Pacifico Sudeste. Word Group. 1988. 12. Rev.1, 99p.

STOKER,S.y S.L.SEAGER. Química Ambiental, contaminación del aire y del Agua. Edit. Blume, Barcelona España 1981. 389p.

ANEXO A. Comparación de la concentración mínimo y máximo de los metales pesados ($\mu\text{g/g}$ peso seco) en los sedimentos marino y residuales del sector de "El Boquerón" Bahía de Santa Marta. Con otras áreas tropicales e sub-tropicales. Los sedimentos fueron analizados en fracción total y con extracción parcial. La concentración permisible por la EPA (Lacera, 1983) es mostrada para comparación.

LOCALIDAD	PERÍODO DE MUESTRAS	Cu	Zn	Cd	Hg	Fe	Mn	Pb	AUTORES
Boquerón Bahía de Santa Marta, sedimento Marino	Mayo 1997	27.01-31.57	8.32-9.1 ND	ND	0.06-0.075	2373-2471.7	132-139	58-93.9	Tomas garcia, Romualdo
	Septiembre 1997	26.53-29.24	8.28-9.09 ND	ND	0.06-0.065	2384-2455	131-142	60-91	Macias y Manuel Taborda
Sedimento residual	Mayo-Septiembre 1997	46.8-52.1	48.1-46.7	0.2-0.2	1.49-1.08	2470-2461	209.0-224.0	77.9-69.6	Universidad del Magdalena (1998)
Golfo de Nicoya, Costa Rica	lluvioso	8.1-10.2	20.4-122	0.08-0.36	0.005-0.067	4370-7096		1.4-9.4	Dean <i>et al.</i> 1986
	seco	9.8-34.2	81.2-1587 0.03-0.13			2015-6283			
Golfo de Aqaba, Red. Sea		3.0-19	14-199	1.2-9.0		550-15975	16-244	17-64	Abu-Hilal 1987
Hamilton Harbour, Bermuda	lluvioso	10.0-86	25-88					58-157	Burns <i>et al.</i> 1990
Cacha-Prego, bahia Brasil (no contaminada)	lluvioso	0,98	3,84	0,05				1,95	Wallner-Kersanach, 1994
	Seca	1,04	4,17	0,05				2,07	
Ciénaga Grande Influencia marina	lluvioso								
Zona II	Octubre(93)	6.0-18	13-46	0.2-1.0	ND-0.2	3369-9698	205-870	5.0-21	INVEMAR(universidad de Antioquia)
Zona III		5.0-35	24-57	0.1-1.1	ND-0.2	1484-7268	44-174	10.0-14	
Zona IV		5.0-15	22-34	0.7-1.0	ND	2746-5806	206-254	6.0-8.0	
Ciénaga Grande Influencia marina	Seca								
Zona II	Febrero(94)	5.0-30	15-33	0.3-2.5	0.13-0.14	4182-9310	144-625	3.0-15	INVEMAR(universidad de Antioquia)
Zona III		5.0-30	16-57	1.7-2.5	0.13-0.15	1820-8434	36-239	7.0-15	
Zona IV		50	22	2.2		0,14	5461	297	7
Concentración Permisible		50	75	2				50	Lacera 1983.