



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL
RÍO**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN
SEDIMENTO DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA
ARRECIFAL VERACRUZANO; VARIACIONES
ESTACIONALES Y BIODISPONIBILIDAD.**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

BIOL. MAYRA DEYLHY MAPEL HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

CODIRECTOR:

DR. ALFONSO VÁZQUEZ BOTELLO

ASESOR:

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

2019

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Boca del Río, Ver., 03/septiembre/ 2019

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**C. MAYRA DEYLHY MAPEL HERNÁNDEZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE**

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

"DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO; VARIACIONES ESTACIONALES Y BIODISPONIBILIDAD"

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelexencia en Educación Tecnológica
Por nuestros mares responderemos*

**M. C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p. Coordinación de la Maestría
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P.94290
Boca del Río, Veracruz. Tel. (229) 690-5010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro **A-0303-090916**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 14:00 horas del día 12 del mes de agosto de 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

"DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO; VARIACIONES ESTACIONALES Y BIODISPONIBILIDAD"

Que presenta el (la) alumno(a):

BIOI. MAYRA DEYLHY MAPEL HERNÁNDEZ

Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

Dra. Fabiola Lango Reynoso
Director de Tesis

Dr. Alfonso Vázquez Botello
Codirector

Dra. María del Refugio Castañeda Chávez
Asesor

Dr. Jesús Montoya Mendoza
Asesor



DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTO DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO; VARIACIONES ESTACIONALES Y BIODISPONIBILIDAD.

RESUMEN

El PNSAV, es un ecosistema sujeto a fuertes presiones antrópicas y ambientales, destacando la presencia de metales pesados. El objetivo de este estudio fue evaluar las concentraciones totales y biodisponibles de Cd y Pb presentes en sedimentos de fondo del PNSAV y su distribución durante tres épocas del año. Se estableció 18 sitios de muestreo ubicados en la poligonal del PNSAV. La determinación de Cd y Pb se realizó por espectrofotometría de absorción atómica de flama con un equipo Thermo Cientific modelo Ice 3500 AA System. Se obtuvieron los siguientes tipos de grano: limos>arenas>arcillas>gravas; sus porcentajes de fracciones: arcillas (11.11 ± 8.37), arenas (38.95 ± 39.93), gravas (6.04 ± 8.62) y limos (43.9 ± 32.05) en %. Para Cd y Pb se obtuvieron, concentraciones totales (Cd>Pb) y concentraciones biodisponibles (Pb>Cd); Cd total: 2.9-33.33 mg/kg, Cd biodisponible: 0.1025-0.9625 mg/kg, Pb total. 0.0-11.72 mg/kg y Pb biodisponible: 0.0-2.645 mg/kg; Se presentaron diferencias significativas entre los tipos de granos, y las concentraciones de Cd y Pb obtenidas en los sitios de muestreo. La variación en las tres épocas correspondió: Cd total (secas>lluvias>nortes), Cd biodisponible (nortes>lluvias>secas), Pb total (secas>lluvias>nortes) y Pb biodisponible (nortes>lluvias>secas); las variaciones de Cd biodisponible y Pb total presentaron diferencias significativas en las tres épocas. Las concentraciones de Cd total (4.03 ± 4.07 mg/kg) rebasaron el nivel de efecto de rango bajo (ERL) (1.2 mg/kg), y su valor mayor obtenido en el arrecife Rizo (33.33 mg/kg) superó el nivel de efecto de rango medio (ERM) (9.6 mg/kg), valores desarrollados por la NOAA en sedimentos marinos. Los valores obtenidos representan un riesgo potencial ante efectos adversos en los organismos marinos y arrecifes coralinos.

Palabras clave: Metales pesados, sistema arrecifal, biodisponibilidad, zona costera, contaminación, sedimentos.

ABSTRACT

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza, sabiduría y entendimiento para realizar cada proyecto de mi vida.

A mi madre, por las tantas cosas que me ha enseñado y las que me sigue enseñando, sin ella yo no sería el ser humano que soy ahora. Espero algún día ser como ella.

AGRADECIMIENTOS

A la academia del Posgrado en Ciencias en Ingeniería Ambiental por haberme permitido ser parte de este programa y desarrollar mi tema de Maestría.

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLÓGICA (CONACYT) por brindarme el apoyo con una beca de excelencia para poder realizar mis estudios de posgrado.

Al Doctor Alfonso Vázquez Botello por haber accedido a guiarme y enseñarme más sobre el mundo de los metales pesados y su relación con los ecosistemas costeros. Y alentarme a seguir aprendiendo y creciendo en este mundo de la investigación.

A la Doctora Fabiola Lango Reynoso por haber sido mi directora de tesis y apoyarme en la realización de este tema.

Al personal del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano por la colaboración para poder realizar mis tomas de muestra, han sido parte fundamental de esta investigación.

A mi familia, por apoyarme y alentarme a crecer profesionalmente.

A mis amigos (as) por ayudarme y darme consejos cuanto más necesitaba.

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	3
2.1.	CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.....	3
2.2.	GENERALIDADES DE LOS METALES PESADOS.....	3
2.3.	PROPIEDADES QUÍMICAS Y TOXICIDAD DE Cd Y Pb.....	4
2.4.	METALES PESADOS Y BIODISPONIBILIDAD EN SEDIMENTOS.....	5
2.5.	ESTUDIO DE METALES PESADOS.....	7
2.5.1.	<i>Metales pesados a nivel Internacional.....</i>	<i>7</i>
2.5.2.	<i>Metales pesados en el Golfo de México.....</i>	<i>9</i>
3.	JUSTIFICACIÓN.....	13
4.	HIPÓTESIS.....	14
5.	OBJETIVOS.....	15
	OBJETIVO GENERAL:.....	15
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	15
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
6.1.	ÁREA DE ESTUDIO.....	16
6.1.1.	<i>Climatología.....</i>	<i>17</i>
6.1.2.	<i>Hidrología.....</i>	<i>17</i>
6.1.3.	<i>Oceanografía.....</i>	<i>18</i>
6.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	19
6.2.1.	<i>Colecta y periodicidad del muestro.....</i>	<i>19</i>
6.2.2.	<i>Granulometría.....</i>	<i>21</i>
6.2.3.	<i>Secado de las muestras.....</i>	<i>22</i>
6.2.4.	<i>Digestión de las muestras.....</i>	<i>22</i>
6.2.5.	<i>Metodología para metales biodisponibles.....</i>	<i>23</i>
6.2.6.	<i>Lectura de muestras.....</i>	<i>24</i>
6.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	25
7.	RESULTADOS.....	26
7.1.	COMPORTAMIENTO DE PH EN SEDIMENTO.....	26
7.2.	GRANULOMETRÍA.....	27
7.2.1.	<i>Análisis de varianza en sedimentos.....</i>	<i>30</i>

7.3.	METALES PESADOS EN SEDIMENTO.....	31
7.3.1.	<i>Concentración de total de Cadmio.....</i>	<i>31</i>
7.3.2.	<i>Concentración de Cadmio biodisponible.....</i>	<i>41</i>
7.3.3.	<i>Concentración de total de Plomo.....</i>	<i>51</i>
7.3.4.	<i>Concentración de Plomo biodisponible.....</i>	<i>61</i>
7.4.	ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS (CLÚSTER).....	70
8.	DISCUSIÓN	74
9.	CONCLUSIONES	78
	LITERATURA CITADA	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Interacción de metales pesados en sistemas costeros. Tomado de: Rubio <i>et al.</i> (2011).	7
Figura 2 Poligonal del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.	16
Figura 3. ANOVA de un solo factor para valores de pH en estaciones del PNSAV. No hubo diferencia significativa para la prueba de Tukey ($p>0.05$).	26
Figura 4. Porcentaje de frecuencia de intervalos de tipos de granos en los arrecifes del PNSAV.	29
Figura 5. ANOVA de un solo factor para fracciones de granos evaluados. (Tuckey $p< 0.05$).	30
Figura 6 Concentración promedio de Cadmio total en los arrecifes del PNSAV. ..	31
Figura 7 Criterios de calidad de concentración de Cadmio (Cd) en sedimentos del PNSAV.	33
Figura 8 Concentración de Cadmio total en las temporadas climáticas (Nortes, Secas y Lluvias).	34
Figura 9. Correlación entre concentraciones totales de cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas en temporada de secas.	36
Figura 10 Correlación entre concentraciones totales de cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de lluvias.	36
Figura 11. Correlación entre concentraciones totales de cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas).	37
Figura 12 Distribución espacial de Cd total en temporada de Lluvias.	38
Figura 13 Distribución espacial de Cd total en temporada de Secas.	39
Figura 14 Distribución espacial de Cd total en temporada de Nortes.....	40
Figura 15 Concentración promedio de Cd biodisponible en los arrecifes del PNSAV.	41
Figura 16 Criterios de calidad de concentración de Cd biodisponible en el PNSAV.	43

Figura 17. Concentración de Cadmio biodisponible en las tres temporadas climáticas (Nortes, Secas y Lluvias).....	44
Figura 18 Correlación entre concentración biodisponible de Cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Secas.	45
Figura 19 Correlación entre concentración biodisponible de Cadmio y fracción de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Lluvias).....	46
Figura 20 Correlación entre concentración biodisponible de Cadmio y fracción de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Nortes.....	46
Figura 21 Distribución de Cadmio biodisponible en los arrecifes del PNSAV en temporada de Lluvias.	48
Figura 22 Distribución de Cadmio biodisponible en los arrecifes del PNSAV en temporada de Secas.	49
Figura 23 Distribución de Cd biodisponible en temporada de Nortes.....	50
Figura 24 Concentración promedio de Plomo total en los arrecifes del PNSAV. ..	51
Figura 25 Índice de calidad de sedimentos para el metal Pb en los arrecifes del PNSAV.	53
Figura 26 Concentración de total de Pb en las tres temporadas climáticas (Nortes, Secas y Lluvias).	54
Figura 27 Correlación entre concentración total de Plomo y fracción de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Secas.	55
Figura 28 Correlación entre la concentración total de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Lluvias.	56
Figura 29 Correlación entre concentración total de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Nortes.....	56
Figura 30 Distribución de Plomo total en temporada de Lluvias.....	58
Figura 31 Distribución de Plomo total en temporada de Secas.....	59
Figura 32 Distribución de Plomo total en temporada de Nortes.	60
Figura 33 Concentración promedio de Plomo total en los arrecifes del PNSAV. ..	61
Figura 34 Índice de calidad para Plomo biodisponible en los arrecifes del PNSAV.	63

Figura 35 Concentración de plomo biodisponible en las tres temporadas climáticas (nortes, lluvias y secas).....	64
Figura 36 Correlación entre Correlación entre la concentración biodisponible de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Secas.	65
Figura 37 Correlación entre Correlación entre la concentración biodisponible de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Lluvias.	65
Figura 38 Correlación entre Correlación entre la concentración biodisponible de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Nortes.	66
Figura 39 Distribución de Plomo biodisponible en la temporada de Lluvias.....	67
Figura 40 Distribución de plomo biodisponible en la temporada de Nortes.....	68
Figura 41 Distribución de Plomo biodisponible en la temporada de Secas.....	69
Figura 42 Análisis de conglomerados para concentración de Cadmio total en los arrecifes del PNSAV.....	70
Figura 43 Análisis de conglomerados para concentraciones de cadmio biodisponibles en los arrecifes del PNSAV.....	71
Figura 44	¡Error! Marcador no definido.
Figura 45	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Concentraciones reportadas para cadmio y plomo en sedimentos en el Golfo de México. Concentraciones en mg/kg.....	12
Tabla 2 Programación empleada en método Soil-3051 HP500.....	23
Tabla 3 Descripción de clasificación textural y parámetros estadísticos del tamaño de grano de los sedimentos del PNSAV.....	28
Tabla 4 Concentración de Cd totales (mg/kg) por sitio de muestreo.....	32
Tabla 5 Correlación de Pearson entre el tipo de grano y las concentraciones totales de Cadmio en el PNSAV.	35
Tabla 6. Concentración promedio biodisponible de Cd en sedimento del PNSAV.....	42
Tabla 7 Correlación de Pearson entre concentración de Cadmio biodisponible y fracción de grano.....	45
Tabla 8 Concentración promedio de Plomo total en los arrecifes del PNSAV.....	52
Tabla 9 Correlación de Pearson entre tipo de grano y concentración total de Plomo.	55
Tabla 10 Concentración promedio de Plomo biodisponible en los arrecifes del PNSAV	62
Tabla 11 Correlación de Pearson entre tipo de grano y concentración biodisponible de Plomo.	64

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los metales pesados han sido considerados los contaminantes más peligrosos por su alto nivel de toxicidad, persistencia y difícil degradación en los ecosistemas acuáticos. Estos metales entran a los ecosistemas acuáticos a través de fuentes puntuales (industriales, urbanas y agrícolas) y difusas (escorrentías, erosión del suelo, deposición atmosférica, etc.) (Ghrefat and Yusuf., 2006; Gao *et al.*, 2010; Passos *et al.*, 2010 y Choque *et al.*, 2013).

Los sedimentos superficiales constituyen un componente crucial en los ambientes acuáticos. La presencia de metales pesados en sedimentos superficiales está convirtiéndose en un importante sujeto de preocupación, debido a la gran abundancia, persistencia, disponibilidad, bioacumulación, reciclaje biogeoquímico y riesgo ecológico de estos elementos en los medios acuáticos (Bastami *et al.*, 2015). En condiciones favorables como lo son; cambios en el pH, potencial redox, corrientes y temperatura pueden migrar hacia la interfaz sedimento- agua pudiendo afectar la salud de la vida humana a través de su presencia en la cadena trófica (Liu Chau, 2005).

La concentración de metales pesados en los sedimentos no sólo depende de fuentes antropogénicas, sino también de las características texturales, contenido de materia orgánica, composición mineralógica, ambiente deposicional de los sedimentos, procesos bioquímicos y condiciones ambientales marinas, así mismo, la evaluación de metales pesados en sedimentos marinos es un importante indicador de contaminación, permitiendo evaluar la posible contaminación y los efectos negativos de metales pesados en los organismos marinos y el hombre mismo.

El Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), ubicado en las cercanías del puerto de Veracruz, es un ecosistema de suma importancia, ya que constituye el segundo complejo arrecifal más importante en la zona económica exclusiva de México (DOF, 2012). Este sistema está sujeto a fuertes presiones antrópicas y ambientales, incluidos el tráfico marítimo, el desarrollo urbano y las

descargas fluviales de sedimentos terrígenos provenientes de los afluentes de las desembocaduras de los ríos Jamapa, Papaloapan y la Antigua.

Existe poca información sobre la distribución de metales pesados en sedimentos del PNSAV, así como la fracción biodisponible en el medio. Es por eso que el presente trabajo evaluó las concentraciones totales y biodisponibles de los metales: Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) en sedimento del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano y su distribución dentro de este sistema, con el fin de observar los efectos adversos hacia el ecosistema, generando un documento base para futuros trabajos de investigación, técnicos, así como para el buen manejo del área.

2. ANTECEDENTES

2.1. Contaminación ambiental

Hoy en día los ecosistemas han sufrido presiones de diferentes índoles. La sobreexplotación de recursos, la población excedente, malas prácticas en la industria, deforestación, has sido uno de los problemas los cuales han provocado la contaminación en suelos, ríos y océanos.

Por contaminación nos referimos a ***“la introducción antrópica en forma directa o indirecta de sustancias, resultando en un efecto deletéreo o nocivo en los recursos vivos” (Rand, 1995).*** Muchos de los contaminantes que se originan como consecuencia de las actividades humanas son transportados, tanto en disolución como adsorbidos en partículas en suspensión, desde las zonas continentales hacia los océanos. Durante este transporte se incorporan a los sedimentos un buen número de estos contaminantes, a través de diferentes procesos como la adsorción o las reacciones químicas ocasionando una contaminación a estos sistemas afectando a los organismos que lo habitan y a su vez provocando una biomagnificación de los contaminantes. (Botello y Páez-Osuna, 1986).

2.2. Generalidades de los metales pesados

El termino metal pesado incluye los metales trazas esenciales y los no esenciales, los cuales pueden ser tóxicos a los organismos vivos dependiendo de sus propiedades, disponibilidad y niveles de concentración (González-Soto *et al.*, 2000). Si bien los organismos vivos necesitan varios de estos elementos para desarrollar las funciones biológicas básicas, tanto la deficiencia como el exceso de estos elementos pueden causar un desorden a nivel fisiológico. Así mismo, estos elementos presentan una capacidad persistente y de bioacumulación en sistemas ambientales y en organismos (Reyes *et al.*, 2016).

Químicamente, se entiende como metal pesado aquel elemento cuya densidad es mayor de 5 g/cm³, la costumbre ha hecho que la connotación se emplee para aquellos que son tóxicos, aunque en realidad el termino es indistinto y se usa para

denominar a los grupos de transición y pos transición (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) y el de los metaloides (As y Se) (Jiménez, 2001).

2.3. Propiedades químicas y toxicidad de Cd y Pb

Cadmio: Las propiedades químicas y físicas del cadmio (Cd) son muy similares a las del zinc, y con frecuencia coexiste con este metal en la naturaleza. Se encuentra presente en el ambiente mediante fuentes naturales y antropogénicas, la primera ocurre por efectos naturales mencionándose el vulcanismo, erosión de las rocas, entre otros. La segunda fuente se considera es propiciada por actividades humanas, ocurriendo: aleaciones, refinación, combustibles, baterías, pigmentos amarillo y rojo en plásticos y tintes, estabilizador del cloruro de polivinilo (PVC), galvanización, pirotecnia, soldaduras, entre otras (Martorell, 2010; Al Naggari *et al.*, 2018). Se ha utilizado por un periodo relativamente corto y su uso extensivo ha aumentado durante el presente siglo.

Entre los efectos tóxicos que puede ocasionar la exposición al cadmio en la salud se encuentran: alteraciones cardíacas, alteraciones hepáticas, anemia, bronquitis, cefalea, cáncer de pulmón, formación de cálculos renales, fragilidad ósea, insuficiencia respiratoria, osteoporosis, trastornos en el sueño, vértigo, vómitos, entre otros efectos agudos y crónicos (Morton-Bermea, 2006). Respecto a la gama de afectaciones a la salud humana, la IARC (Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer) clasifica al cadmio un agente carcinógeno a humanos (grupo I) y por parte de la EPA es clasificado como un probable carcinógeno humano (grupo B1) (García-García *et al.*, 2012).

Plomo: El plomo es un metal tóxico el cual se encuentra presente en forma natural en la corteza terrestre; Sus fuentes naturales son la erosión del suelo, el desgaste de los depósitos de los minerales de plomo y las emanaciones volcánicas. Su proporción en la corteza terrestre es aproximadamente de 15 ppm. Los minerales más importantes son la galena (sulfuro de plomo, PbS) la cual se encuentra fuertemente asociada con el zinc y, en pequeñas cantidades con cobre, cadmio y hierro, la cerusita (carbonato de plomo).

De forma antropogénica se utiliza principalmente en la producción de: aleaciones, baterías, combustibles, eléctricos, fertilizantes, pesticidas, pigmentos, pinturas, plásticos, soldaduras, gasolina, entre otras (Martorell, 2010; Al Naggar *et al.*, 2018).

La cantidad anual de plomo que se dispersa como contaminante atmosférico es muy elevada. Entre los efectos tóxicos que puede ocasionar la exposición al plomo en la salud humana se encuentran: anemia hipocrómica, anorexia, enfisema, lesiones cardíacas, malformaciones renales, trastornos nerviosos, vómitos, entre otros efectos agudos y crónicos (Morton-Bermea, 2006). La IARC (Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer) clasifica a los compuestos elementales y compuestos inorgánicos de plomo como posibles agentes carcinógenos en seres humanos (grupo 2B), el plomo orgánico se considera no carcinógeno (grupo 3) por la IARC (García-García *et al.*, 2012).

2.4. Metales pesados y biodisponibilidad en sedimentos

La presencia de metales pesados en sedimentos está creciendo progresivamente y convirtiéndose en tema de importancia global. Debido a que estos elementos son abundantes en el medio, no son biodegradables naturalmente y tienen una vida media alta, son tóxicamente inherentes, persistentes y producen un riesgo ecológico y de salud. (Bastami *et al.*, 2015; Toro *et al.*, 2016).

Estudios de metales pesados en sedimentos superficiales, han sido considerados trazadores de monitoreo de los efectos de las actividades antropogénicas (Xu *et al.*, 2016). Viéndose reflejada debido a los vertimientos incontrolados de las industrias, hasta la utilización de productos químicos tales como los pesticidas los cuales son transportados por escorrentías desde las zonas agrícolas hasta el medio marino, aunado a esto, el vertimiento de las aguas residuales principalmente domésticas e industriales las cuales, al mezclarse, aumentan la carga de contaminante y su nivel de toxicidad entrando en la columna de agua y depositándose finalmente en los sedimentos marinos en donde tienden acumularse, actuando así como el principal reservorio de metales pesados y una posible fuente de contaminación a causa de

la relación que existen entre los procesos químicos y biológicos (Sheykni y Moore, 2013).

La fijación de los metales pesados en los sedimentos se produce por medio de las arcillas, y los óxidos hidratados de Al, Fe y Mn, en conjunto con carbonatos, materia orgánica, tamaño de grano, capacidad de intercambio iónico, composición mineral, entre otros (Figura 1) (Vazquez *et al.*, 2002; Martorell, 2010).

Las fracciones de metales pesados biodisponibles en los sedimentos son aquellas que representan un alto riesgo para los organismos debido a que son formas fácilmente intercambiables con la columna de agua y quedan a disposición de los mismos, pudiendo bioconcentrarse y/o bioacumularse (Ponce- Velez y Botello, 1991).

Los efectos en los sistemas acuáticos de los metales pesados, su biodisponibilidad y toxicidad están estrechamente relacionados con la distribución de las especies químicas en las fases sólidas y líquidas de las masas de agua y está regulada por procesos biogeoquímicos, mencionándose entre otros: procesos de adsorción, meteorización; a la vez estos procesos están influenciados por: especiación química de metales, pH, potencial redox, entre otros factores químicos y relacionados a su vez con el tamaño de granos, mineralogía, carbón orgánico, entre otros procesos.

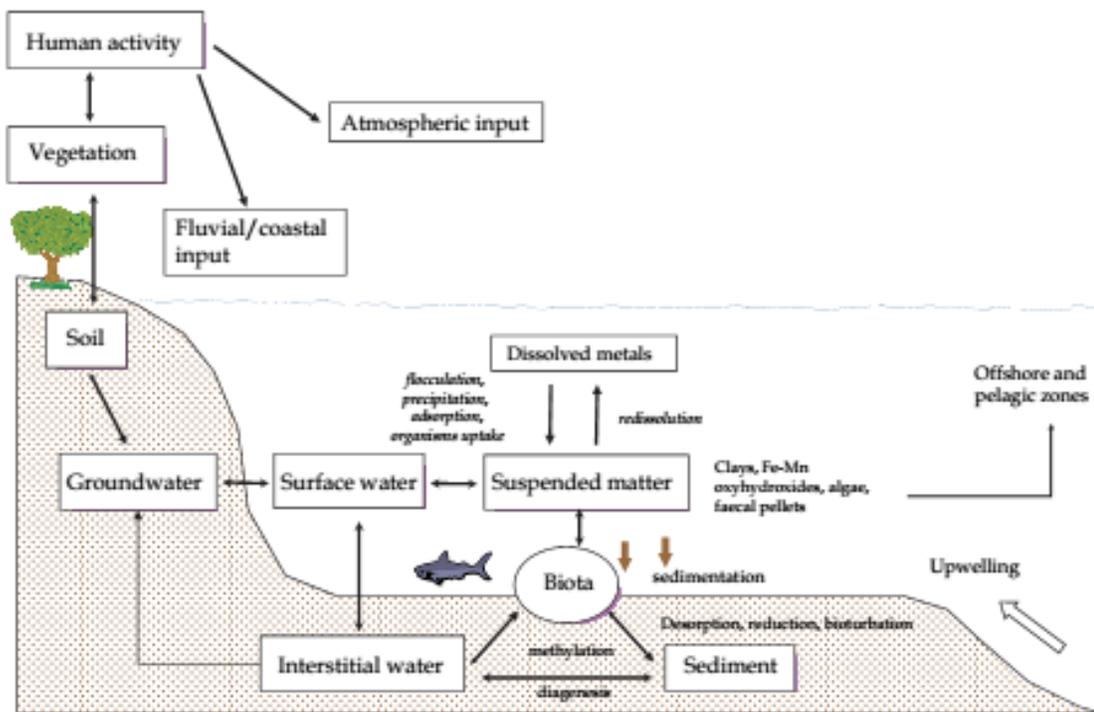


Figura 1 Interacción de metales pesados en sistemas costeros. Tomado de: Rubio *et al.* (2011).

2.5. Estudio de metales pesados

2.5.1. Metales pesados a nivel Internacional

Existen estudios a nivel internacional donde se determina la concentración de metales pesados, Hedouin *et al.*, 2009 realizan una evaluación de metales y metaloides en sedimentos de ecosistemas arrecifales de Hawái, obteniendo valores promedio de Cd de; $1.81 \pm 0.09 > 0.02 \pm 0.03$, para el metal Pb los valores más altos fueron $9.42 \pm 3.59 > 0.05 \pm 0.00$. Las concentraciones de metales pesados obtuvieron una correlación significativamente positiva (Pearson > 0.085) con la fracción de arcillas.

En el mismo año, (Valdés Jorge y Sifeddine Abdel) determinan la composición elemental del contenido de metales pesados en sedimentos marinos de la bahía Mejillones del Sur, Chile realizando una evaluación ambiental de la zona costera, donde muestran que la abundancia de metales analizados fue: $Zn > Cu > Ni > Pb > Cd$, su análisis muestra dos grandes zonas de contaminación; una asociada a la

actividad industrial desarrollada en la bahía, y otra correspondiente al área de desarrollo urbano de Mejillones.

Ahmed El Nemr *et al.*, 2016. Evaluaron el riesgo ecológico de Al, Zn, Cu, Ni, V, Pb, Cd y Hg en sedimentos superficiales colectados en la costa egipcia del Mar Rojo. Se emplearon los métodos de índice de Geo-acumulación (I_{geo}), método de factor de enriquecimiento de sedimentos (SEF) y método de índice de riesgo potencial ecológico (PERI). Se obtuvo el siguiente patrón de concentraciones en orden descendente: Al>Zn>Ni>V>Pb>Cu>Cd>Hg. Las concentraciones promedio de Cd: 0.12 $\mu\text{g/g}$. promedio de Pb: 1.89 $\mu\text{g/g}$.

Krishnakumar *et al.*, 2017. Colectaron 52 muestras de sedimentos en la parte norte del Golfo de Mannar reserva de la biosfera para evaluar el riesgo geoespacial de sedimentos. Mediante el método de factor de contaminación (CF) se determinaron a los sedimentos moderadamente contaminados, metal Pb se reportó muy altamente contaminado. Se obtuvo el siguiente patrón de concentraciones en orden descendente: Fe>Pb>Zn>Ni>Cr>Cu>Mn.

Kehinde- Okoro *et al.*, 2017. Realizan un trabajo de patrones de movilidad y correlación de metales pesados en sedimentos estuarinos del río Olonkoro, Nigeria. Dando como resultado los porcentajes disponibles de metales; Mg 87.08 mg/kg, Fe 85.54 mg/kg, Cu 8.5 mg/kg, Zn 3.81 mg/kg y Pb 0.01- 1.38 mg/kg. No se encontró Cd. La fracción biodisponible para Pb fue de 83.33 mg/kg.

Jin-Jun Liu *et al.*, 2018. Hacen una evaluación de contaminación, fracción química y riesgo ecológico de metales pesados en sedimentos de la Bahía Daya, en el Sur de China, mostrando rangos medios en las concentraciones totales de Cd (0.13 - 0.43 mg/kg^{-1}) y Pb (15.89 – 30.01 mg/kg^{-1}) y sus fracciones biodisponibles Cd 68.14 % y Pb 26.59 %. Cadmio presentó un riesgo ecológico moderado.

2.5.2. Metales pesados en el Golfo de México

Se han realizado diversos estudios de elementos metálicos en sedimentos de ecosistemas marinos del Golfo de México, siendo de interés para el presente estudio: cadmio y plomo (Tabla 1).

Ponce-Vélez *et al.*, 2006. Realizaron una evaluación de las concentraciones totales y concentraciones biodisponibles de metales pesados en la placa continental de Tabasco, Tamaulipas y Veracruz. El patrón de concentraciones totales correspondió: Cr>Ni>Pb>Cd, para las concentraciones biodisponibles se obtuvo el siguiente patrón: Pb>Ni>Cr>Cd. Las concentraciones totales y concentraciones biodisponibles para Cadmio fueron; totales (1.0-13.9) y biodisponibles (0.4-5.7), Plomo: totales (0.9-37.7) y biodisponibles (0.9-17.4), expresadas en $\mu\text{g g}^{-1}$.

Rosales-Hoz *et al.*, 2007; Evaluaron las concentraciones de sedimentos superficiales cerca de la Isla de Sacrificios dentro del PNSAV en tres temporadas (nortes, lluvias y secas), los valores promedio de metales encontrados fueron decreciendo en el siguiente orden; Fe > V > Cr > Zn > Ni > Pb > Cu. El patrón de distribución de metales fue diferente en las tres temporadas. Las concentraciones promedio para Pb fue de 10.97 mg/kg.

Celis-Hernández *et al.*, 2013. Calcularon el grado de contaminación de una amplia gama de elementos metálicos (incluyendo cadmio y plomo), en la región del Golfo de México impactada por el río La Antigua y Río Jamapa, caracterizando tres grupos: pendiente continental, río La Antigua y río Jamapa. Obtuvieron un factor de contaminación considerando moderadamente contaminados a ambos metales.

De la Cruz Landero *et al.*, 2013. realiza la determinación de las concentraciones de Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Níquel (Ni) en sedimentos de manglares en el área de influencia de Laguna de Términos en el estado de Campeche encontrando valores superiores a los permisibles para estos metales con 0.75 y 16.05 mg/kg⁻¹ de Cd y Pb.

Zamudio-Alemán *et al.*, 2014. Realiza una identificación de la concentración de Cu, Cd y Zn en los sedimentos suspendidos del PNSAV, como un posible diagnóstico de las principales fuentes de contaminación, dando como resultado las concentraciones obtenidas de estos metales fueron: 0.1392; 0.001 y 2,3606 mg/kg, respectivamente. Se atribuyó como principales fuentes de contaminación a los ríos cercanos al PNSAV, como son el río Jamapa y río Papaloapan.

Horta-Puga 2016. Realizó una partición de Pb en sedimentos del Sistema Arrecifal Veracruzano, obtuvo una concentración total ($53.1-107.3 \mu\text{g g}^{-1}$) y una concentración biodisponible ($21.9-85.6 \mu\text{g g}^{-1}$) para dicho metal en la mayoría de los arrecifes coralinos del PNSAV, indicando una contaminación moderada a considerablemente alta, sugiriendo la necesidad de mejores normas de calidad enfocadas en sedimentos.

Celis-Hernández *et al.* (2017) cuantificaron las concentraciones de elementos traza (As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn) en sedimentos marinos en la costa central de Veracruz, región influenciada por el río Jamapa y río La Antigua. Ambos ríos impactan al PNSAV: el río Jamapa lo impacta en la parte central y el río La Antigua lo impacta en la parte norte. Se evaluaron cuatro sitios: un sitio se ubicó en la costa próxima a la planta nuclear de Laguna Verde; un sitio ubicado en la desembocadura del río La Antigua, al norte del PNSAV; los dos sitios restantes se ubicaron en la costa de la poligonal del PNSAV (un sitio en la zona norte del PNSAV cercano al Puerto de Veracruz y el otro sitio en la costa cercana al río Jamapa).

Celis-Hernández *et al.* (2018) cuantificaron las concentraciones de elementos traza (Ba, Co, Cr, Cu, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Th, V, Y, Zn y Zr) en sedimentos marinos en la costa de Tamaulipas, región influenciada por el río Panuco. Se evaluaron cuatro sitios: dos sitios próximos a la desembocadura del río Panuco (cada sitio colindante de una plataforma petrolera), los dos sitios restantes se ubicaron al norte y al sur conforme a la desembocadura del río Panuco, la concentración promedio para Pb fue; 10.0 – 27.0 mg/kg.

Ruiz-Fernández *et al.* (2019) evaluaron la distribución espacial y temporal de metales pesados en el sur del Golfo de México (desde la costa de Tamaulipas hasta la costa de Yucatán), ante las dimensiones del área de estudio, se estimó la presencia de metales pesados por fuentes como la industria petrolera y descargas fluviales. Se determinaron concentraciones altas de arsénico, cobalto, cobre, cromo, níquel, plomo, vanadio y zinc desde los últimos 100 años para la región sur del Golfo de México.

Para metales pesados en sistemas lagunares cercanos al PNSAV se mencionan: Castañeda-Chávez *et al.*, 2017. Determinaron cadmio, cobalto, cobre, cromo y plomo en el Sistema Lagunar de Alvarado, realizaron un muestreo en diversos sitios distribuidos en las lagunas y ríos conectados al presente sistema lagunar. Los valores promedios para los metales fueron; Cd 0.01- 5.27 mg/kg y Pb 0.02- 2.3 mg/kg.

Botello *et al.*, 2018. Realizaron una determinaron de los metales; cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y vanadio en núcleos de sedimento del Sistema Lagunar de Alvarado, humedal enlazado con el río Papaloapan por la desembocadura del último al Golfo de México y en cierta forma también delimita la zona norte del PNSAV, mostrando concentraciones para los metales Cd y Pb de; <0.00-0.016 mg/kg y 31.86-40.36 mg/kg respetivamente.

Tabla 1 Concentraciones reportadas para cadmio y plomo en sedimentos en el Golfo de México.
Concentraciones en mg/kg

Matriz	Cd	Pb	Región	Referencia
Sedimento marino	1.0-13.9	0.9-37.7	Placa continental de Tabasco, Tamaulipas y Veracruz	Ponce-Vélez <i>et al.</i> (2006)
Sedimento superficial	-	5.3-42.4	Isla de Sacrificios, PNSAV	Rosales-Hoz <i>et al.</i> (2007)
Sedimento superficial	0.02-0.2	5.0-22.0	Costa central de Veracruz	Celis-Hernández <i>et al.</i> (2013)
Sedimento marino	<0.0-0.37	-	PNSAV	Zamudio-Alemán <i>et al.</i> (2014)
Sedimento superficial	-	53.1-107.3	PNSAV	Horta-Puga (2016)
Sedimento	0.01-5.27	0.02-2.3	Sistema Lagunar de Alvarado	Castañeda-Chávez <i>et al.</i> (2017)
Sedimento marino	-	2.90-16.6	Costa central de Veracruz	Celis-Hernández <i>et al.</i> (2017)
Núcleo de sedimento	<0.00-0.016	31.86-40.36	Sistema Lagunar de Alvarado	Botello <i>et al.</i> (2018)
Sedimento marino	-	10.0-27.0	Costa de Tamaulipas	Celis-Hernández <i>et al.</i> (2018)
Núcleo de sedimento	-	0.1-26.2	Región sur del Golfo de México	Ruiz-Fernández <i>et al.</i> (2019)
Sedimento marino	2.9-33.33	0.0-11.72	PNSAV	Este estudio

3. JUSTIFICACIÓN

La evaluación de las concentraciones de metales pesados en sedimentos marinos es una herramienta eficaz, la cual permite conocer las fluctuaciones en el tiempo de posibles contaminantes, su toxicidad y el riesgo ecológico en los ambientes marinos. Por lo tanto, es necesario confeccionar una base de datos sobre la distribución y concentración de metales pesados en estos ambientes.

El PNSAV, se encuentra altamente influenciado al aporte de sedimento provenientes de fuentes naturales; como lo son las descargas de los ríos, debido a que en sus cuencas se realiza diferentes actividades agrícolas en las cuales, el uso de químicos para combatir plagas y fertilizar el suelo los cuales aportan grandes cantidades de metales pesados como lo son; cobre, cadmio, mercurio, cromo, arsénico, entre otros. Así mismo, se resalta que dentro del área de influencia del PNSAV existe un alto tráfico marítimo; donde existen canales de navegación y una zona de fondeo de barcos provienen de diferentes continentes, sin existir una regulación y/o vigilancia estricta que supervise sus descargas de aguas de lastre en el sistema y junto con ellos sedimentos y posibles contaminantes. Aunado a esto, también existe una descarga de aguas residuales las cuales en su mayoría desembocan en las playas que se encuentran dentro de la zona de influencia del PNSAV. El aporte de sedimentos y contaminantes a los arrecifes coralinos puede constituir riesgos en la salud del ecosistema arrecifal y por consecuencia a la salud humana.

Por lo tanto, es necesario emanar información sobre la presencia y porcentajes de las características de los sedimentos marinos que existe en los arrecifes del PNSAV, así como la determinación de las concentraciones de los metales pesados (Pb y Cd). Para poder conocer posibles escenarios y comportamiento en diferentes épocas del año y, en consecuencia, aportar con datos de campo, un modelo de comportamiento del SAV ante una posible contaminación por metales pesados.

4. HIPÓTESIS

- 1.- Los procesos geológicos no condicionan la distribución espacial de metales pesados en sedimento del PNSAV.
- 2.- La distribución espacial de metales pesados en sedimentos del PNSAV, se relaciona principalmente a las actividades antropogénicas.
- 3.- Existe diferencia significativa entre la concentración de metales pesados presentes y las temporadas climáticas del año analizadas.

5. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Conocer las concentraciones totales y biodisponibles de metales pesados presentes en sedimentos de fondo del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano y su distribución durante tres épocas del año dentro del para poder observar los efectos adversos al ecosistema.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ❖ Determinar por espectrofotometría de absorción atómica la concentración total y biodisponible de los metales (Pb y Cd) en sedimentos de fondo del PNSAV.
- ❖ Determinar por Difracción de Rayos X, el tamaño de la partícula de los sedimentos de fondo del PNSAV.
- ❖ Comparar la presencia de metales pesados en los sedimentos en tres temporadas, asociadas a las variables climáticas.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Área de estudio

El Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, se encuentra localizado frente a los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado, entre las coordenadas geográficas centrales al norte $19^{\circ}15'27.11''$ N $96^{\circ}12'01.00''$ W, y al sur $19^{\circ}02'24.00''$ N y $95^{\circ}46'19.00''$ W; con una extensión total de acuerdo al decreto en que se declara como Área Natural Protegida con el carácter de Parque Nacional, con superficie de 65,516-4708.05 hectáreas (DOF,2012). Constituido por 28 arrecifes coralinos, clasificados en dos grupos: el primero situado frente a la localidad de Antón Lizardo, perteneciente al municipio de Alvarado compuesto por los arrecifes: Blanca, Gioté, Enmedio, Rizo, Cabezo, Chopas, Polo, Anegada de Afuera, Punta Coyol, La Palma, Topetillo, Santiaguillo, Anegadilla, Sargazo y Periférico, y el segundo grupo localizado frente a la zona conurbada Veracruz-Boca del Río que incluye: Punta gorda, Punta Brava, Bajo Paducah, Gallega; Galleguilla, Blanquilla, Verde, Anegada de Adentro, Sacrificios, Mersey, Pájaros, Hornos e Ingenieros (Figura 2).

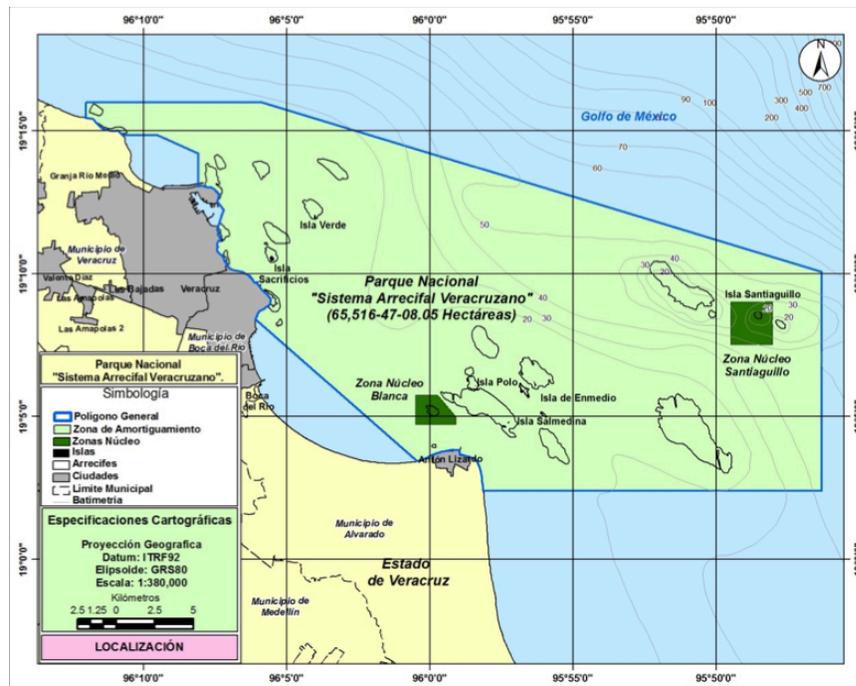


Figura 2 Poligonal del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

6.1.1. Climatología

Este sistema se encuentra bajo la influencia de condiciones climáticas características de la región, las cuales son: una época de “secas” que comprende de septiembre a abril, prolongándose hasta principios del mes de mayo, caracterizándose por una escasa precipitación por debajo de la normal climatológica para esta región con registros mínimos de 10 mm, con temperaturas ambientales bajas alrededor de los 14° hasta los 19° C.

La época de lluvias es la segunda condición climática de la región, esta inicia a partir del mes de mayo y se extiende hasta el mes de agosto, caracterizada por temperatura elevadas máximas entre los 35 a los 40°C y mínimas de entre 15 y 20°C con una alta precipitación comenzando en el mes de junio hasta agosto y con una precipitación anual de 800 a 2,000 mm (Salas- Pérez JJ.- Granados-Barba A., 2008).

La tercera condición climática es la denominada frentes fríos, que ocurren a partir del mes de septiembre hasta el mes de mayo, la cual origina los eventos de “norte” comprendiendo frecuentes incursiones de masas de aire frío provenientes del norte, pudiendo tener vientos suaves de los 12 a los 45 km/h o bien vientos sostenidos con velocidades de 110 a 120 km/h (Salas- Pérez JJ.- Granados-Barba A., 2008; CONAGUA, 2013).

6.1.2. Hidrología

El PNSAV está influenciado por las condiciones características del Golfo de México y las cuencas de los ríos que confluyen en él los cuales son; Jamapa, La Antigua y Papaloapan. Al norte, cuya desembocadura se encuentra aproximadamente a 10 km del sistema desemboca el río La Antigua con un volumen aproximado de 1,774.73 Mm³ anuales (Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Río Actopan, Río La Antigua, Río Jamapa, Río Cotaxtla, Jamapa-Cotaxtla y llanuras de Actopan, mismos que forman parte de la porción de la Región

Hidrológica, denominada Papaloapan, SEMARNAT. DOF 03 de noviembre de 2008).

En la parte central se encuentra la desembocadura del río Jamapa que, cuya cuenca nace en las faldas del Pico de Orizaba, recorriendo una distancia de 100 km de la llanura costera, así mismos se le une los ríos Cotaxtla, presenta un Gasto promedio anual de 2,563 Mm³ (CONAGUA, 2011).

Al sur, el río Papaloapan a 35 km naciente de las montañas del estado de Oaxaca, teniendo una fuerte influencia en las características de las aguas circundantes del PNSAV descarga aproximadamente 47,000.00 Mm³ anuales con fluctuaciones entre 25,000 y 67,000 Mm³ (Consejo de Cuenca del río Papaloapan, 2013).

6.1.3. Oceanografía

Las aguas que rodean a los arrecifes del PNSAV son especialmente; oceánicas, costeras y de mezclas, la dirección predominante de las corrientes en temporada de verano es de dirección de sur- norte y en temporada de otoño las corrientes predominan de norte-sur (Salas-Pérez *et al.*, 2007).

Estudios realizados por la secretaria de Marina en el año 2008, el SAV tiene dos corrientes importantes, una llamada “Corriente Principal”, la cual está determinada por la dirección del viento, la cual se desplaza en promedio hacia el NW con una velocidad de 19.03 cm/s, con vientos del SE. La segunda corriente se llama “Bocana del Puerto”, la cual no presenta relación directa con la dirección del viento, pero varia en proporción a su magnitud.

Los factores que controlan los suministros de sedimentos incluyen la cuenca de drenaje, el clima, la geología, la topografía e hidrología de la zona. Además, este sistema se encuentra presentando procesos antropogénicos como embalses, cambios en el curso del río, dragado de canales, deforestación, minería, urbanización, agricultura y ganadería.

6.2. Diseño Experimental

6.2.1. Colecta y periodicidad del muestreo

Se establecieron 18 sitios de muestreo ubicados dentro de la poligonal del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. Estos sitios forman parte del programa de monitoreo realizado por parte del personal del PNSAV, el cual comprende catorce estaciones de muestreo ubicadas dentro de la poligonal de dicho sistema, para este trabajo se agregaron 3 sitios más de los cuales corresponden a la zona de fondeadero (Figura 3). Las consideraciones para el establecimiento de los puntos de muestreo fueron los siguientes: en base a los conocimientos locales, ya sea porque existen sospecha de amenaza, de degradación y/o presentan una buena condición, descargas de aguas, actividades portuarias, entre otros.

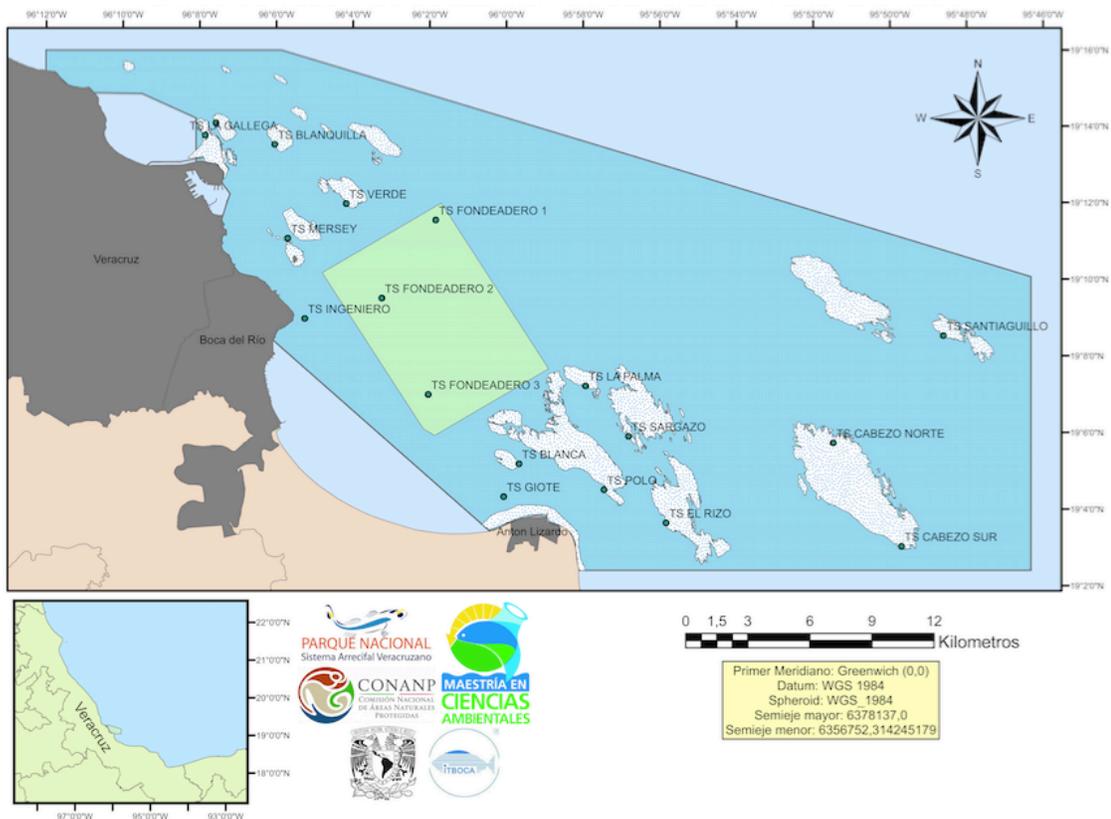


Figura 3. Puntos de muestreo dentro del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

Gallega: Es uno de los arrecifes afectados por la ampliación del puerto. Actualmente es un arrecife de plataforma unido a la costa y es el más próximo a las descargas de aguas residuales más grande de la zona conurbada.

Galleguilla: Al igual que el arrecife Gallega, se encuentra más próximo a la ampliación del puerto.

Blanquilla: Arrecife declarado como “Refugio para la protección de la Flora y Fauna Marina” en el año de 1975, siendo esta una de las primeras acciones de conservación para el Sistema Arrecifal Veracruzano.

Mersey: Por su ubicación entre los arrecifes Pájaros y Sacrificios donde el uso turístico es elevado. Arrecife considerado como ahogado o no emergente.

Verde: Es uno de los arrecifes de la zona norte en base a estudios de diferentes autores como Pérez- España y Vargas 2008, presenta valores de cobertura y diversidad coralina más altos.

Giote: Es el arrecife que se encuentra más próximo a la desembocadura del Río Jamapa.

Blanca: Incluido en el decreto del 2012 como zona núcleo debido a su alta diversidad de especies.

Palma: Este arrecife fue incluido en el decreto del año 2012, no se tiene mucha información sobre este arrecife.

Sargazo: Arrecife no emergente con una alta diversidad de especies.

Cabezo: Es el arrecife más grande y alejado del Puerto de Veracruz, presenta diversos encallamientos, además de que recibe impactos por sedimentación de la pluma del Río Papaloapan.

Santiaguillo: Incluido en el decreto del año 2012 como zona núcleo juntos con el arrecife Blanca debido a su importancia ecológica ya que es un cayo que forma una porción emergida sin vegetación.

Rizo: Arrecife cercano a la nueva marina de la Heroica Escuela Naval Militar.

Polo: Arrecife cercano a la nueva marina de la Heroica Escuela Naval Militar.

Fondeadero: Zona escogida debido a en esta zona se realiza el paraje de barcos procedentes de otros países. El en que la calidad, naturaleza y profundidad del fondo es posible anclarse y resguardarse de los vientos más fuertes.

Las muestras fueron recolectadas en tres temporadas: Nortes, lluvias y secas, marcando en la superficie con un GPS (Marca Garmin) las coordenadas geográficas de los sitios a muestrear. Los sedimentos muestreados dentro de los sitios de muestreo del PNSAV fueron recolectadas mediante buceo autónomo, colectadas en envases de polietileno lavados previamente con HNO₃ al 10% y agua ionizada. Las muestras fueron conservadas a una temperatura de (< 4°C) y transportados al laboratorio del Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA) para su preservación en congelación.

6.2.2. Granulometría

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Geología Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Autónoma de México mediante un analizador BECKMAN COULTER modelo LS 230, de difracción láser que realiza en forma automática la distribución de tamaño de partículas, en un rango de 0.04 hasta 2000 µm, utilizado para la determinación de partículas de sedimentos menores a 2mm. Su fundamento consiste en medir el tamaño de las partículas por difracción del haz de luz láser, la luz de un haz láser es usada como analizador y las partículas sedimentarias que lo atraviesan difractan la luz.

El procedimiento de las muestras se realizó de la siguiente manera; en un vaso de precipitado de 25 ml se colocó 0.5 gr de muestra a la cual se le adicionó 15 ml de agua oxigenada para poder degradar la materia orgánica dejándose reaccionar por 3 horas. Una vez terminada la reacción a las muestras se les adicionó dispersante homogenizando la muestra con una varilla de vidrio, las muestras se dejaron reposar por 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo se procedió a fraccionar separando las gravas de cada muestra. Al término de la fracción se procedió a la lectura de cada una de las muestras en el analizador de haz de luz láser.

6.2.3. Secado de las muestras

Las muestras obtenidas de sedimento marino se secaron en un horno de secado (marca MAPSA) en vasos de precipitado a 60 °C durante 24 horas. Una vez pasado las 24 horas, las muestras fueron almacenadas en bolsas herméticas previamente etiquetadas para su próximo análisis.

6.2.4. Digestión de las muestras

Se empleó la digestión de las muestras de sedimento marino de fondo mediante lo descrito por la NOM-117-SSA1-1994 para metales totales la cual se describe a continuación.

Se inició con el pesado de 0.5 gramos de muestra previamente secas y homogenizada, en una charola plástica utilizando una balanza OHAUS Explorer Pro. Se depositaron cada una de las muestras en un vaso de teflón HP-500, adicionando 10 ml de HNO₃ al 70%.

Posteriormente, se colocó una membrana de seguridad en cada válvula azul, colocando los vasos dentro del soporte con la ayuda de un torquímetro mecánico a 1.6 lb de presión para ser colocadas en el interior del microondas. Para cada una de las corridas se realizó un blanco (0.5 de agua bidestilada y 10 ml de HNO₃ para concentraciones totales, y 2.0 de agua bidestilada y 10 ml de HNO₃ para concentraciones biodisponibles) y un control con una cantidad de muestras similares a las muestras problema.

La digestión fue aplicada mediante el **Método Soil- 3051 HP500**; constando de dos rampas de temperatura y presión (Tabla 2).

Tabla 2 Programación empleada en método Soil-3051 HP500

Etapa	Potencia		Rampa (min)	PSI	°C	Mantenimiento
	Max	%				
1	1200W	100	2:00	300	165	00:00
2	1200W	100	3:00	300	175	05:00

Nota: la potencia se ajustó en base al número de vasos a emplear: 1-3 (300 W), 4-6 (600 W), y 6-12 (1200 W).

Una vez concluida la digestión, se realizaron las filtraciones de las muestras empleando una botella Nalgene con un filtro Milipore (marca HAWP04700) de 0.45 μm y una bomba de vacío.

El filtrado se transfirió a un matraz volumétrico de 25 ml y se aforó con agua tipo II o bidestilada. Las muestras fueron homogenizadas y transferidas a frascos ámbar de vidrio o polietileno previamente rotulados. A cada frasco ámbar se le colocaron en la boca parafilm Milipore®, conservándose en bolsas herméticas de polietileno en refrigeración a 4 °C, hasta su posterior lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica.

6.2.5. Metodología para metales biodisponibles

El método utilizado fue descrito por Rantala y Loring (1975). El método de digestión de los sedimentos con ácido acético, es el método de tratamiento químico más débil que puede ser usado para remover efectivamente la parte del metal que está enlazada débilmente de la concentración total del metal en los sedimentos y material particulado removiendo los metales que están unidos débilmente por intercambio iónico.

A esta remoción del metal de la concentración total del metal en el sedimento mediante la extracción es definida como fracción del metal no detrítico (doble en ácido) del sedimento. La contribución de metales no detríticos representa la proporción de la concentración total del metal que ha sido transportado en solución o en forma coloidal e incorporado al sedimento en una forma variada de vías tales

como precipitación o adsorción. Con materia orgánica suspendida o por la extracción de organismos vivos.

El procedimiento consistió en pesar 2 gramos de sedimento seco al cual se le adicionó 25 ml de ácido acético al 25 % v/v homogenizándose dichas muestras. Las muestras homogenizadas se dejaron digerir por 24 horas a temperatura ambiente, tapando el matraz con un vidrio de reloj. Una vez concluida la digestión, la muestra fue transferida a un tubo de centrifuga graduados los cuales se centrifugaron a 2500 rpm durante 25 min.

Una vez terminado la centrifugación, del sobrenadante se tomó una alícuota de 20 ml con una pipeta volumétrica colocándolo en un matraz volumétrico de 50 ml y se aforó con agua bidestilada. Las muestras fueron transferidas a frascos ámbar de vidrio o polietileno previamente rotulados colocándoles en la boca parafilm Milipore® y conservándose en bolsas herméticas de polietileno en refrigeración a 4 °C, hasta su posterior lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica.

6.2.6. Lectura de muestras

La lectura de las muestras fue realizada empleando un equipo de absorción atómica Thermo Cientific Modelo Ice 3500 AA System, mediante espectrofotometría de flama para Cd y Pb. La metodología fue realizada según las especificaciones de operación establecidas por el fabricante y la Norma Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994. En el procedimiento de lecturas de muestras fue necesaria la preparación de curvas de calibración para cada uno de los metales analizados. Se emplearon para esto estándares certificados marca High Purity Standard Ards.

Los estándares empleados en el equipo de absorción atómica, para la lectura de las muestras y estándares son descritos a continuación. Para Cd y Pb fue empleada una longitud de onda de 228.8nm; con una corriente de lámpara de 50%, empleando una llama de Aire- C₂H₂, una altura de mechero de 4.1mm y un flujo de combustión de 1.0 L min⁻¹.

Adicionalmente, fue realizada la optimización de especificaciones instrumentales como, flujo de aire, gas de acetileno, longitud de onda de la lámpara para cada metal y altura de quemador. Concluida la estabilización del equipo, fueron introducidos los estándares elaborados a concentraciones conocidas; con un rango de menor a mayor concentración de analito. Debido, a la necesidad de obtener una curva de calibración con un coeficiente de correlación superior a 0.99. a continuación, fue realizada la introducción y lectura de la absorbancia de las diferentes muestras digeridas; cuyos resultados permanecieron dentro de las concentraciones de la curva.

6.3. Análisis estadísticos

Para el contraste de metales pesados en sedimentos y para las fracciones obtenidas en granulometría se empleó el software Minitab (versión 16.1.0, Minitab Inc., State College, Pennsylvania, USA).

Para medir las diferencias significativas entre las concentraciones totales y biodisponibles, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de cadmio y plomo en puntos de muestreo empleando una prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para medir la correlación entre las concentraciones de los elementos y el tamaño de grano. Así mismo, se realizó una correlación entre concentraciones totales y biodisponibles. Se efectuó un análisis de conglomerados entre concentraciones totales y biodisponibles de cadmio y plomo.

Para el contraste de variación de las fracciones de granulometría se realizó una gráfica circular y un diagrama de Pareto. El contraste de fracciones de granos se realizó con un análisis de varianza (ANOVA) empleando una prueba de Tukey ($p < 0.05$). Se aplicó una prueba Kruskal-Wallis para granulometría. Se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson entre las variables obtenidas de concentraciones totales, concentraciones biodisponibles y fracciones de granos.

7. RESULTADOS

7.1. Comportamiento de pH en sedimento

Los resultados de pH se comportaron de la siguiente manera; para la temporada de Secas se presentaron valores entre 8.1 a 8.81, con un valor promedio de 8.45; para la temporada de lluvias se observaron valores de 7.79 a 8.85 con un valor promedio de 8.34; la temporada de nortes los valores oscilaron entre 7.9 a 8.80 con un valor promedio 8.44. Se realizó un análisis de varianza de un solo factor para la variación de pH, no presentó diferencias significativas entre las estaciones mediante la prueba de Tukey ($p=0.378$) (Figura 4).

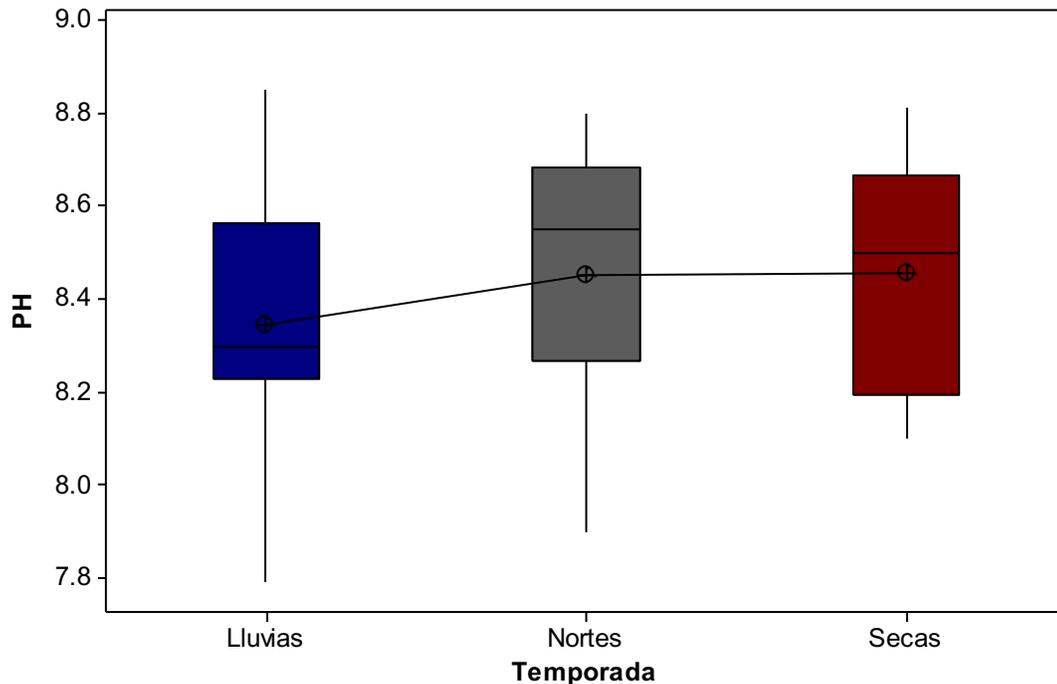


Figura 3. ANOVA de un solo factor para valores de pH en estaciones del PNSAV. No hubo diferencia significativa para la prueba de Tukey ($p>0.05$).

7.2. Granulometría

En general, la distribución y características granulométricas de los sedimentos en la plataforma depende de la morfodinámica de la cuenca y de su relación con las fuentes de aporte, distancia de movilización y composición de los flujos sedimentarios. La descripción textural y los parámetros estadísticos sobre los datos del tamaño de grano de los sedimentos marinos del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano se presentan en la tabla 3. Los resultados generales de los porcentajes de las diferentes fracciones que componen el sedimento sugieren similitud entre los arrecifes; Verde, Polo, Blanca, Sargazo y la zona de Fondeadero 228. En contraste los sedimentos de los demás arrecifes muestran una mayor diversidad del tamaño de grano (Figura 5). En la zona norte del PNSAV predomina el grupo textural de arenas medias y limos finos (Tabla 3) para la zona de fondeadero se encuentra compuesto por limos finos y finalmente para la zona Sur los arrecifes los sedimentos de estos arrecifes están compuesto por limos finos, arenas finas y medias. A nivel general se observa un predominio de los limos, el cual estuvo presente en todas las estaciones de muestreo, el siguiente tipo más abundante fueron las arcillas, seguido por las arenas y gravas. Las estaciones que presentan un mayor porcentaje de limos son; Gallega (76.93 %), Verde (76 %) y la estación Fondeadero con (73.93 %). El tipo de grano denominado arcillas presenta un mayor porcentaje en las estaciones; Verde (21.19 %), Polo (24.03 %) y Fondeadero 3 (26.06 %). Las estaciones Cabezo Sur (97.40 %), Galleguilla (96.49 %) y Blanquilla (95.59 %) en el tipo arenas. Cabe resaltar que el arrecife La palma es donde se han obtenido los sedimentos con mayor tipo de grano (gravas) con un porcentaje de 26.33 % (Figura 5).

Tabla 3 Descripción de clasificación textural y parámetros estadísticos del tamaño de grano de los sedimentos del PNSAV.

PNSAV	FRACCIONES (%)				PARÁMETROS ESTADÍSTICOS			
	Muestra	GRAVAS	ARENAS	LIMOS	ARCILLAS	Mz _i	σ _i	Sk _i
Verde	2.794		76.007	21.199	6.498	1.816	0.463	0.935
Blanquilla	1.906	95.596	2.074	0.424	1.975	0.437	0.350	1.614
Galleguilla		96.490	2.951	0.559	2.231	0.552	0.414	1.161
Gallega		10.700	76.930	12.370	5.612	1.703	0.429	1.043
Mersey	21.757	21.894	47.334	9.015	3.280	3.675	-0.219	1.833
Sargazo	10.485	0.986	74.357	14.172	5.847	2.597	-0.005	1.765
La Palma	26.335	67.652	5.018	0.995	1.358	2.045	-0.530	0.659
Santiagoullo	4.467	77.348	2.025	16.160	6.022	1.821	0.360	0.971
Cabezo Sur		97.400	2.239	0.361	2.047	0.483	0.438	1.408
Blanca	11.814	0.007	72.516	15.663	5.990	2.615	0.054	1.914
Salmedina	20.028	5.565	61.317	13.090	3.888	3.917	-0.338	1.557
Cabezo Norte	8.387	10.764	65.423	15.426	5.695	2.722	0.028	1.597
Giote	0.732	92.775	5.374	1.119	2.937	0.519	0.203	1.564
Polo		0.003	75.967	24.030	6.510	1.913	0.359	0.778
Rizo		15.660	69.080	15.260	5.569	1.898	0.615	0.948
Fondeadero 226		69.410	26.733	3.857	3.769	1.066	0.561	1.851
Fondeadero 227		38.830	50.910	10.260	4.927	1.717	0.704	1.251
Fondeadero 228		0.006	73.934	26.060	6.671	1.927	0.280	0.776

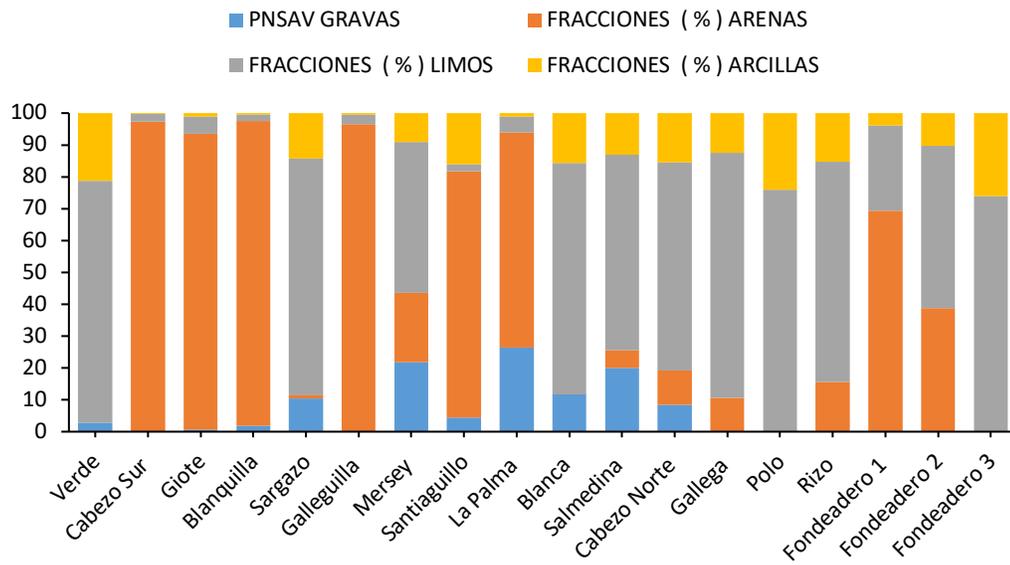


Figura 4. Porcentaje de frecuencia de intervalos de tipos de granos en los arrecifes del PNSAV.

7.2.1. Análisis de varianza en sedimentos

Se analizó una variación de fracciones de granos por puntos de muestreo empleando un análisis de varianza (ANOVA). En forma general las fracciones obtenidas de los cuatro tipos de granos se muestran en orden decreciente: limos (32.92 ± 33.71) > arenas (29.21 ± 38.41) > arcillas (8.33 ± 8.71) > gravas (4.53 ± 7.88) en %. Se presentan diferencias significativas entre cada uno de los tipos de granos mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$) (Figura 6).

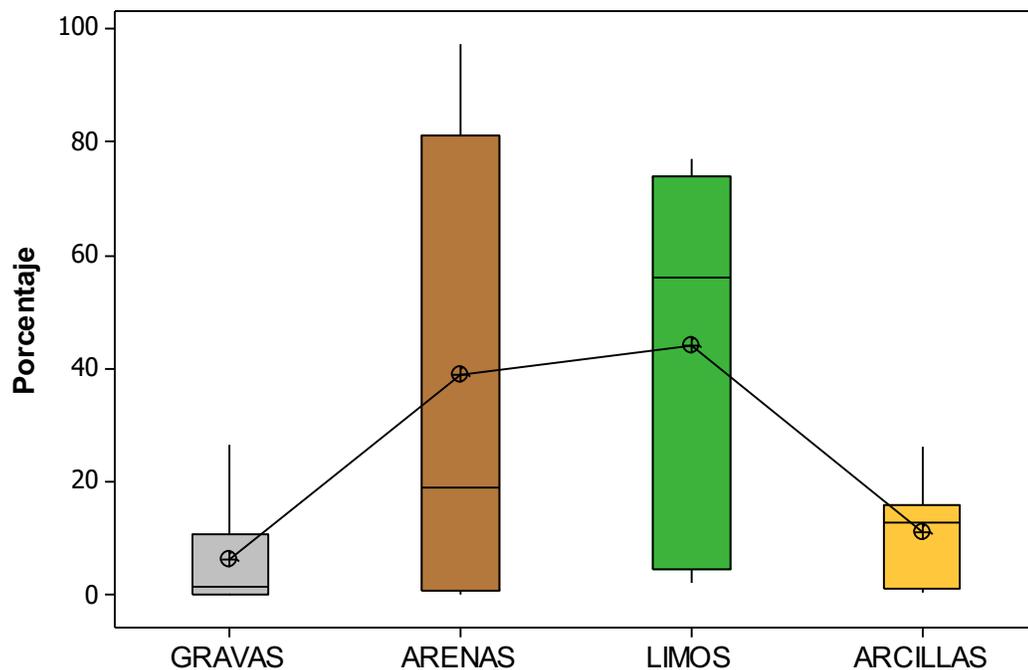


Figura 5. ANOVA de un solo factor para fracciones de granos evaluados. (Tukey $p < 0.05$).

7.3. Metales pesados en sedimento

7.3.1. Concentración de total de Cadmio

De los arrecifes muestreados se obtuvo una concentración promedio para todas las estaciones, los resultados presentan los siguiente; la concentración más alta de Cd se obtuvo en el arrecife Rizo, el cual presento la máxima concentración de Cd con 13.51 ± 17.16 mg/kg, seguido del arrecife Blanquilla con 3.58 ± 0.21 mg/kg y el arrecife Gallega con 3.51 ± 0.11 mg/kg (Tabla 4) (Figura 7).

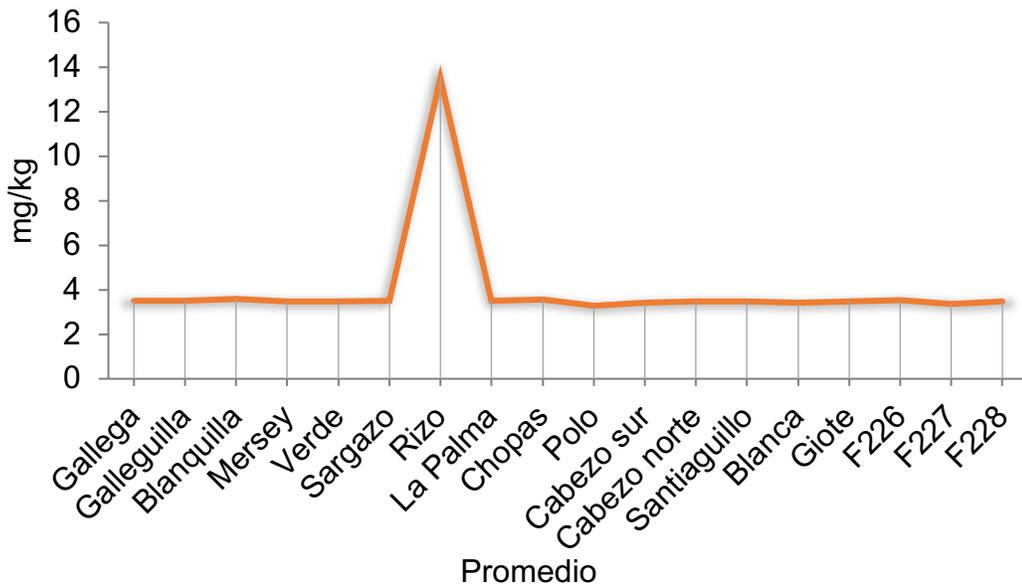


Figura 6 Concentración promedio de Cadmio total en los arrecifes del PNSAV.

Tabla 4 Concentración de Cd totales (mg/kg) por sitio de muestreo

Arrecife	Zona		Cd (mg/kg)
Gallega	Norte	Promedio±DE	3.51±0.11
		Rango	3.38-3.58
Galleguilla	Norte	Promedio±DE	3.51±0.05
		Rango	3.46-3.56
Blanquilla	Norte	Promedio±DE	3.58±0.21
		Rango	3.35-3.75
Mersey	Norte	Promedio±DE	3.47±0.12
		Rango	3.35-3.58
Verde	Norte	Promedio±DE	3.46±0.06
		Rango	3.39-3.51
Sargazo	Sur	Promedio±DE	3.51±0.15
		Rango	3.39-3.67
Rizo	Sur	Promedio±DE	13.51±17.16
		Rango	3.5-33.33
La Palma	Sur	Promedio±DE	3.49±0.17
		Rango	3.34-3.67
Chopas	Sur	Promedio±DE	3.55±0.21
		Rango	3.31-3.7
Polo	Sur	Promedio±DE	3.28±0.41
		Rango	2.9-3.72
Cabezo Sur	Sur	Promedio±DE	3.43±0.23
		Rango	3.17-3.57
Cabezo Norte	Sur	Promedio±DE	3.46±0.21
		Rango	3.22-3.61
Sargazo	Sur	Promedio±DE	3.47±0.28
		Rango	3.17-3.72
Blanca	Sur	Promedio±DE	3.41±0.29
		Rango	3.08-3.64
Giote	Sur	Promedio±DE	3.48±0.34
		Rango	3.09-3.72
F226	Fondeadero	Promedio±DE	3.54±0.44
		Rango	3.03-3.83
F227	Fondeadero	Promedio±DE	3.36±0.40
		Rango	2.9-3.63
F228	Fondeadero	Promedio±DE	3.47±0.38
		Rango	3.04-3.75

7.3.1.1. Índices de Calidad de sedimentos

Se incluyeron los criterios de calidad de acuerdo a la Guía de calidad de sedimentos desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) (*Long et al., 1995*) para efectos comparativos la cual define las concentraciones de metales y metaloides que tienen efectos adversos en los organismos marinos. Dentro de este marco de referencia, el nivel de Efecto de rango bajo (ERL) corresponde a concentraciones por debajo de las cuales rara vez se producen efectos adversos y el nivel de Efecto de rango medio (ERM) el cual representa concentraciones por encima de las que con frecuencia se producen efectos adversos.

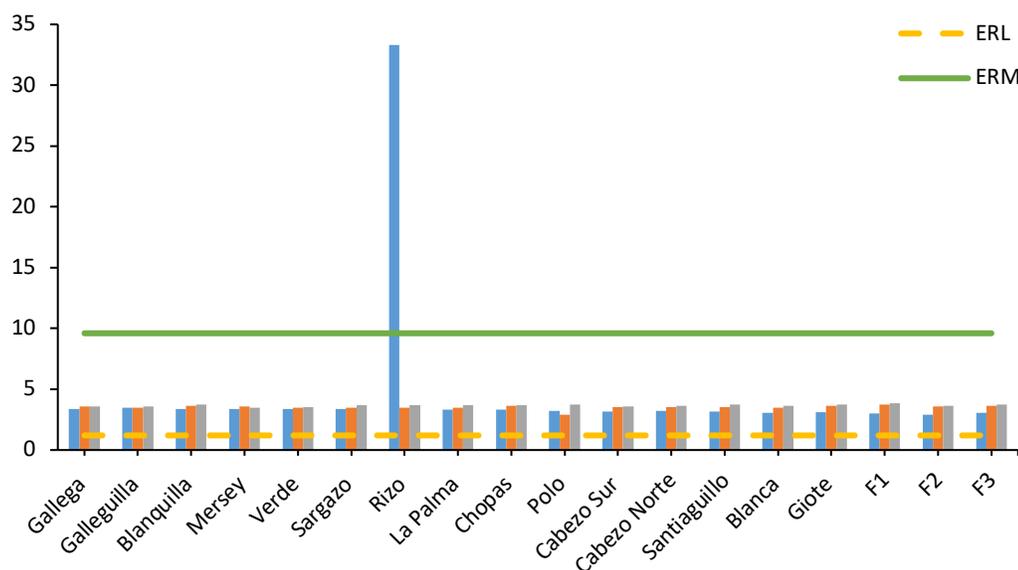


Figura 7 Criterios de calidad de concentración de Cadmio (Cd) en sedimentos del PNSAV.

Los valores de las concentraciones de Cd estudiado en los arrecifes del PNSAV, sobrepasan los valores de ERL. El arrecife Rizo supera los valores de ERM para la temporada de secas (Figura 8).

7.3.1.2. Concentración y distribución espacial de Cd total por época del año

Las concentraciones de Cd en las tres temporadas muestreadas no presentaron diferencias significativas ($p= 0.582$). La máxima concentración de Cd, se obtuvo durante la temporada de Secas (4.904 ± 7.096) mg/kg seguida con lluvias (3.657 ± 0.091) mg/kg y finalmente nortes (3.520 ± 0.173) mg/kg con la concentración más baja. (Figura 9).

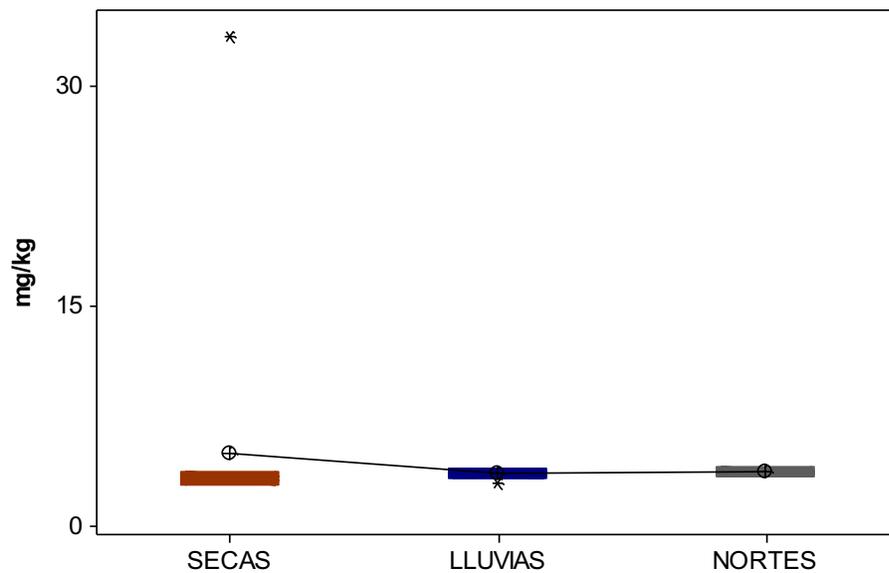


Figura 8 Concentración de Cadmio total en las temporadas climáticas (Nortes, Secas y Lluvias).

7.3.1.3. Correlación de Pearson

El grado de correlación (correlación lineal de Pearson) entre los metales pesados y otros parámetros importantes es, con frecuencia, utilizado para indicar el origen de dichos elementos y el nivel de asociación existentes entre ellos (Windom *et al.*, 1989). En el estudio de la matriz de correlación se consideró el contenido de los metales con las demás variables geoquímicas analizadas (gravas, arenas, limos y arcillas).

Se observó que existe una relación moderada entre el tipo de grano denominado limos con las concentraciones totales de cadmio teniendo mayor relación en la temporada de Lluvias, y para el tipo de grano denominado arcilla existe una relación baja. Finalmente, para los tipos de grano; Gravas y arenas existe una relación negativa en cuanto a las concentraciones de cadmio totales (Tabla 5) (Figuras 10, 11 y 12).

Tabla 5 Correlación de Pearson entre el tipo de grano y las concentraciones totales de Cadmio en el PNSAV.

	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
Secas	R ² = 0.006	R ² = -0.317	R ² = 0.346	R ² = 0.181
	P = 0.981	P = 0.200	P = 0.159	P = 0.472
Lluvias	R ² = -0.132	R ² = -0.329	R ² = 0.422	R ² = 0.090
	P = 0.602	P = 0.182	P = 0.081	P = 0.723
Nortes	R ² = 0.097	R ² = -0.277	R ² = 0.270	R ² = 0.184
	P = 0.701	P = 0.267	P = 0.278	P = 0.465

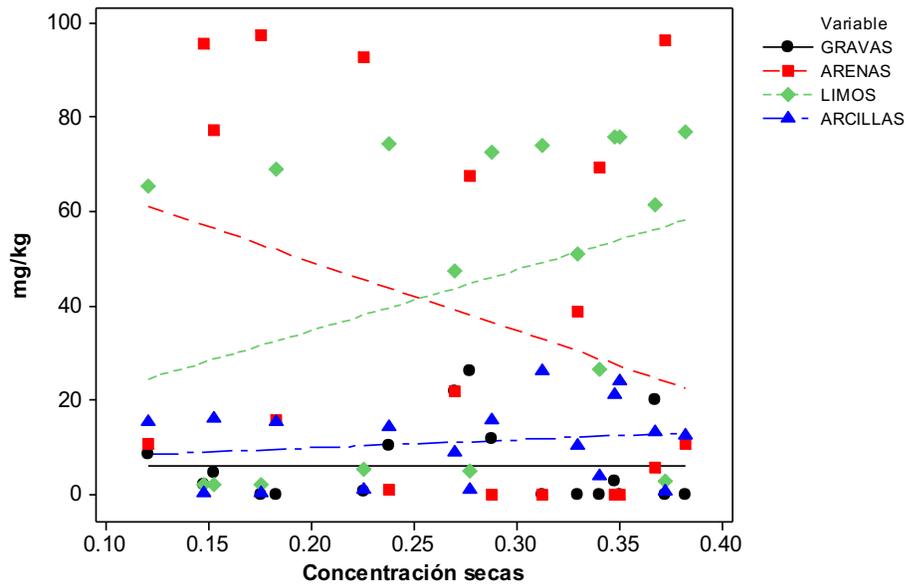


Figura 9. Correlación entre concentraciones totales de cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de secas.

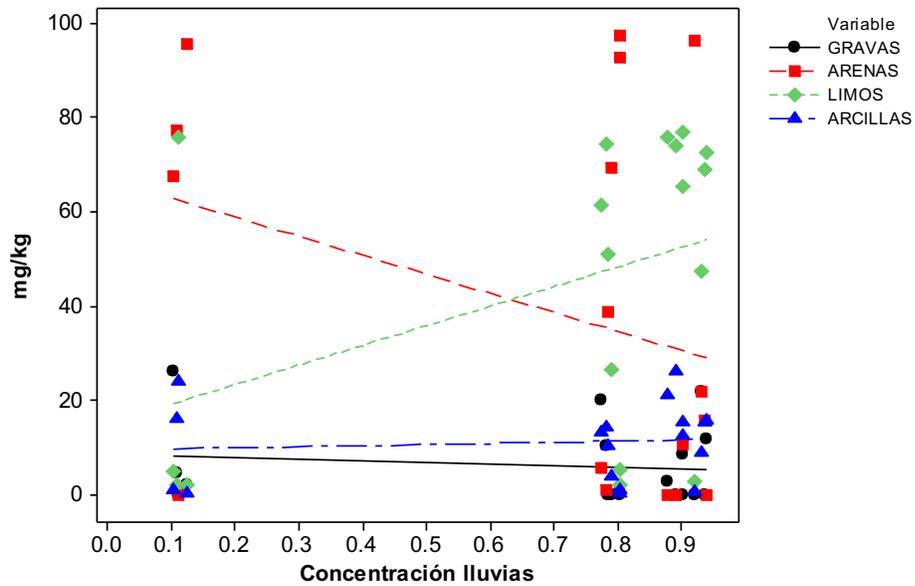


Figura 10 Correlación entre concentraciones totales de cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de llluvias.

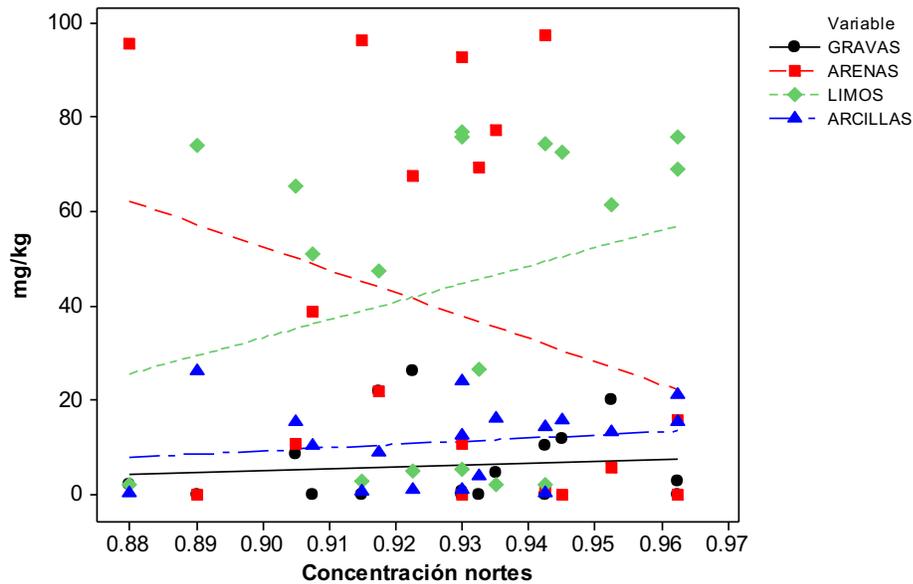


Figura 11. Correlación entre concentraciones totales de cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas).

La distribución de Cd en las tres temporadas muestreadas se presentó de la siguiente manera; la máxima concentración de Cd, se obtuvo durante la temporada de secas en el arrecife Rizo (33.33 mg/kg) seguido del arrecife Verde (3.39 mg/kg) y el arrecife Sargazo (3.39 mg/kg), seguida de la temporada de nortes donde la mayor concentración la obtuvieron el arrecife Blanquilla y la zona de Fondeadero 228 (3.57 mg/kg), por último la temporada de lluvias presentó la concentración más baja de todas las observadas en este estudio. Estas concentraciones se han representado en mapas de distribución para cada uno de los muestreos (Figura 13, 14 y 15).

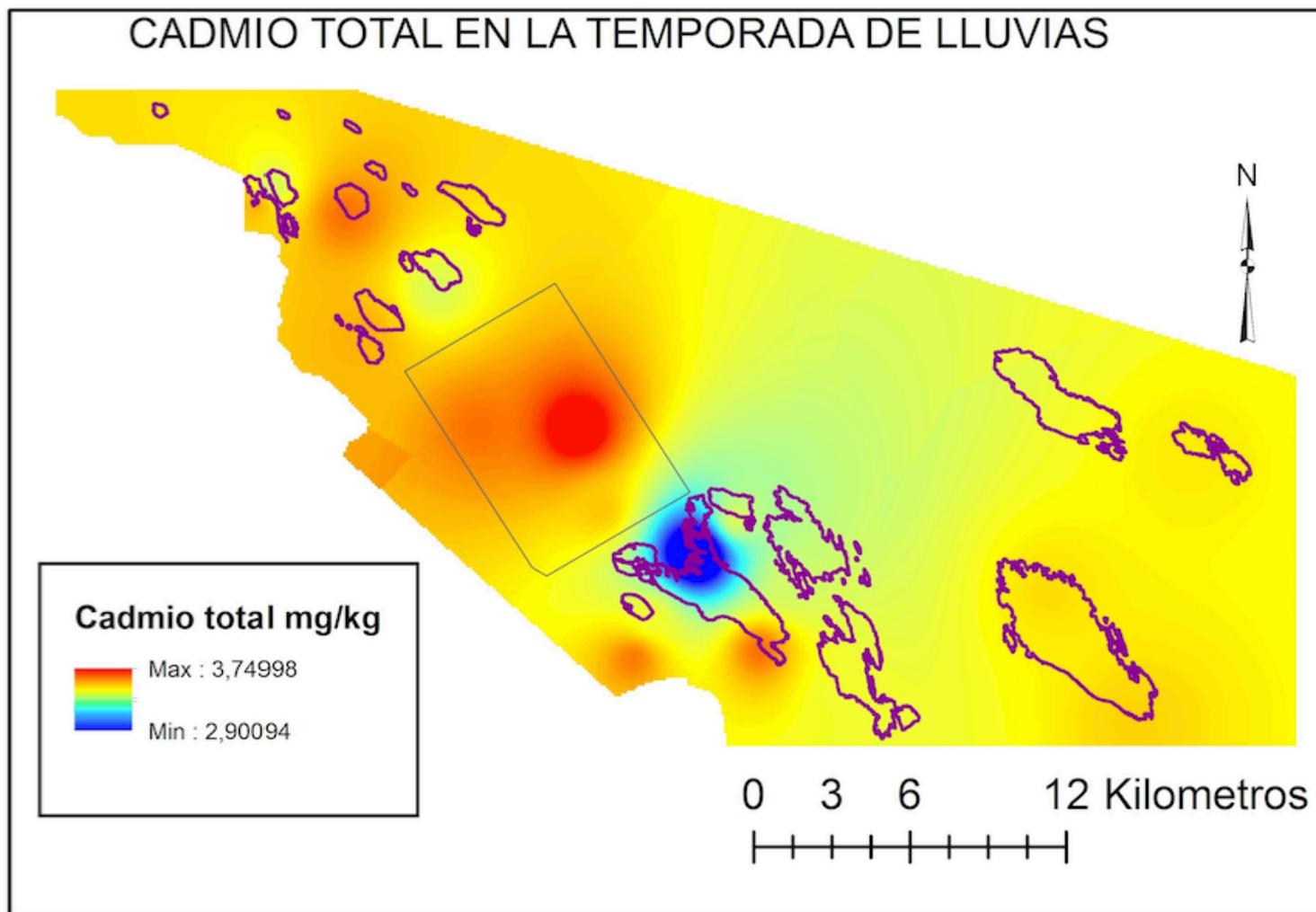


Figura 12 Distribución espacial de Cd total en temporada de Lluvias.

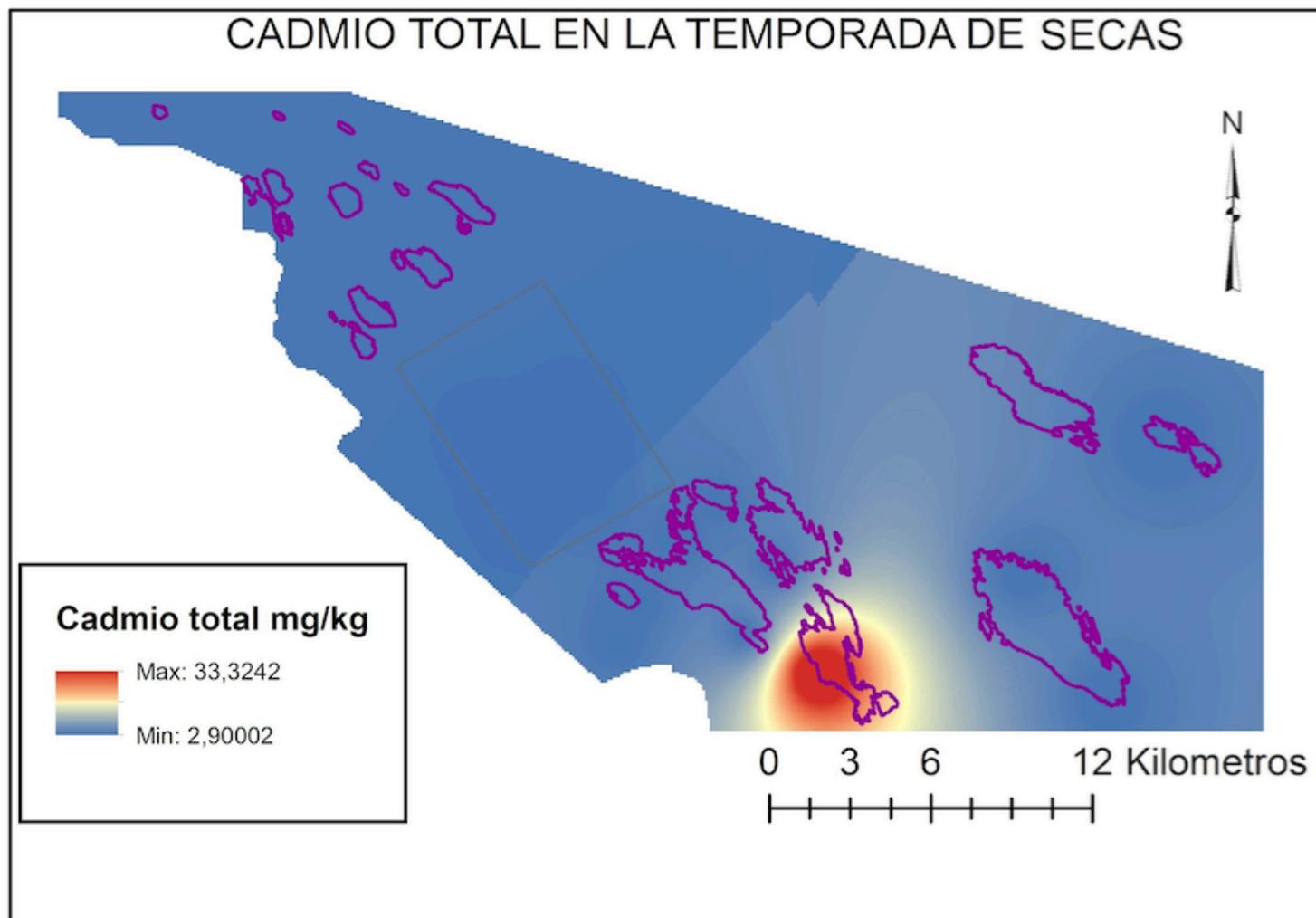


Figura 13 Distribución espacial de Cd total en temporada de Secas.

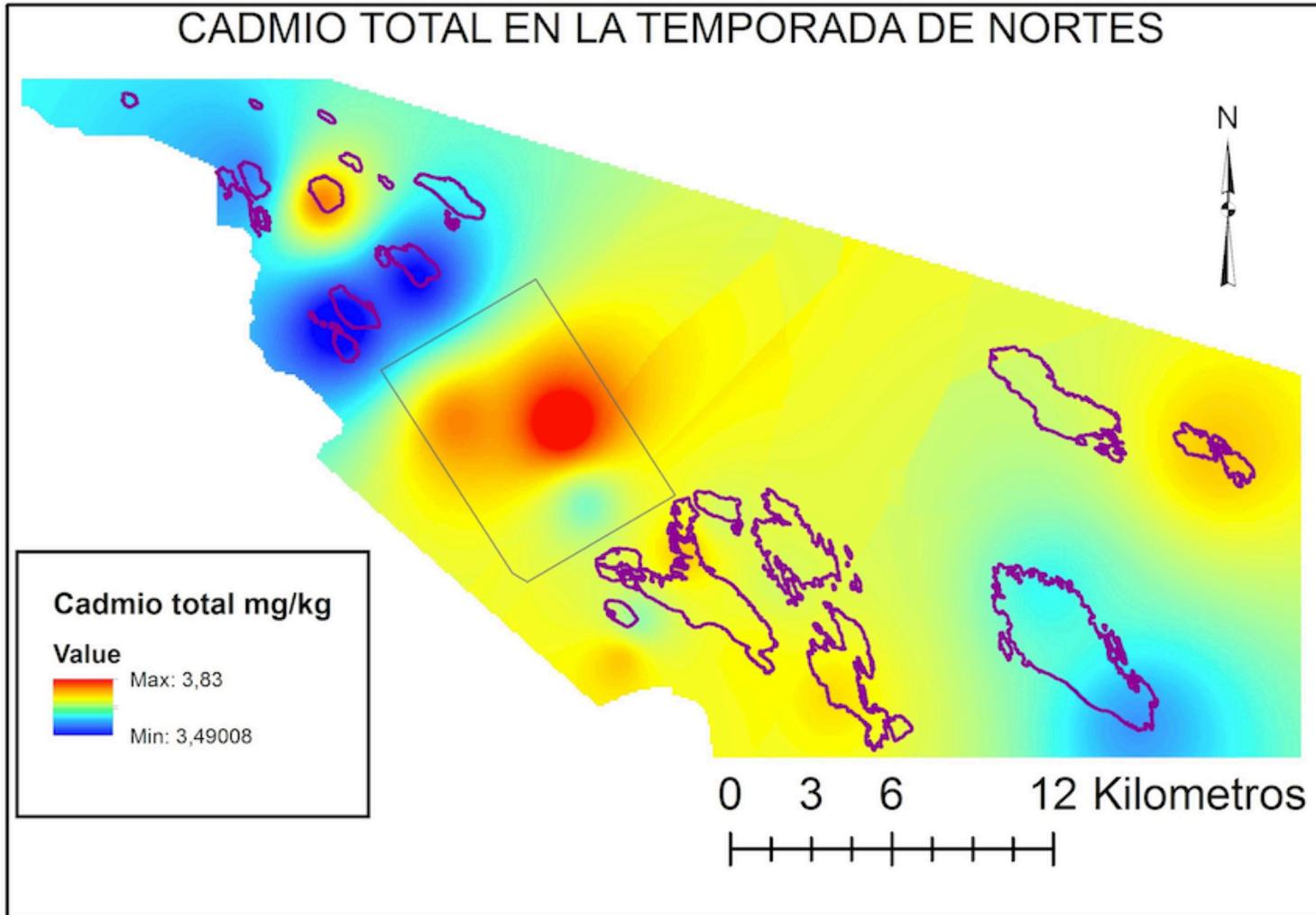


Figura 14 Distribución espacial de Cd total en temporada de Nortes.

7.3.2. Concentración de Cadmio biodisponible

La fracción biodisponible de Cd en sedimentos del PNSAV se obtuvieron mediante extracción débil. En esta fracción se encuentran aquellos metales absorbidos por intercambio catiónico, por adsorción específica, precipitados como carbonatos y aquellos que están formando complejos solubles con la materia orgánica. Siendo esa fracción más susceptible a redisolución por cambios en las variables fisicoquímicas.

De los arrecifes estudiados, se obtuvo una concentración promedio para biodisponibilidad de Cadmio observando en el Gallega una mayor concentración promedio de biodisponibilidad en el arrecife Gallega con un valor de 0.7383 ± 0.3085 mg/kg, seguido del arrecife Galleguilla con 0.7358 ± 0.3147 mg/kg y el arrecife Verde con 0.7292 ± 0.3333 mg/kg (Tabla 6) (Figura 16).

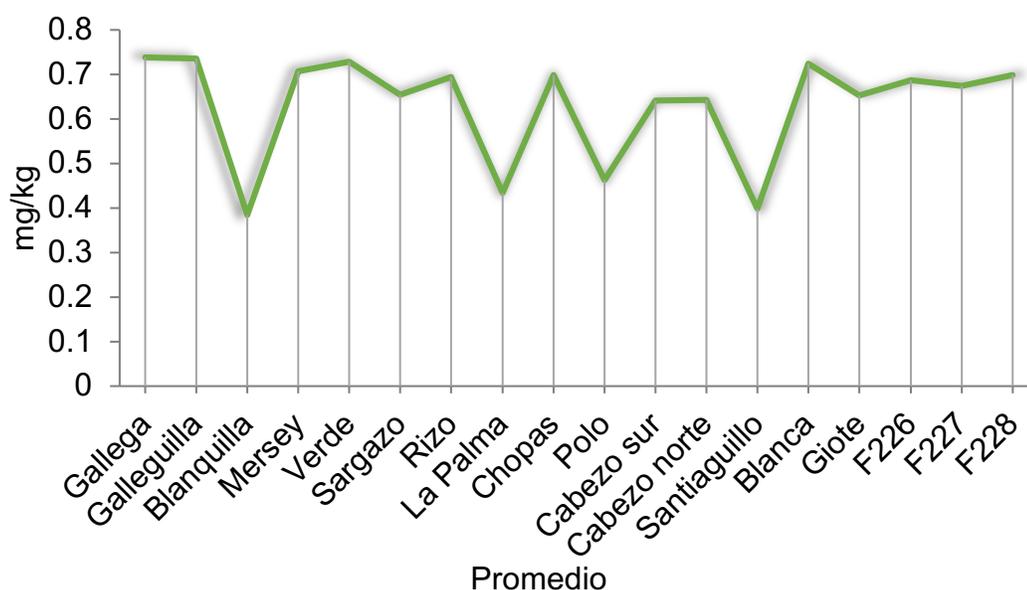


Figura 15 Concentración promedio de Cd biodisponible en los arrecifes del PNSAV.

Tabla 6. Concentración promedio biodisponible de Cd en sedimento del PNSAV.

Arrecife	Zona		Cd (mg/kg)
Gallega	Norte	Promedio±DE	0.7383±0.3085
		Rango	0.3825-0.93
Galleguilla	Norte	Promedio±DE	0.7358±0.3147
		Rango	0.3725-0.92
Blanquilla	Norte	Promedio±DE	0.3842±0.4296
		Rango	0.125-0.88
Mersey	Norte	Promedio±DE	0.7067±0.3782
		Rango	0.27-0.9325
Verde	Norte	Promedio±DE	0.7292±0.3333
		Rango	0.3475-0.9625
Sargazo	Sur	Promedio±DE	0.6542±0.3696
		Rango	0.2375-0.9425
Rizo.	Sur	Promedio±DE	0.6942±0.4433
		Rango	0.1825-0.9625
La palma	Sur	Promedio±DE	0.4342±0.4319
		Rango	0.1025-0.9225
Chopas	Sur	Promedio±DE	0.6983±0.2999
		Rango	0.3675-0.9525
Polo	Sur	Promedio±DE	0.4633±0.4216
		Rango	0.11-0.93
Cabezo Sur	Sur	Promedio±DE	0.6408±0.4092
		Rango	0.175-0.9425
Cabezo Norte	Sur	Promedio±DE	0.6425±0.4525
		Rango	0.12-0.905
Santiaguillo	Sur	Promedio±DE	0.3983±0.4653
		Rango	0.1075-0.935
Blanca	Sur	Promedio±DE	0.7242±0.3782
		Rango	0.2875-0.945
Giote	Sur	Promedio±DE	0.6525±0.3757
		Rango	0.225-0.93
F226	Fondeadero	Promedio±DE	0.6875±0.3093
		Rango	0.34-0.9325
F227	Fondeadero	Promedio±DE	0.6742±0.3043
		Rango	0.33-0.9075
F228	Fondeadero	Promedio±DE	0.6983±0.3341
		Rango	0.3125-0.8925

7.3.2.1. Índices de calidad

Se incluyeron los criterios de calidad de acuerdo a la Guía de calidad de sedimentos desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) (Long *et al.*, 1995) para efectos comparativos la cual define las concentraciones de metales y metaloides que tienen efectos adversos en los organismos marinos. Dentro de este marco de referencia, el nivel de Efecto de rango bajo (ERL) corresponde a concentraciones por debajo de las cuales rara vez se producen efectos adversos y el nivel de Efecto de rango medio (ERM) el cual representa concentraciones por encima de las que con frecuencia se producen efectos adversos.

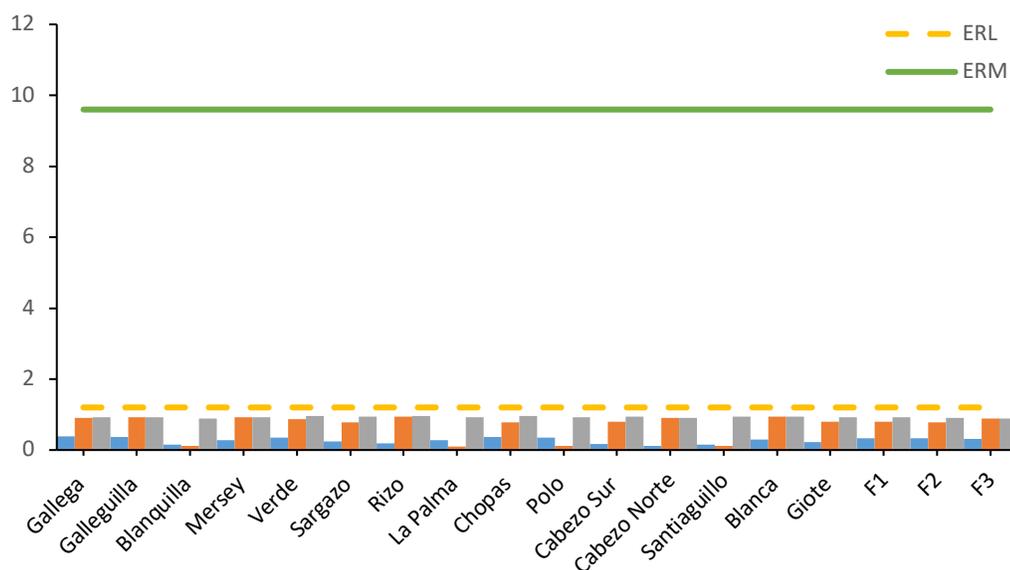


Figura 16 Criterios de calidad de concentración de Cd biodisponible en el PNSAV.

Ninguno de los valores de las concentraciones de Cd estudiado en los arrecifes del PNSAV, sobrepasaron los valores de ERL y ERM. (Figura 17).

7.3.2.2. Concentración y distribución espacial de Cd biodisponible por época del año

Las concentraciones de Cd biodisponible en las tres temporadas muestreadas presentaron diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($p= 0.05$). Para concentraciones biodisponibles de cadmio se obtuvo en orden decreciente por periodo de muestreo: nortes (0.9279 ± 0.0227) > lluvias (0.6939 ± 0.3256) > Secas (0.2710 ± 0.0864). (Figura 18).

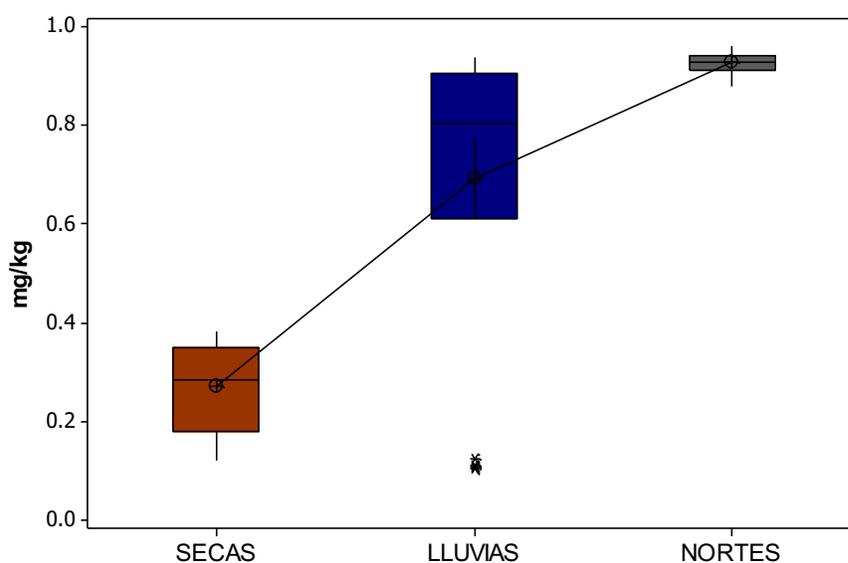


Figura 17. Concentración de Cadmio biodisponible en las tres temporadas climáticas (Nortes, Secas y Lluvias).

La correlación de Pearson para tamaño de grano y concentraciones biodisponibles de cadmio mostró que; que existe una relación moderada entre el tipo de grano denominado limos con las concentraciones de cadmio teniendo mayor relación en la temporada de Lluvias al igual que la concentración total, asimismo el tipo de grano denominado arcilla tiene una relación baja con las concentraciones de Cd biodisponible. Finalmente, para los tipos de grano; gravas y arenas existe una relación negativa en cuanto a las concentraciones de cadmio biodisponibles, esto debido a que a medida que una variable aumenta, la otra disminuye (Tabla 7) (Figuras 19, 20 y 21).

Tabla 7 Correlación de Pearson entre concentración de Cadmio biodisponible y fracción de grano.

	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
Secas	R ² = 0.006	R ² = -0.317	R ² = 0.346	R ² = 0.181
	P = 0.981	P = 0.200	P = 0.159	P = 0.472
Lluvias	R ² = -0.132	R ² = -0.329	R ² = 0.422	R ² = 0.090
	P = 0.602	P = 0.182	P = 0.081	P = 0.723
Nortes	R ² = 0.097	R ² = -0.277	R ² = 0.270	R ² = 0.184
	P = 0.701	P = 0.267	P = 0.278	P = 0.465

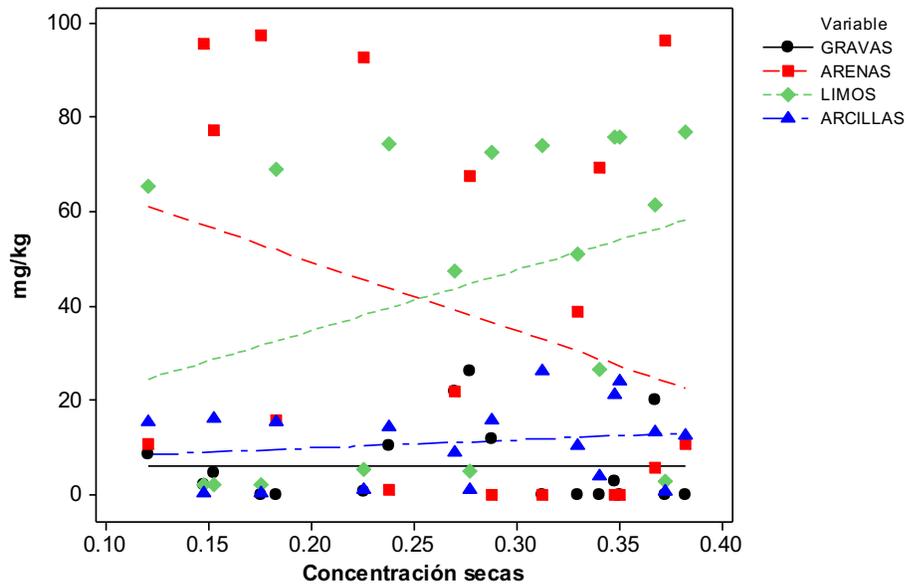


Figura 18 Correlación entre concentración biodisponible de Cadmio y fracciones de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Secas.

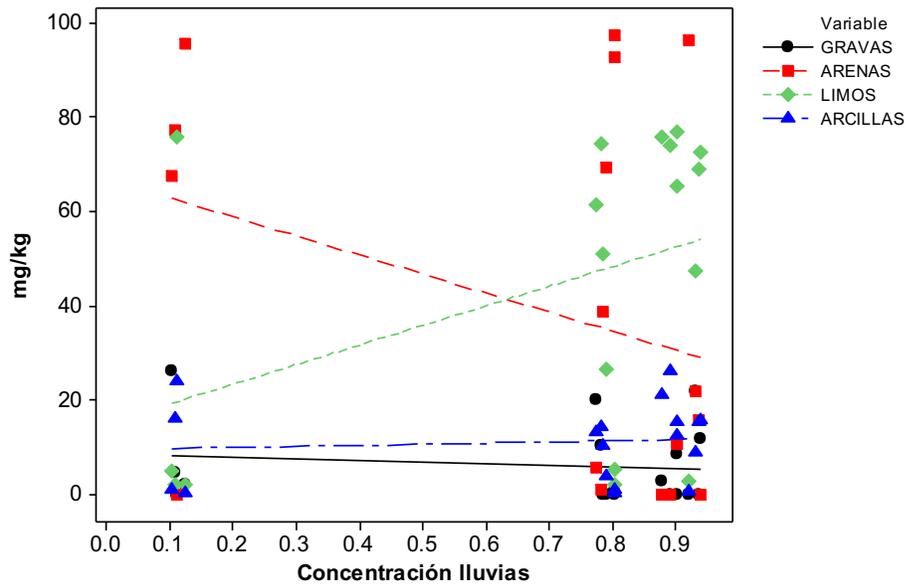


Figura 19 Correlación entre concentración biodisponible de Cadmio y fracción de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Lluvias).

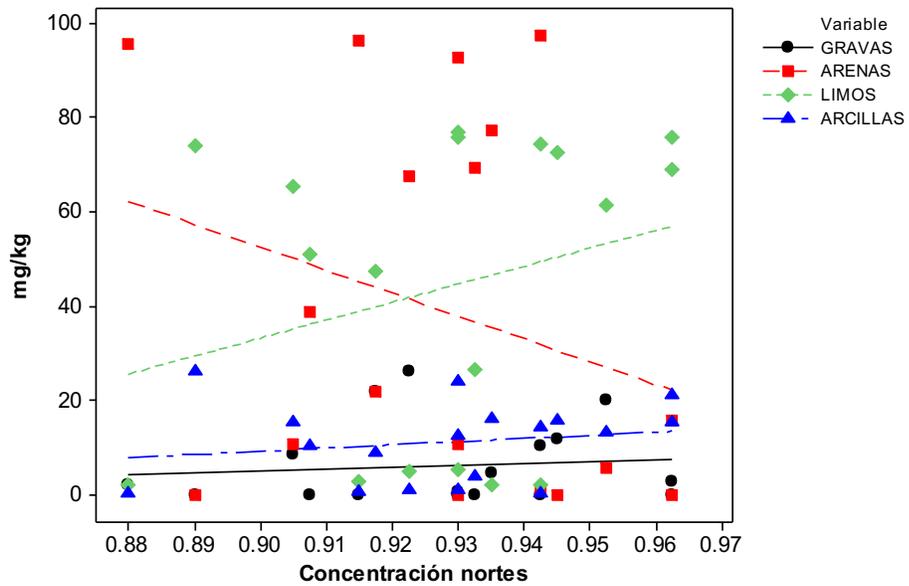


Figura 20 Correlación entre concentración biodisponible de Cadmio y fracción de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Nortes.

Se realizaron mapas de distribución de las concentraciones biodisponibles de Cadmio dentro del PNSAV para observar la distribución de esta fracción en los arrecifes. En los mapas se observa presencia de concentración biodisponible en todos los arrecifes costeros en la temporada de lluvias, esto posiblemente debido al acarreamiento de sedimento proveniente de los ríos y que traen consigo una gran variedad de elementos químicos (Figura 22). A su vez, en la temporada de secas, solo los arrecifes; Gallega, Galleguilla y Polo presentan concentraciones altas de biodisponibilidad en esta temporada (Figura 23). La temporada de nortes presentó las concentraciones más altas de la fracción biodisponible. La temporada de Nortes obtuvo las concentraciones más altas de biodisponibilidad de Cadmio presentándose la concentración más elevada en el arrecife Rizo (Figura 24).

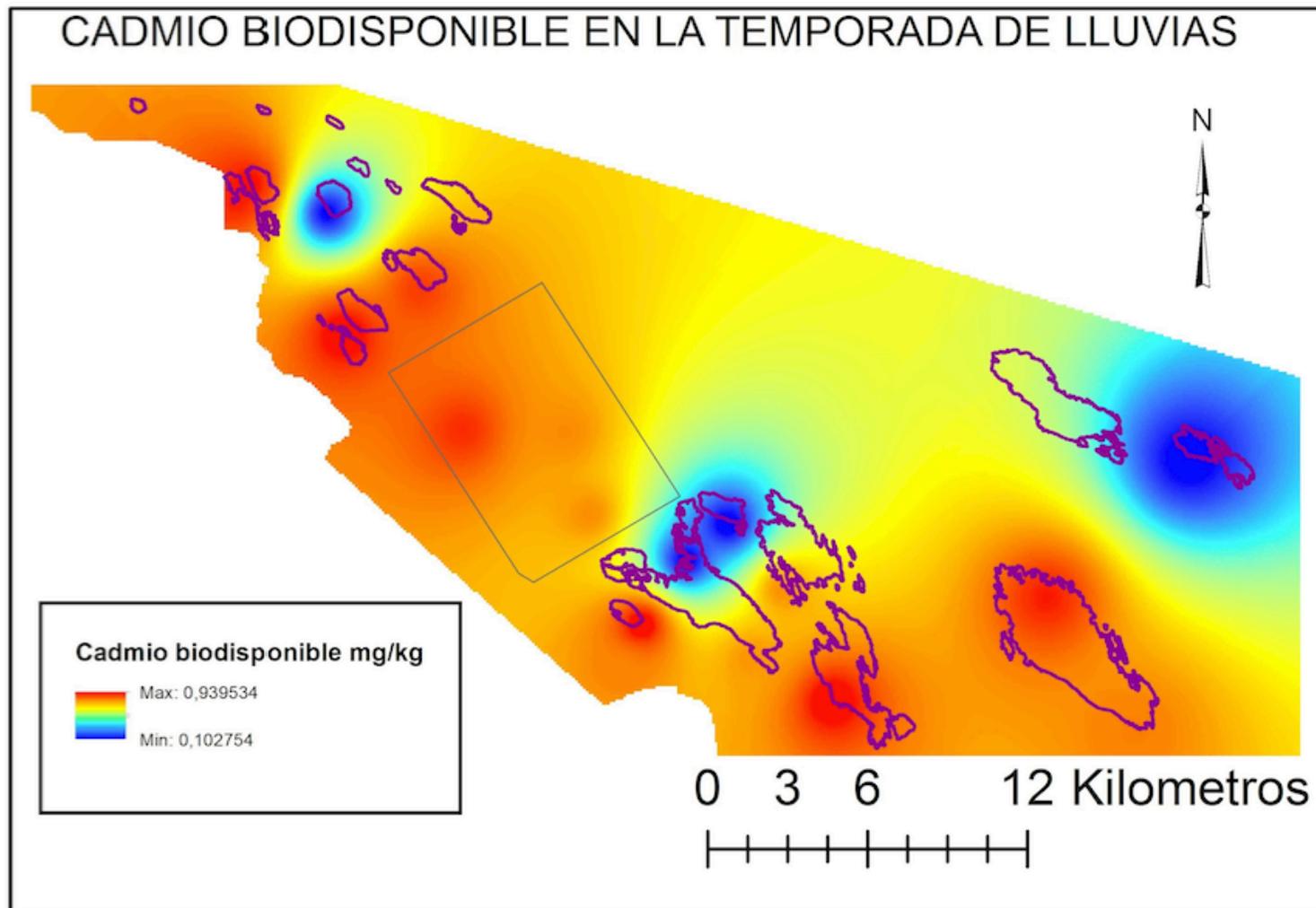


Figura 21 Distribución de Cadmio biodisponible en los arrecifes del PNSAV en temporada de Lluvias.

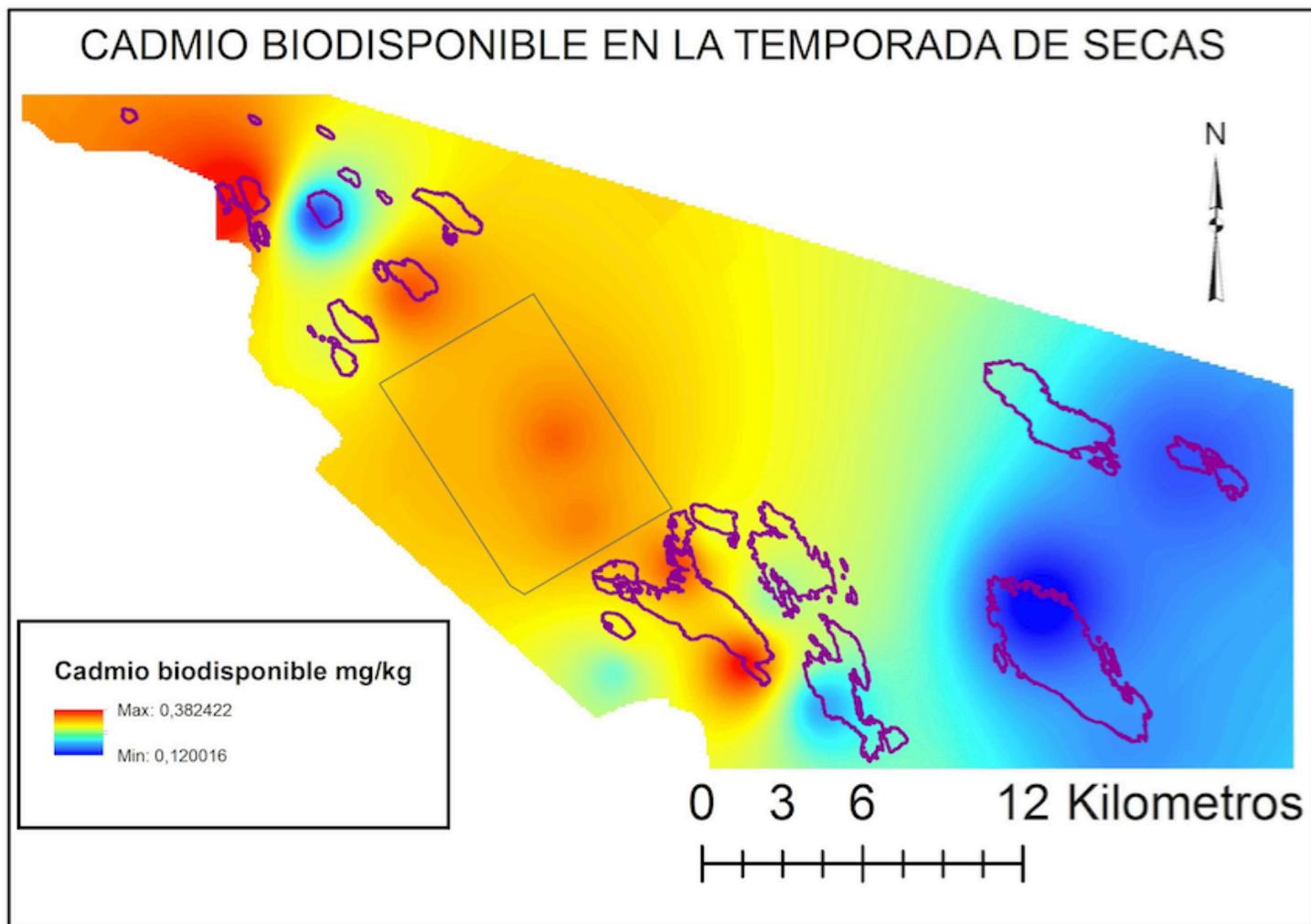


Figura 22 Distribución de Cadmio biodisponible en los arrecifes del PNSAV en temporada de Secas.

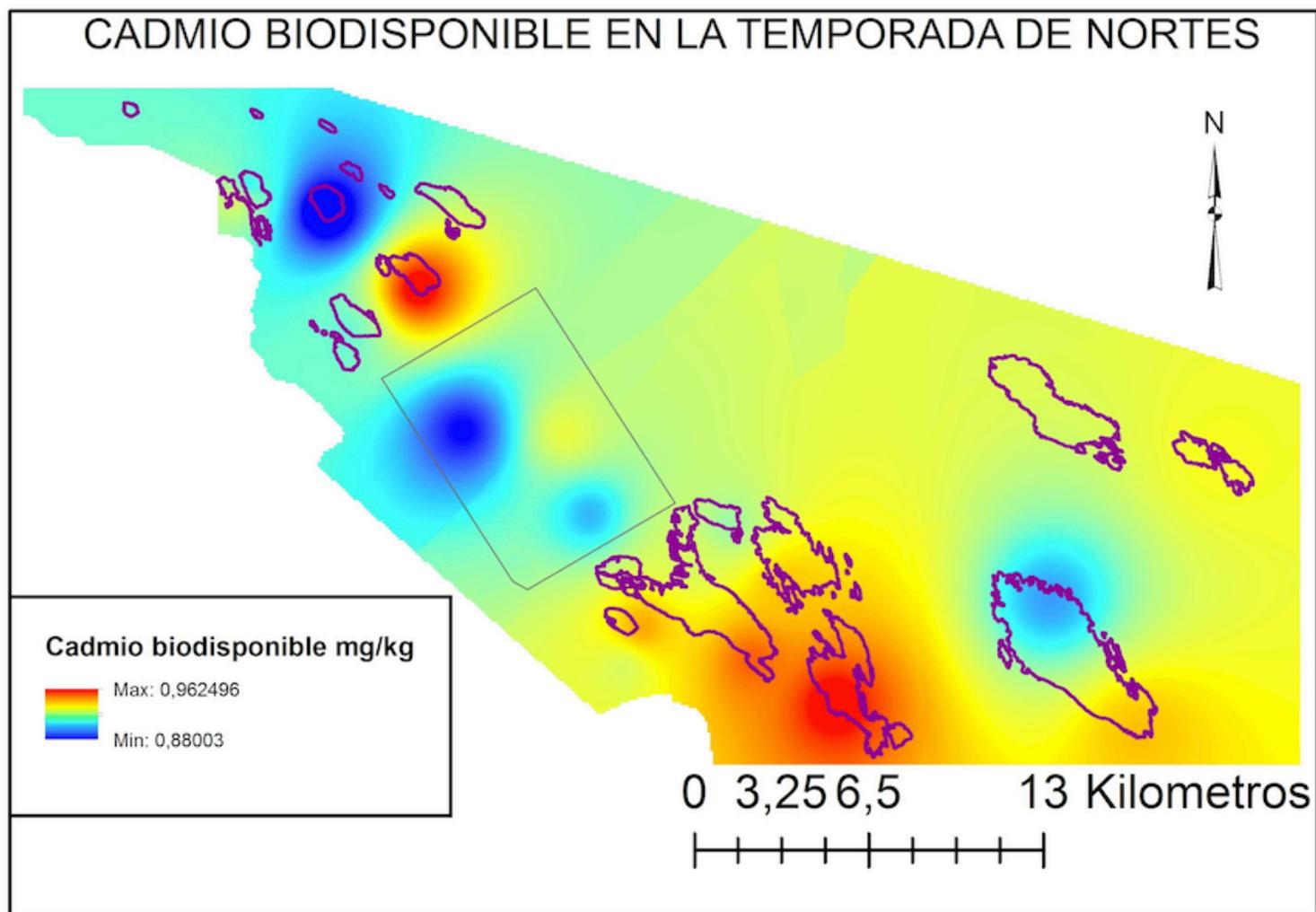


Figura 23 Distribución de Cd biodisponible en temporada de Nortes.

7.3.3. Concentración de total de Plomo

El Pb fue el metal con la mayor concentración en los sitios muestreados en comparación con el metal Cd. El arrecife La Palma fue el sitio con la máxima concentración de Pb con 7.22 ± 3.34 mg/kg, seguido por Fondeadero 226 con 7.06 ± 3.93 mg/kg y el arrecife Polo con 6.92 ± 4.95 mg/kg (Tabla 8) (Figura 25).

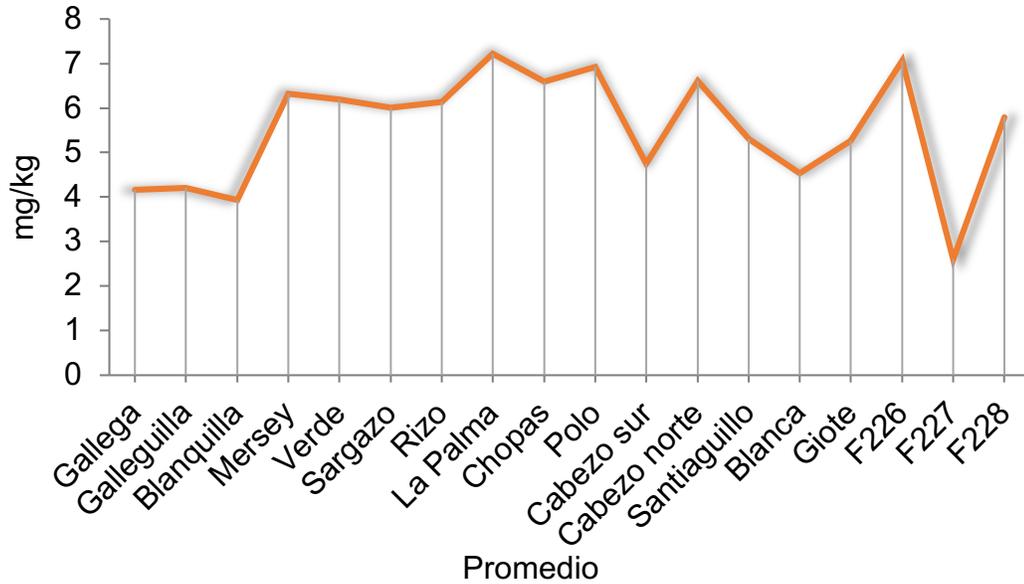


Figura 24 Concentración promedio de Plomo total en los arrecifes del PNSAV.

Tabla 8 Concentración promedio de Plomo total en los arrecifes del PNSAV

	Zona		Pb (mg/kg)
Gallega	Norte	Promedio±DE	4.17±3.84
		Rango	1.19-8.51
Galleguilla	Norte	Promedio±DE	4.21±3.6
		Rango	1.8-8.34
Blanquilla	Norte	Promedio±DE	3.93±3.25
		Rango	0.38-6.77
Mersey	Norte	Promedio±DE	6.32±3.08
		Rango	2.85-8.73
Verde	Norte	Promedio±DE	6.19±1.39
		Rango	4.87-7.64
Sargazo	Sur	Promedio±DE	6.01±2.03
		Rango	4.42-8.3
Rizo	Sur	Promedio±DE	6.13±2.69
		Rango	3.46-8.84
La palma	Sur	Promedio±DE	7.22±3.34
		Rango	3.39-9.49
Chopas	Sur	Promedio±DE	6.6±4.54
		Rango	1.45-10.0
Polo	Sur	Promedio±DE	6.92±4.95
		Rango	1.21-9.86
Cabezo Sur	Sur	Promedio±DE	4.75±3.65
		Rango	0.63-7.58
Cabezo Norte	Sur	Promedio±DE	6.61±3.03
		Rango	3.24-9.12
Santiaguillo	Sur	Promedio±DE	5.31±1.45
		Rango	3.65-6.32
Blanca	Sur	Promedio±DE	4.54±2.63
		Rango	1.56-6.51
Giote	Sur	Promedio±DE	5.26±4.38
		Rango	0.26-8.43
F226	Fondeadero	Promedio±DE	7.06±3.93
		Rango	2.55-9.78
F227	Fondeadero	Promedio±DE	2.6±3.8
		Rango	0.0-6.96
F228	Fondeadero	Promedio±DE	5.79±5.51
		Rango	0.84-11.72

Las concentraciones de Pb totales en los arrecifes del PNSAV, no rebasaron los niveles de Efecto de rango bajo (ERL) y Efecto de rango medio (ERM) (Figura 26).

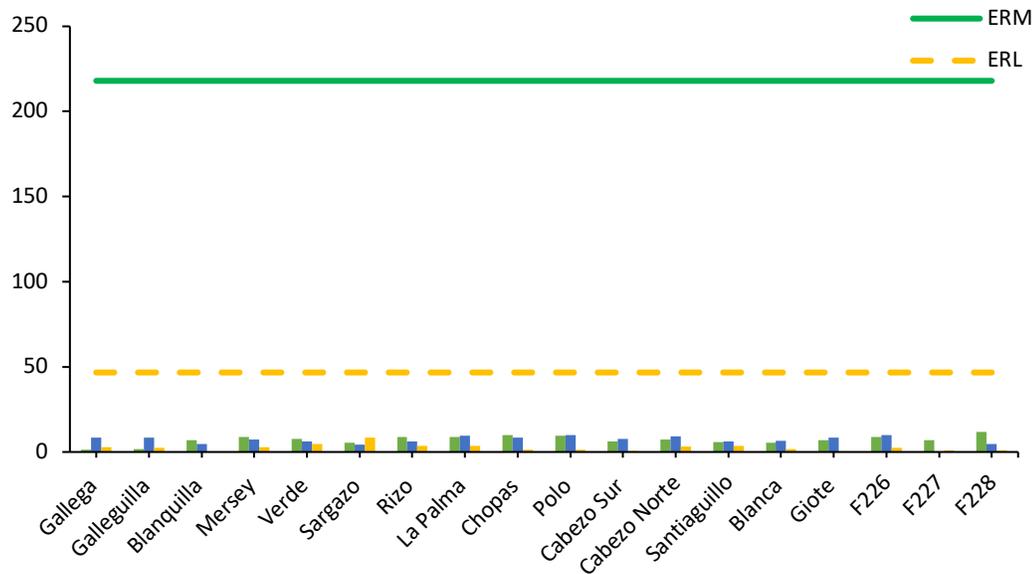


Figura 25 Índice de calidad de sedimentos para el metal Pb en los arrecifes del PNSAV.

7.3.3.1. Concentración y distribución espacial de Pb total por época del año

Las concentraciones de Pb total en las tres temporadas muestreadas no presentaron diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($p= 0.05$). Se muestran las concentraciones en orden decreciente en los periodos de muestreo: Secas (7.135 ± 2.653) > Lluvias (6.984 ± 2.467) > Nortes (2.448 ± 1.959). Siendo la temporada de secas la que presenta la mayor concentración de Pb (Figura 27).

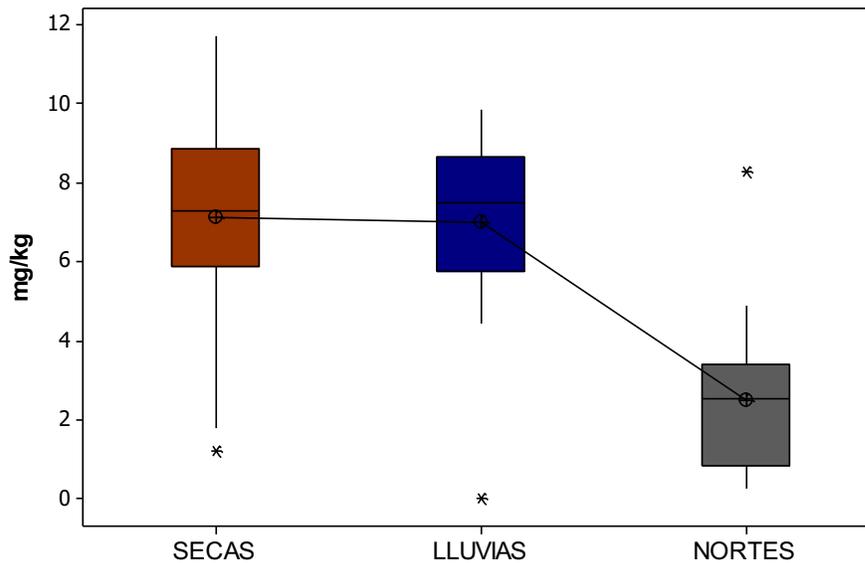


Figura 26 Concentración de total de Pb en las tres temporadas climáticas (Nortes, Secas y Lluvias).

La correlación de Pearson para tamaño de grano y concentraciones totales de plomo mostró que; existe una relación moderada entre el tipo de grano denominado arcillas con las concentraciones de plomo teniendo mayor relación en la temporada de Secas, así mismo, el tipo de grano denominado grava tiene una relación media con las concentraciones de plomo. El tipo de grano denominado limo presenta una relación media con la concentración de plomo teniendo una relación mayor en la temporada de nortes. Finalmente, para el tipo de grano; arenas existe una relación baja en cuanto a las concentraciones, este a diferencia los otros tipos de grano, se observa una mayor relación en la temporada de Lluvias (Tabla 5) (Figuras 28, 29 y 30).

Tabla 9 Correlación de Pearson entre tipo de grano y concentración total de Plomo.

	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
Secas	R ² = 0.247	R ² = -0.283	R ² = 0.193	R ² = 0.357
	P = 0.323	P = 0.255	P = 0.443	P = 0.146
Lluvias	R ² = 0.218	R ² = 0.107	R ² = -0.149	R ² = -0.167
	P = 0.386	P = 0.672	P = 0.556	P = 0.508
Nortes	R ² = 0.255	R ² = -0.349	R ² = 0.306	R ² = 0.229
	P = 0.307	P = 0.156	P = 0.216	P = 0.360

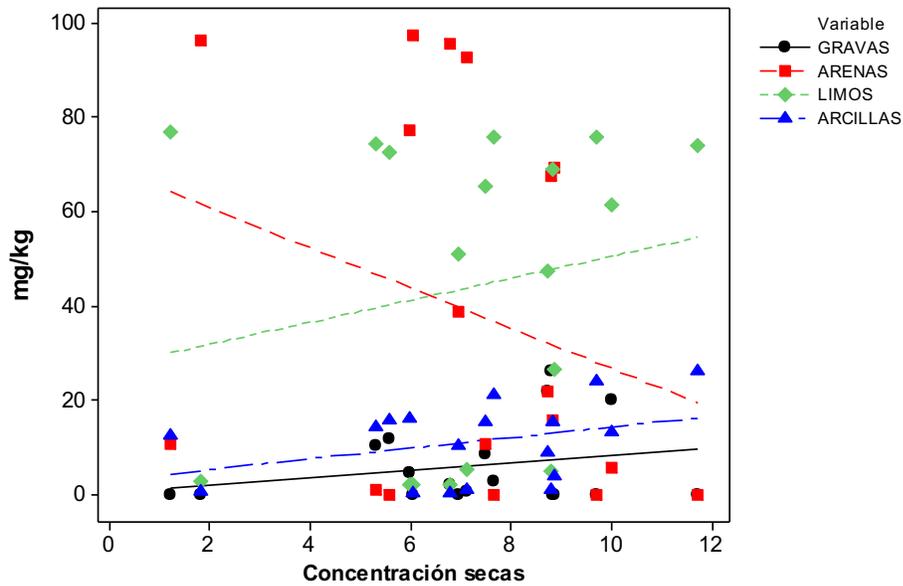


Figura 27 Correlación entre concentración total de Plomo y fracción de granos (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Secas.

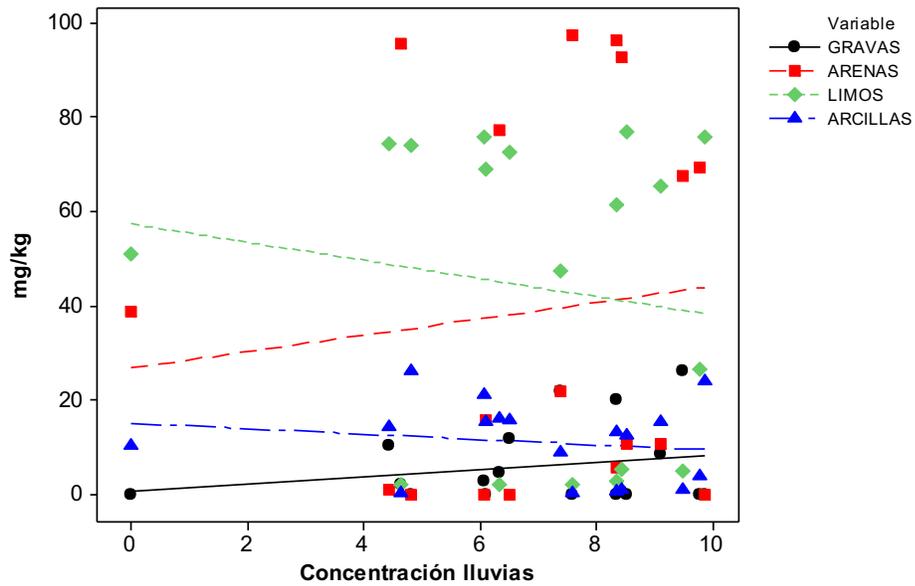


Figura 28 Correlación entre la concentración total de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Lluvias.

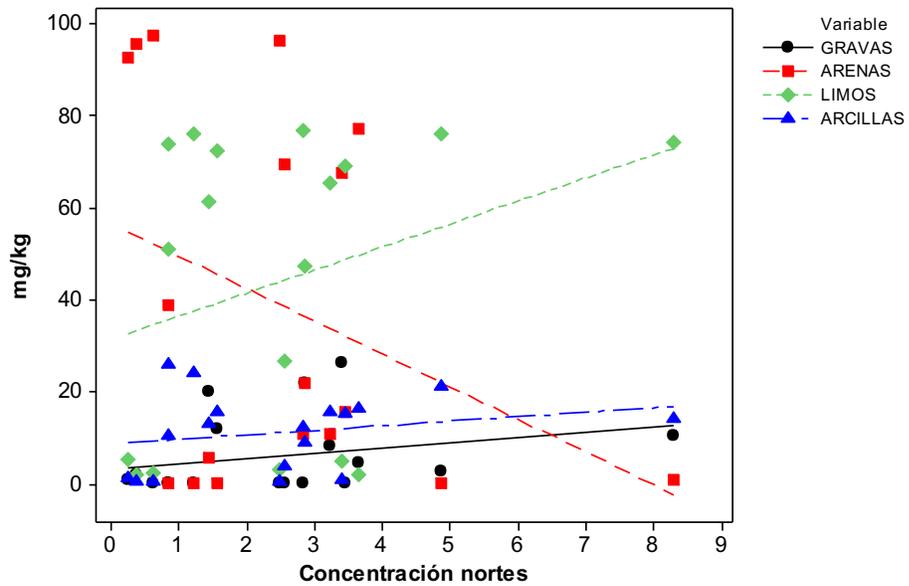


Figura 29 Correlación entre concentración total de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Nortes.

Los mapas de distribución de las concentraciones totales de Plomo dentro del PNSAV muestran una mayor presencia de plomo en la temporada de lluvias, teniendo la concentración más alta en el arrecife Polo, seguido de la zona de Fondeadero 226, esto posiblemente debido al acarreamiento de sedimento proveniente de los ríos y que traen consigo una alta variedad de elementos químicos (Figura 31). A su vez, en la temporada de Secas, las mayores concentraciones se presentaron en la zona de Fondeadero 226, el arrecife Rizo y el arrecife La Palma (Figura 32). A comparación de Cd, la temporada de nortes con base a las concentraciones totales de Pb presentó las concentraciones más bajas con un intervalo que va desde 0.84 y 8.3 mg/kg (Figura 33).

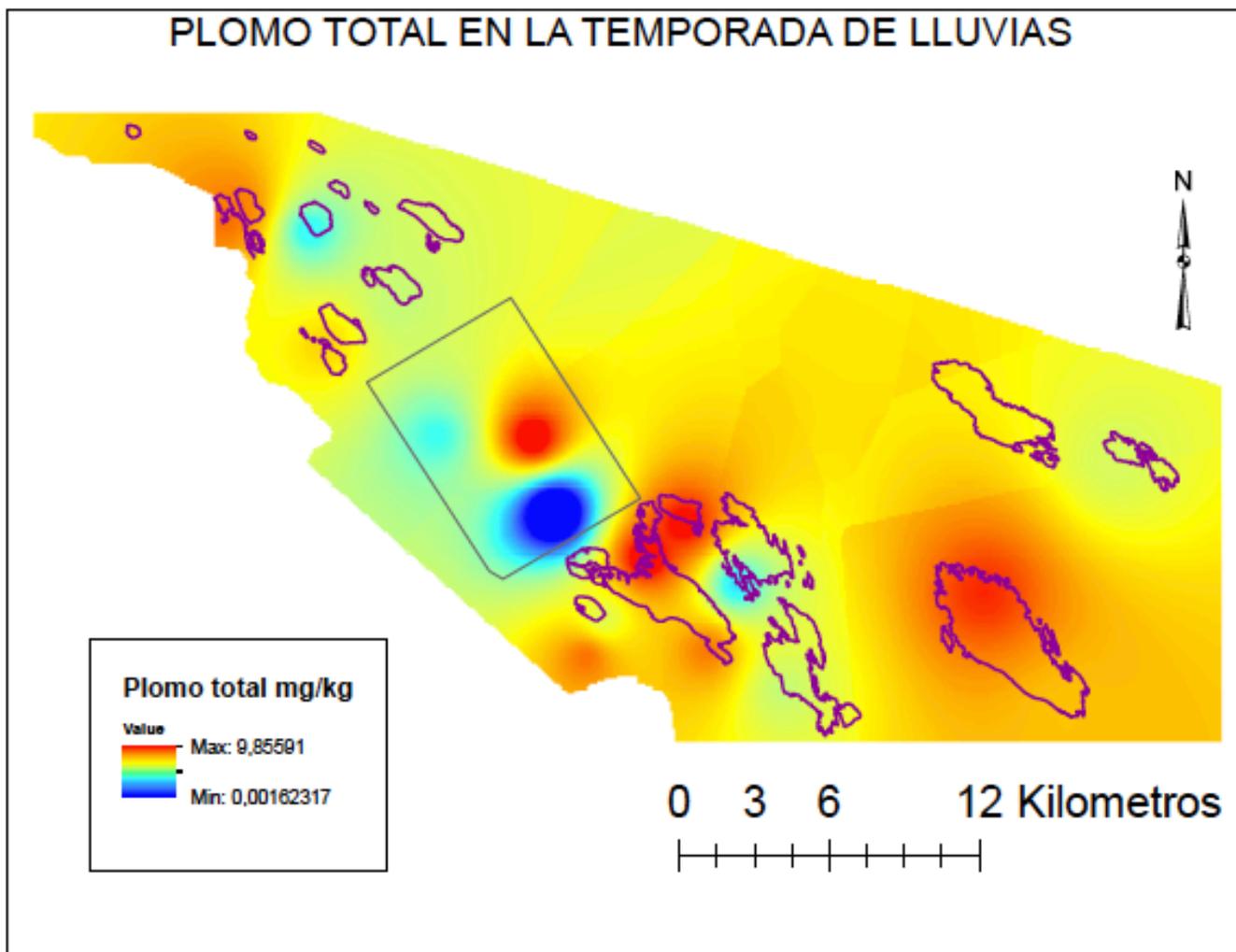


Figura 30 Distribución de Plomo total en temporada de Lluvias

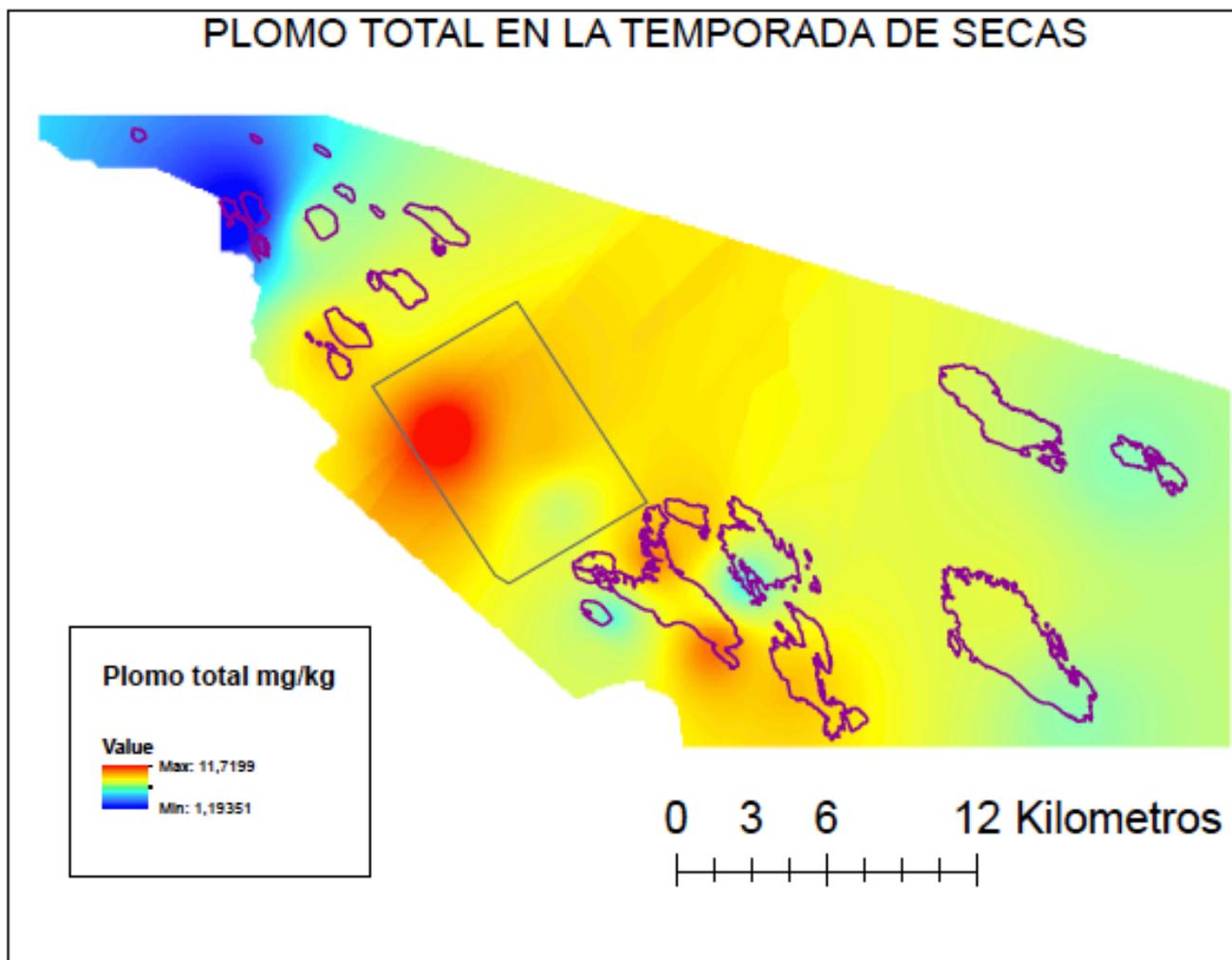


Figura 31 Distribución de Plomo total en temporada de Secas.

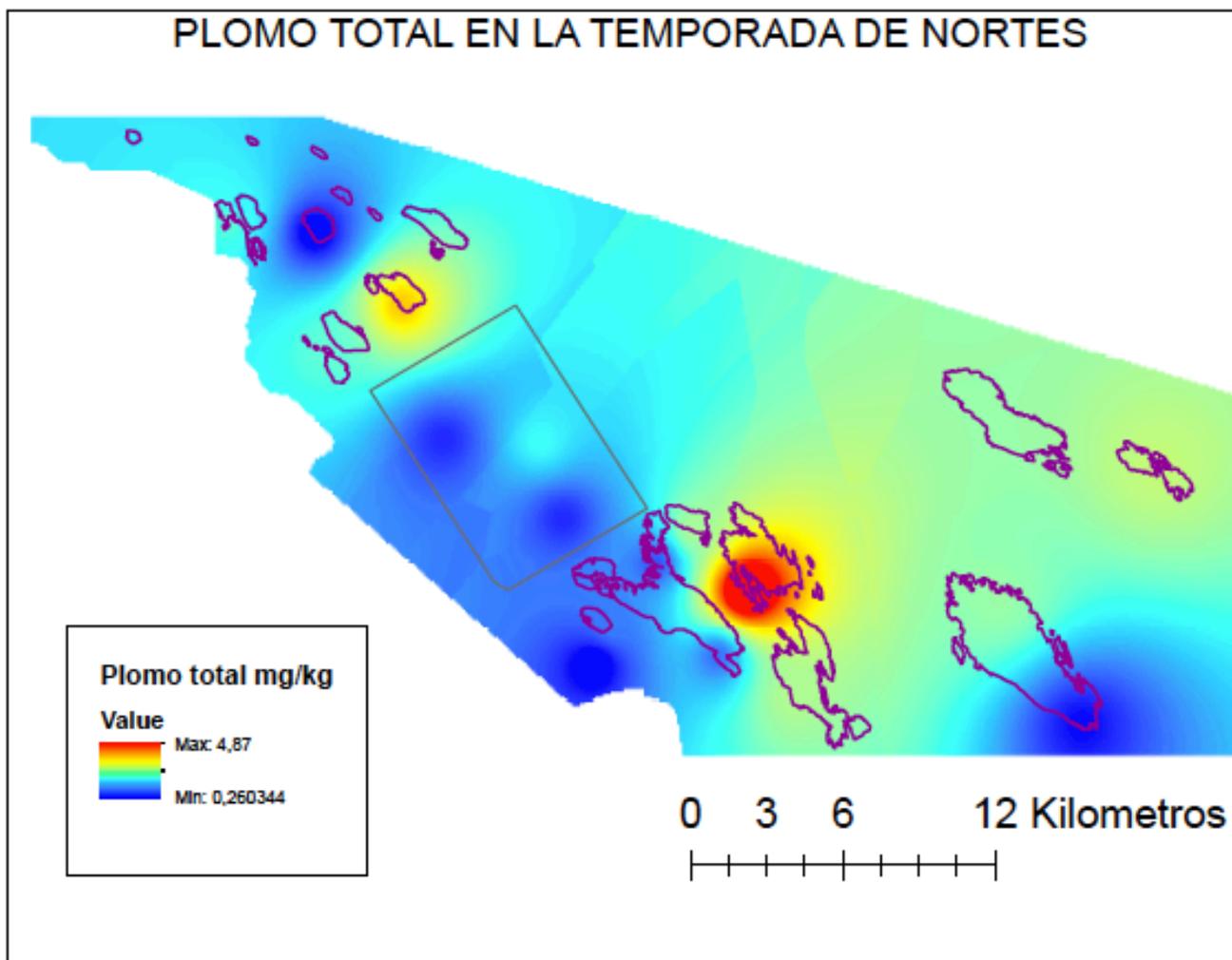


Figura 32 Distribución de Plomo total en temporada de Nortes.

7.3.4. Concentración de Plomo biodisponible

De los arrecifes estudiados, se obtuvo una concentración promedio para biodisponibilidad de Plomo observando en la zona de Blanquilla una concentración promedio mayor con un valor de 2.04 ± 0.5964 mg/kg, seguido del arrecife Santiaguillo con 1.09 ± 0.4613 mg/kg y el arrecife Fondeadero 228 con 0.8875 ± 0.6143 mg/kg (Tabla 10) (Figura 34).

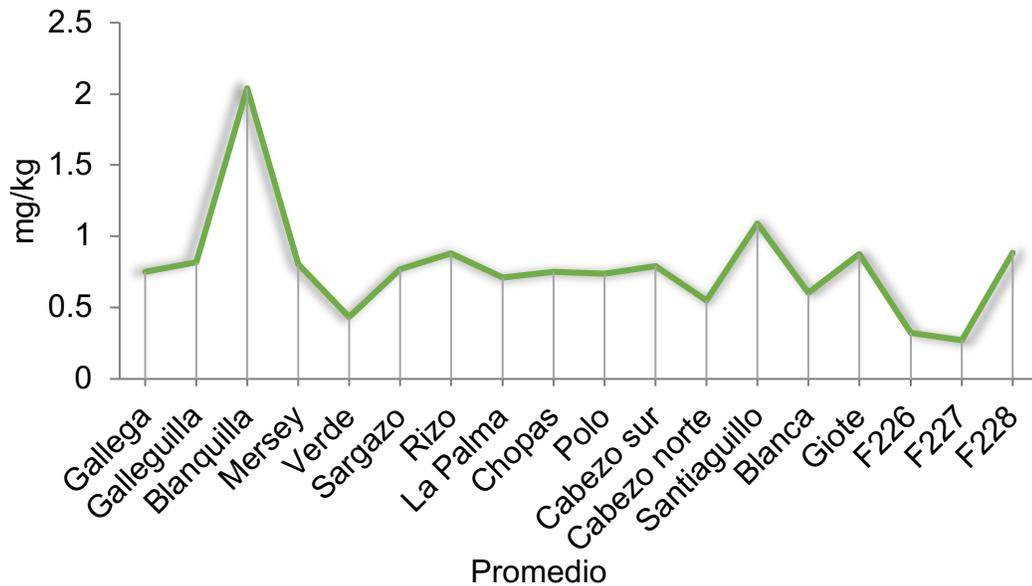


Figura 33 Concentración promedio de Plomo total en los arrecifes del PNSAV.

Tabla 10 Concentración promedio de Plomo biodisponible en los arrecifes del PNSAV

Arrecife	Zona		Pb (mg/kg)
Gallega	Norte	Promedio±DE	0.7517±0.7576
		Rango	0.1975-1.615
Galleguilla	Norte	Promedio±DE	0.8167±0.4869
		Rango	0.365-1.3325
Blanquilla	Norte	Promedio±DE	2.04±0.5964
		Rango	1.4525-2.645
Mersey	Norte	Promedio±DE	0.805±0.2871
		Rango	0.485-1.04
Verde	Norte	Promedio±DE	0.435±0.5045
		Rango	0.05-0.9275
Sargazo	Sur	Promedio±DE	0.7708±0.2764
		Rango	0.4525-0.95
Rizo	Sur	Promedio±DE	0.8808±0.3598
		Rango	0.57-1.275
La palma	Sur	Promedio±DE	0.71±0.3648
		Rango	0.4725-1.13
Chopas	Sur	Promedio±DE	0.7533±0.7151
		Rango	0.0925-1.5125
Polo	Sur	Promedio±DE	0.7383±0.2347
		Rango	0.4875-0.9525
Cabezo Sur	Sur	Promedio±DE	0.79±0.3661
		Rango	0.385-1.0975
Cabezo Norte.	Sur	Promedio±DE	0.5492±0.4039
		Rango	0.1875-0.985
Santiaguillo	Sur	Promedio±DE	1.09±0.4613
		Rango	0.5575-1.3675
Blanca	Sur	Promedio±DE	0.6058±0.7355
		Rango	0.17-1.455
Giote	Sur	Promedio±DE	0.8783±0.4272
		Rango	0.5175-1.35
F226	Fondeadero	Promedio±DE	0.3242±0.2632
		Rango	0.03-0.5375
F227	Fondeadero	Promedio±DE	0.2717±0.3932
		Rango	0.0-0.7225
F228	Fondeadero	Promedio±DE	0.8875±0.6143
		Rango	0.1825-1.3075

Las concentraciones de Pb totales en los arrecifes del PNSAV, no rebasaron los niveles de Efecto de rango bajo (ERL) y Efecto de rango medio (ERM) (Figura 35).

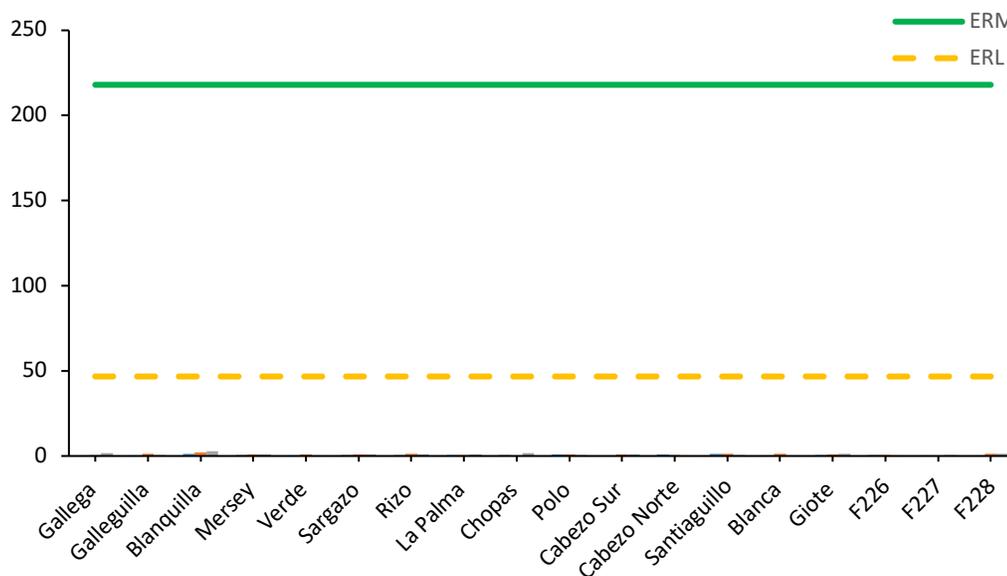


Figura 34 Índice de calidad para Plomo biodisponible en los arrecifes del PNSAV.

7.3.4.1. Concentración y distribución de Plomo biodisponible por época del año

Las concentraciones de Pb biodisponible en las tres temporadas muestreadas no presentaron diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($p= 0.12$). Para concentraciones biodisponibles de cadmio se obtuvo en orden decreciente por periodo de muestreo: nortes (0.9117 ± 0.6539) > lluvias (0.8910 ± 0.5050) > Secas (0.5322 ± 0.3242). (Figura 36).

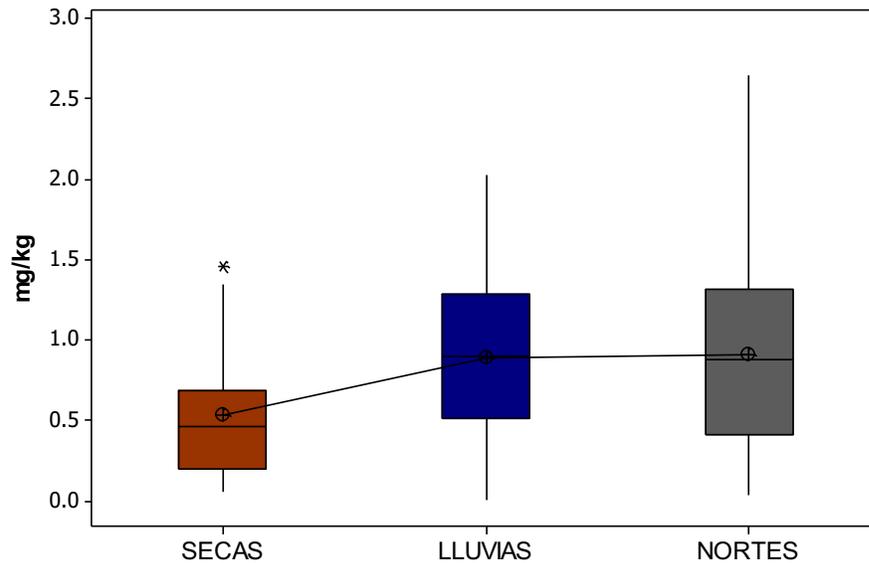


Figura 35 Concentración de plomo biodisponible en las tres temporadas climáticas (nortes, lluvias y secas).

La correlación de Pearson para tamaño de grano y concentraciones totales de plomo mostró que; existe una relación moderada entre el tipo de grano denominado arenas con las concentraciones de plomo biodisponible teniendo mayor relación en la temporada de secas, asimismo, el tipo de grano denominado gravas tiene una relación baja con las concentraciones de plomo biodisponible. Los tipos de grano limos y arcillas presentan una relación negativa con la concentración de plomo biodisponible. (Tabla 11) (Figuras 37, 38 y 39).

Tabla 11 Correlación de Pearson entre tipo de grano y concentración biodisponible de Plomo.

	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
Secas	R ² = 0.049	R ² = 0.338	R ² = -0.402	R ² = -0.126
	P = 0.847	P = 0.170	P = 0.098	P = 0.619
Lluvias	R ² = -0.242	R ² = 0.247	R ² = -0.241	R ² = -0.006
	P = 0.333	P = 0.323	P = 0.336	P = 0.980
Nortes	R ² = 0.060	R ² = 0.298	R ² = -0.292	R ² = -0.364
	P = 0.812	P = 0.231	P = 0.240	P = 0.137

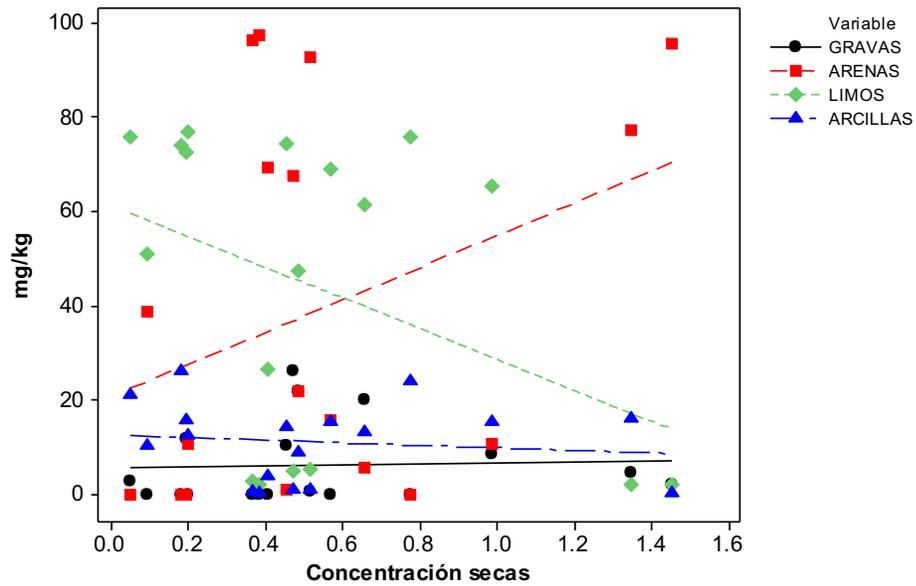


Figura 36 Correlación entre Correlación entre la concentración biodisponible de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Secas.

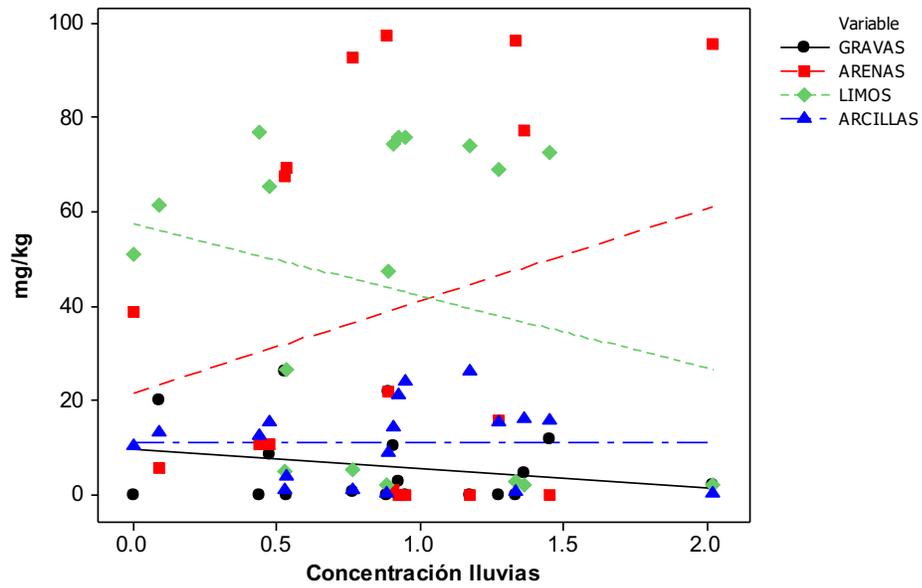


Figura 37 Correlación entre Correlación entre la concentración biodisponible de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Lluvias.

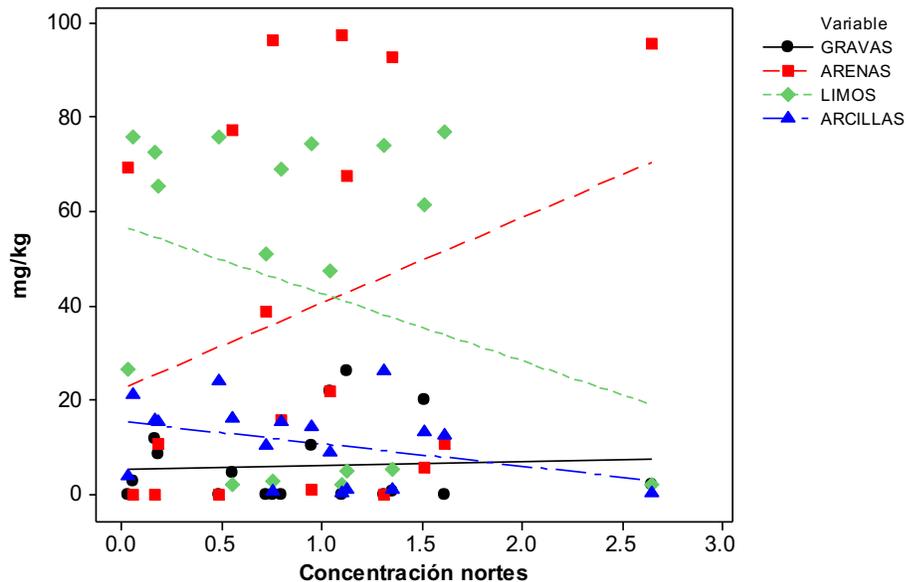


Figura 38 Correlación entre Correlación entre la concentración biodisponible de Plomo y fracción de grano (gravas, arenas, limos y arcillas) en temporada de Nortes.

En los mapas de distribución de las concentraciones de Plomo biodisponible dentro del PNSAV se observa una mayor presencia de la fracción biodisponible en la temporada de Lluvias, teniendo la concentración más alta en el arrecife Blanquilla, seguido del arrecife Blanca, esto posiblemente debido al acarreamiento de sedimento proveniente de los ríos y que traen consigo una gran variedad de elementos químicos (Figura 40). A su vez, en la temporada de Nortes, al igual que la temporada de lluvias, el arrecife Blanquilla presentó la mayor concentración de plomo biodisponible, seguido del arrecife Gallega y el arrecife Chopas (Figura 41). En la temporada de Secas el arrecife que presento la mayor concentración de plomo biodisponible fue el arrecife Blanquilla seguido del arrecife Santiaguillo (Figura 42).

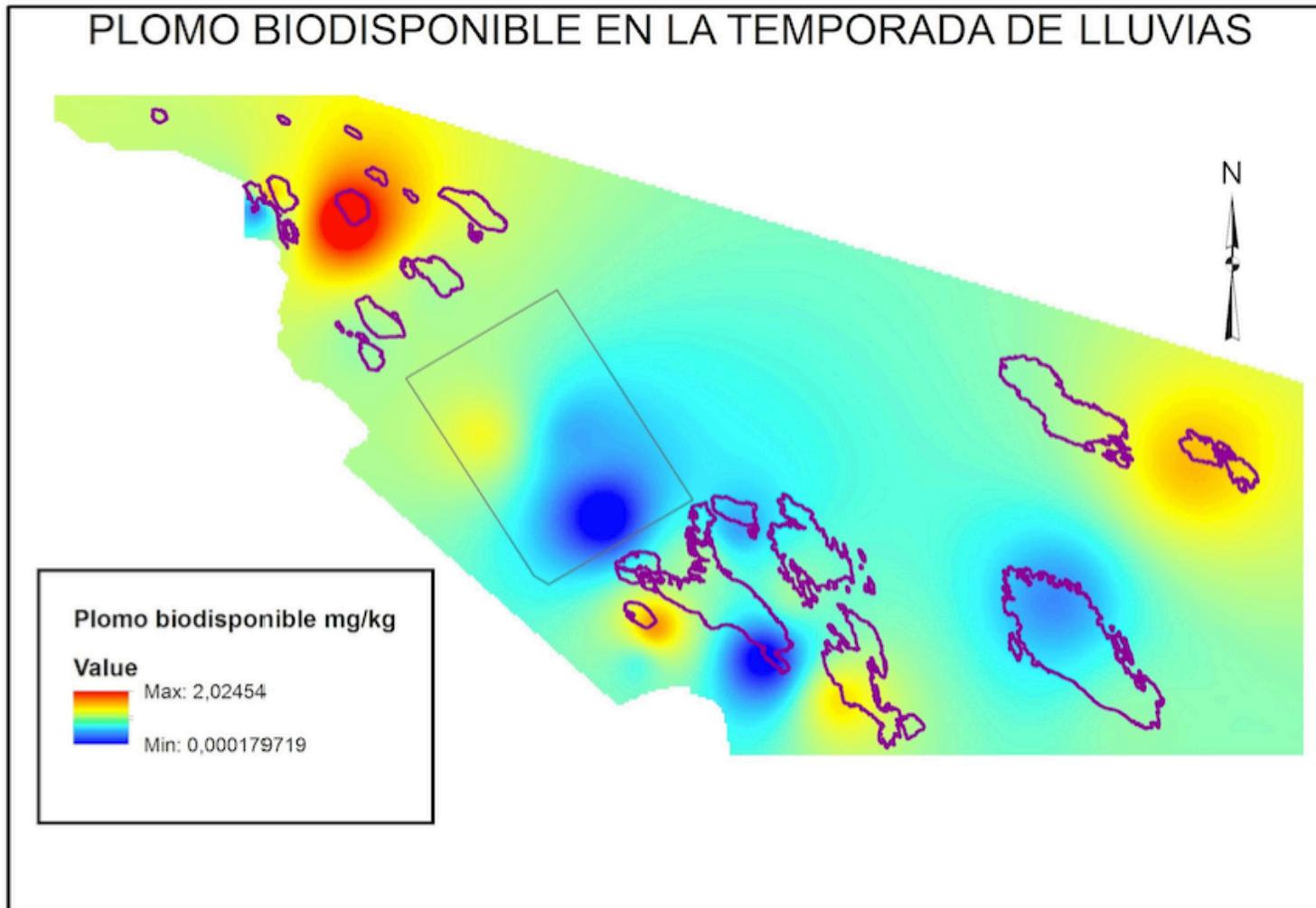


Figura 39 Distribución de Plomo biodisponible en la temporada de Lluvias.

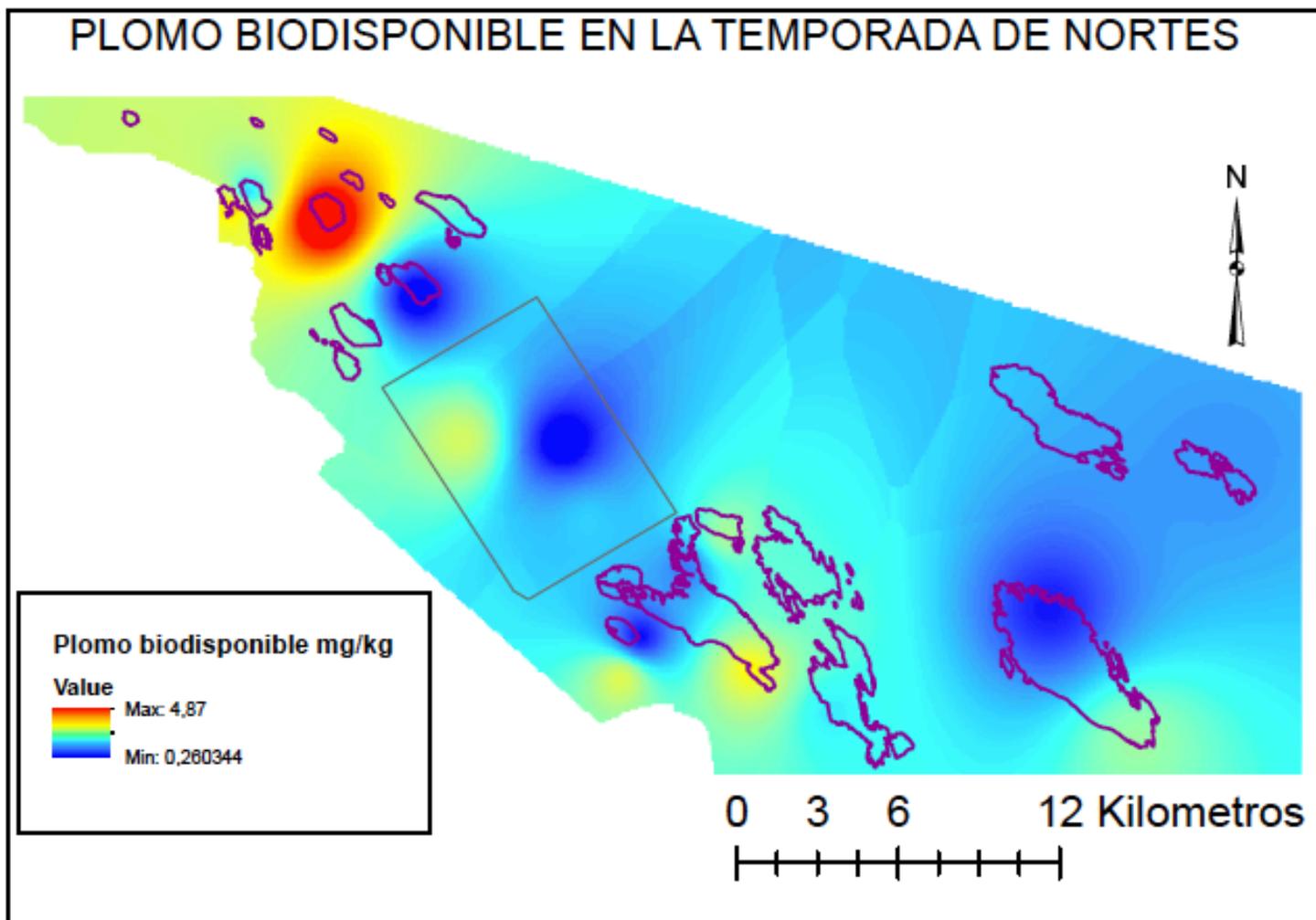


Figura 40 Distribución de plomo biodisponible en la temporada de Nortes.

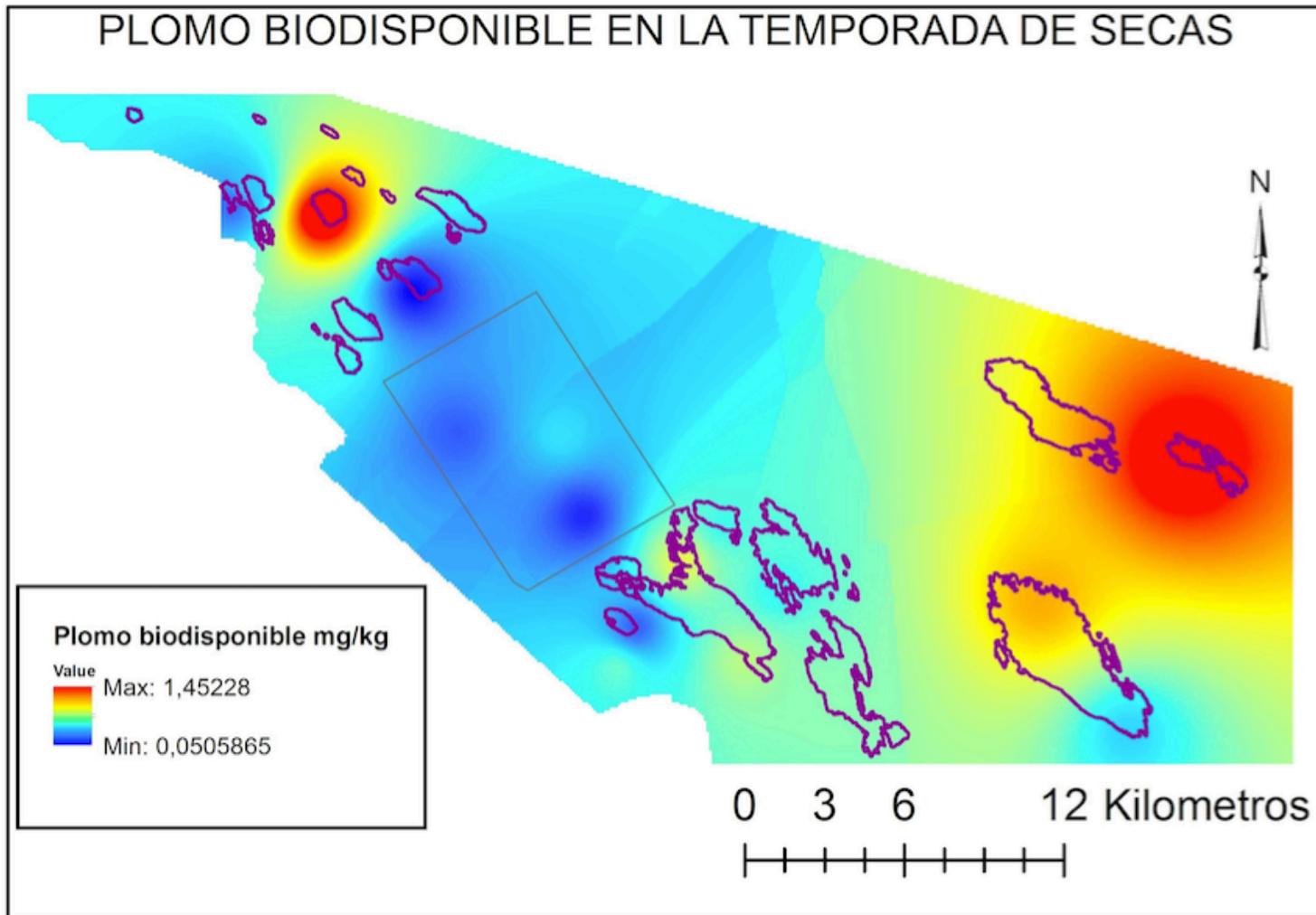


Figura 41 Distribución de Plomo biodisponible en la temporada de Secas.

7.4. Análisis de conglomerados (Clúster)

El análisis de Clúster, también conocido como Análisis de Conglomerados, Taxonomía Numérica o Reconocimiento de Patrones, es una técnica estadística multivariante cuya finalidad es dividir un conjunto de objetos en grupos de forma que los perfiles de los objetos y lo de los objetos de clúster sean distintos (aislamiento externo del grupo).

En el análisis de conglomerado para las concentraciones de cadmio evaluado se pueden identificar tres grupos definidos (Figura 43). En el primero grupo se localiza el arrecife Rizo, el cual obtuvo las concentraciones más altas de cadmio total, en el siguiente grupo se localizan los arrecifes de; Palma, Sargazo, Polo y Galleguilla. Un tercer grupo el cual se encuentra subdividido en tres grupos internos asociados con el arrecife Mersey.

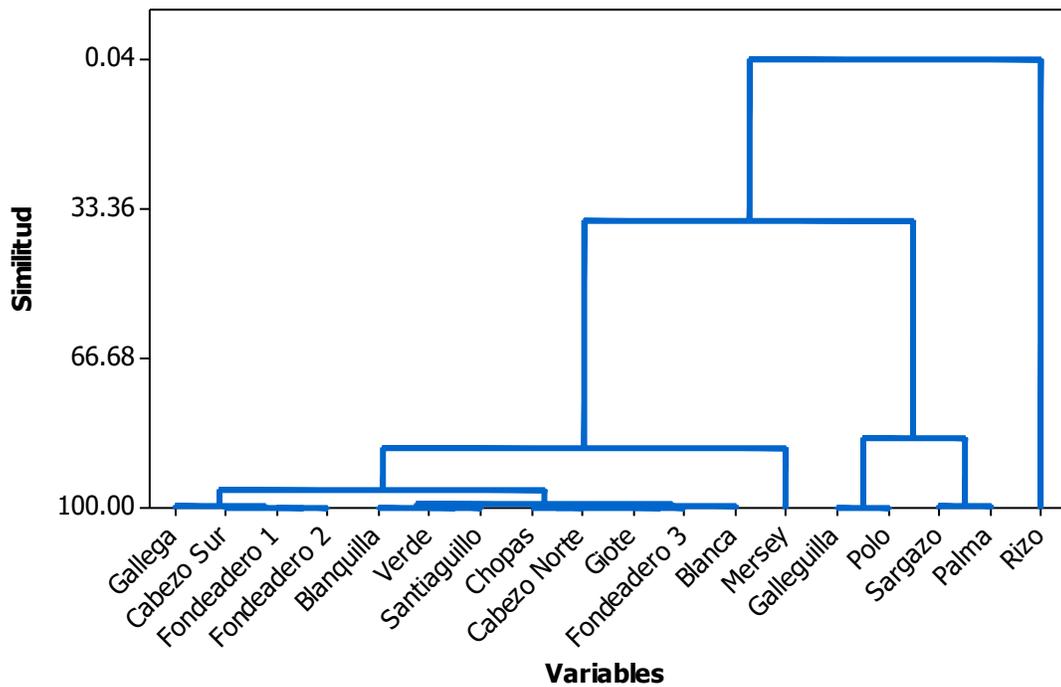


Figura 42 Análisis de conglomerados para concentración de Cadmio total en los arrecifes del PNSAV.

La Figura 44 muestra el dendrograma para los parámetros estudiados de Cadmio biodisponible en los arrecifes del PNSAV. En este análisis se presentan dos grupos bien diferenciados. El primero agrupa a los arrecifes; Polo, La Palma, Santiaguillo y Blanquilla lo que corresponde a los arrecifes que presentaron las concentraciones más bajas de cadmio biodisponible. El segundo grupo, se subdivide en dos grupos más, el primer grupo se localizan los arrecifes; Verde, Sargazo, Fondeadero 226 y 227, Cabezo Sur, Giotte y Chopas, los cuales representan concentraciones medias de Cadmio biodisponible. El segundo está formado por los arrecifes; Gallega, Rizo, Galleguilla, Fondeadero 228, Cabezo Norte, Blanca y Mersey siendo estos los arrecifes que obtuvieron las concentraciones más altas.

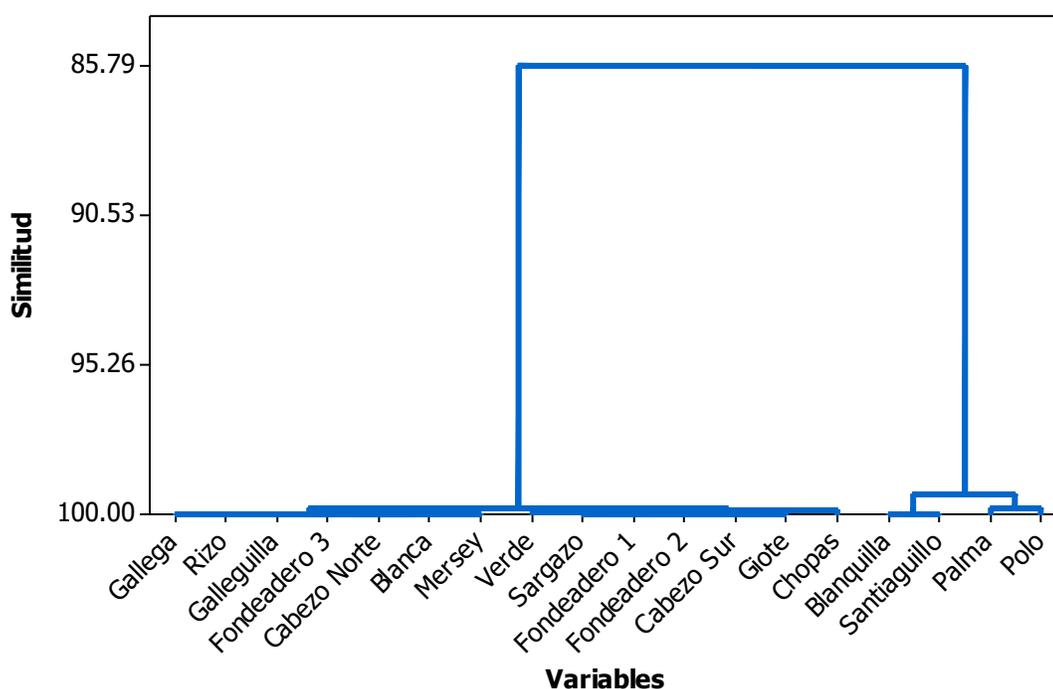


Figura 43 Análisis de conglomerados para concentraciones de cadmio biodisponibles en los arrecifes del PNSAV.

A su vez, en el Dendrograma obtenido para las concentraciones de Plomo nos muestra dos grupos definidos, el primer grupo se subdivide en cinco grupos más, el

primero está compuesto por Fondeadero 227, el obtuvo concentraciones medias, el segundo se encuentran los arrecifes; Cabezo Norte, Blanca, Cabezo Sur. El tercer subgrupo; Polo, Giote, Fondeadero 226, Santiaguillo, La Palma. En el cuarto se localizan; Fondeadero 228, Rizo y Verde. Y en el quinto subgrupo se encuentran los arrecifes; Blanquilla, Mersey y Chopas. En el segundo se encuentran los arrecifes; Gallega, Galleguilla y Sargazo los cuales presentan concentraciones medias (Figura 45.)

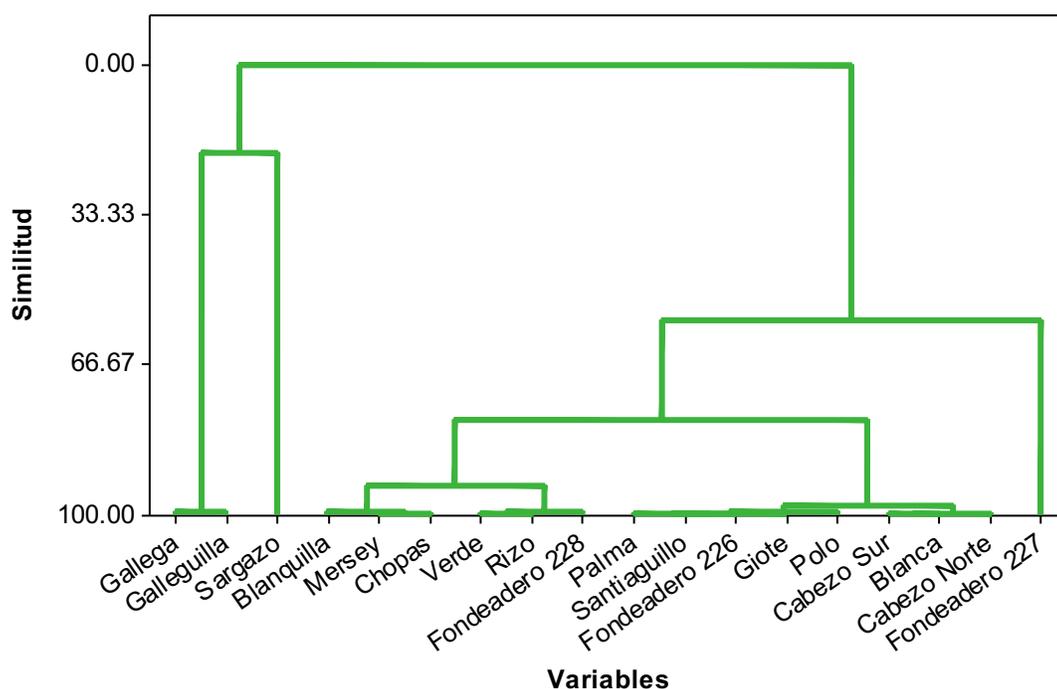


Figura 44 Análisis de conglomerado para concentraciones totales de Plomo en los arrecifes del PNSAV.

Para las concentraciones biodisponibles de Plomo se observa un conglomerado con dos grupos. El primer grupo se subdividió en dos; el primer subgrupo se encuentra compuesto por los arrecifes; Cabezo norte, Santiaguillo, fondeadero 226 y Polo. El segundo subgrupo se encuentra los arrecifes Galleguilla, Rizo, Verde y Blanca. El segundo grupo se subdividió en tres, el primer grupo se localizan los arrecifes; Gallega, La Palma, Fondeadero 227 y Chopas. En el segundo grupo se encuentran los arrecifes de Blanquilla y Giotte. Y por último en el tercer grupo se localizan los arrecifes de; Mersey, Cabezo Sur, Sargazo y Fondeadero 228 (Figura 45).

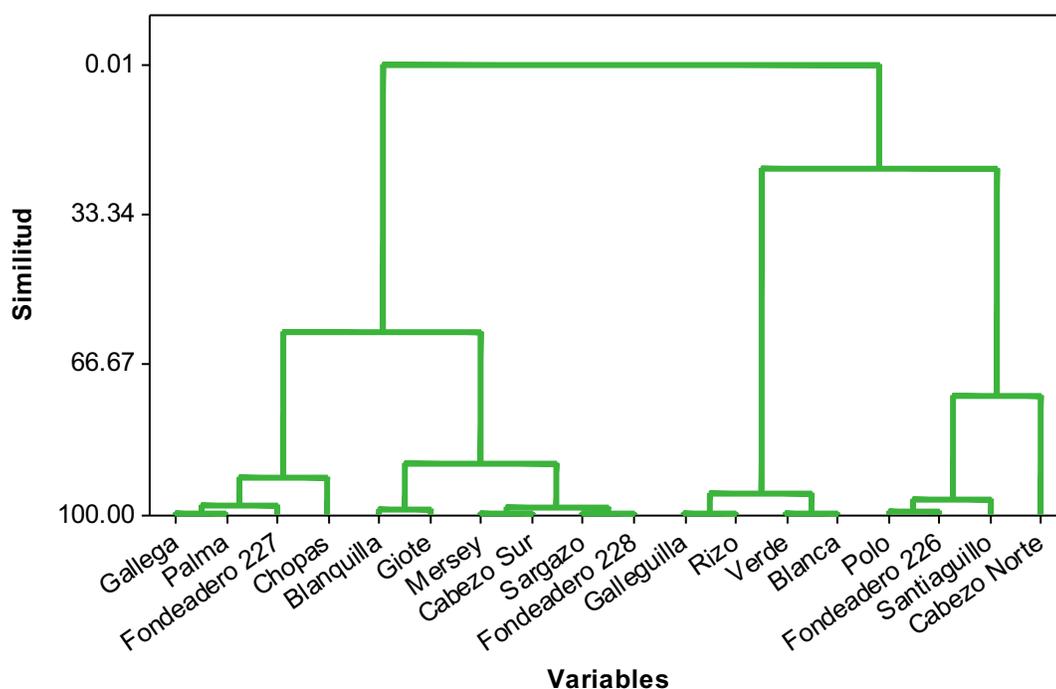


Figura 45 Análisis de conglomerado para concentraciones totales de Plomo biodisponible en los arrecifes del PNSAV.

8. DISCUSIÓN

Uno de los aspectos más importantes de la contaminación marina es la causada por metales pesados. Hoy en día con los avances tecnológicos y científicos, se puede conocer sus diversos orígenes, especiación, concentración, toxicidad y distribución. La concentración total de un determinado metal es difícil de determinar si representa condiciones naturales o antropogénicas, ya que el contenido de estos puede variar dependiendo de la mineralogía y del contenido de materia orgánica en cada zona, entre otros factores (Loring, 1991). Aunado a esto, existen diversas entradas de metales pesados a las zonas marino-costeras, como lo son los vertidos de origen urbano, la deposición de basura, actividades agrícolas, industrial y de la minería.

La contaminación de metales pesados en los ecosistemas costeros puede representar un riesgo para estos ecosistemas y la salud humana, debido a que los organismos tienen la capacidad de bioacumular algunos metales y transferirlos a la cadena trófica, produciendo un efecto de biomagnificación a niveles más altos de esta.

Los contenidos de metales pesados en los sedimentos del PNSAV varían tanto en concentraciones totales como su porción relativa a las fracciones biodisponibles, reflejando así una diversidad de características geoquímicas de estos sedimentos, así como también los aportes que llegan a este sistema.

El rango obtenido para las concentraciones totales de Cd (2.9-33.33 mg/kg) se encuentra superior a concentraciones totales reportadas de algunos estudios previos como lo son: Vázquez *et al.* (2002) con 0.05-6.82 mg/kg; Ponce-Vélez *et al.* (2006) con 1.0-13.9 mg/kg; Zamudio-Alemán *et al.* (2014) con <0.0-0.37 mg/kg, entre otros estudios en la región de Golfo de México para sedimentos marinos. Existen diversos factores que originan la presencia de metales pesados como cadmio, y son el uso de pesticidas, fertilizantes, vertimiento de aguas residuales no tratadas. Se puede observar un aumento al paso de los años de cadmio en la zona del PNSAV, esto puede atribuirse al crecimiento industrial y portuario del puerto, y

a que la mayoría de los desechos son vertidos hacia los ríos y estos a su vez desembocan dentro o cerca de la poligonal del PNSAV.

Las concentraciones de Cd total supera los valores de ERL de la Guía de Calidad de Sedimentos (Long *et al.*, 1995). Estos resultados muestran que el cadmio en su fracción total puede tener una cierta influencia negativa sobre la biota marina, a su vez el valor de ERM se muestra sobrepasado solo para el arrecife Rizo, pudiendo ser potencialmente peligroso para los organismos presentes en ese arrecife.

Las concentraciones biodisponibles de Cd, así como las concentraciones totales y biodisponibles de Pb, se encuentran en valores inferiores en comparación con estudios del Golfo de México, sin embargo, no se descarta un riesgo potencial al poder ejercer efectos tóxicos los elementos metálicos (Cd y Pb) en sus fracciones totales y biodisponibles en sedimentos marinos, en una posible relación al ambiente y a la biota marina.

El rango obtenido para las concentraciones biodisponibles de Cd (0.11-0.9625 mg/kg) se encuentra inferior a concentraciones biodisponibles reportadas de algunos estudios previos como lo son: Ponce-Vélez *et al.* (2006) con 0.4-5.7 mg/kg, entre otros estudios en la región de Golfo de México para sedimentos marinos.

Para las concentraciones totales de Pb (0.0-11.72 mg/kg) se encuentra inferior a las concentraciones totales reportadas de algunos estudios previos como lo son: Vázquez *et al.* (2002) con 67.3-263.0 mg/kg; Vázquez & Sharma (2004) con <0.1-19.0 mg/kg; Ponce-Vélez *et al.* (2006) con 0.9-37.7 mg/kg; Celis-Hernández *et al.* (2017) con 2.90-16.6 mg/kg; Celis-Hernández *et al.* (2018) con 10.0-27.0 mg/kg; Ruiz-Fernández *et al.* (2019) con 0.1-26.2 mg/kg, entre otros estudios en la región de Golfo de México para sedimentos marinos.

El rango obtenido para las concentraciones biodisponibles de Pb (0.0-2.645 mg/kg) se encuentra inferior a las concentraciones biodisponibles reportadas de algunos estudios previos como lo son: Ponce-Vélez *et al.* (2006) con 0.9-17.4 mg/kg; Horta-

Puga (2016) con 21.9-85.6 mg/kg, entre otros estudios en la región de Golfo de México para sedimentos marinos.

Las concentraciones de Pb totales y biodisponible no superan los valores de ERL y ERM dado por (Long *et al.*, 1995) por lo tanto no representa un peligro para los organismos marinos.

Las fracciones biodisponibles obtenidas en este estudio correspondieron a 01-23% de Cd y 00-87% de Pb, resultando inferior a las fracciones biodisponibles de otros estudios previos internacionales, como es el caso de Saleem *et al.* (2018) reportando 73.4-92.8% de Cd y 70.0-97.3% de Pb en sedimentos del lago Mangla reserva de Pakistán.

Nordberg *et al.* (2009); Díaz-Del Alba (2013) describen al término de biodisponibilidad como el grado de afinidad de absorción de una sustancia por un organismo vivo, expresada como una fracción de la cantidad total de la sustancia disponible en el ambiente al que está expuesto. Respecto a esto, los niveles obtenidos de fracciones de biodisponibilidad para Cd y Pb, podrían ser influenciados por actividades antrópicas, como: emisiones agrícolas, residuos industriales y domésticos no tratados, emisiones de drenajes, entre otros factores existentes en la región del PNSAV y en la región de la cuenca del río Jamapa (Celis-Hernández *et al.*, 2017; Saleem *et al.*, 2018).

En los estudios de correlación se consideró el contenido total y biodisponible de los elementos (Cd y Pb) con las variables geoquímicas analizadas (Gravas, arenas limos y arcillas). La importancia del papel que juega el tamaño de grano sobre la distribución de los metales en los sedimentos ha sido bastante sustentada. Algunos estudios señalan que el tamaño de grano y el contenido de aluminio-silicatos constituyen los principales factores de control de la distribución de metales traza en los ecosistemas acuáticos (Rubio *et al.*, 2000; Naidu *et al.*, 1997).

Los sedimentos del PNSAV, presentaron una asociación significativa entre las fracciones finas y los metales trazas. Estos resultados indican que esta asociación

puede estar influenciada por las descargas de los ríos; La Antigua, Jamapa y Papaloapan, los cuales vierten sus aguas dentro y cerca de la poligonal del SAV.

Así mismo, actualmente se encuentra en creación el nuevo Puerto de Veracruz, dragando grandes cantidades de sedimento, que pueden afectar la dinámica sedimentaria del PNSAV, y producen así alteraciones en las características geoquímicas de los sedimentos. Estos impactos se ven reflejados en los arrecifes Gallega, Blanquilla y Galleguilla los cuales presentaron las mayores concentraciones de metales asociados a sedimentos finos y arcillas. La situación contraria, ocurre con la fracción arenosa de los sedimentos; donde se presentan correlaciones negativas significativas, indicando que las arenas afectan negativamente la porción de materiales finos y las concentraciones de metales en sedimentos. Los metales disminuyen a medida que aumenta la proporción de arena, esto debido a la disminución de área superficial para absorber compuestos orgánicos.

(Hedounin *et al.*, 2009) describen una correlación significativa con el tamaño de grano denominado arcilla, lo cual coincide con el presente trabajo.

El presente estudio es similar a lo realizado por Ruiz-Fernández *et al.* (2019), al realizar estudios de distribución espacial de metales pesados en sedimentos marinos en el Golfo de México. Ruiz-Fernández *et al.* (2019) evaluaron dos tipos de núcleos de sedimentos (sedimentos costa afuera y sedimentos costeros), reportaron las concentraciones más bajas de Pb en sedimentos costeros ubicados en el noroeste de la península de Yucatán, siendo inferiores a las concentraciones obtenidas en el presente trabajo (0.1-7.5<0.0-11.72), en tanto; las concentraciones totales de Pb en sedimentos costa afuera fueron superiores a las obtenidas en el este trabajo (5.4-26.2>0.0-11.72), concentraciones en mg/kg.

9. CONCLUSIONES

En los sedimentos del PNSAV predominan los limos, los cuales estuvieron presentes en todos los arrecifes muestreados, los siguientes tipos más abundantes son las arenas, arcillas y gravas.

Contenido total de metales:

Las concentraciones más altas de Cadmio total se obtuvieron en el arrecife Rizo (33.33 mg/kg), este arrecife está situado en la Zona Sur del PNSAV, lo cual puede estar asociado por la generación de muelles para embarcaciones, así como las descargas residuales del poblado Antón Lizardo. El patrón de distribución por temporadas fue el siguiente; Secas>nortes>lluvias.

Las concentraciones de Cd en las estaciones superan los valores de ERL (efecto de rango bajo). El arrecife Rizo, sobrepasa los valores ERM (Efecto de rango medio). Lo cual expone una elevada influencia antrópica. Pudiendo afectar la estabilidad del PNSAV y a su vez poner en riesgo la biota marina.

El metal Pb obtuvo las concentraciones más altas, superiores a 9.0 mg/kg, en la zona de fondeadero (Fondeadero 226 y Fondeadero 228). Esto puede deberse a que, en esta zona, se encuentran fondeados los barcos que entran al puerto, los cuales pueden estar afectando la composición de los sedimentos en esta zona, además de que el metal Pb se encuentra asociado a la producción de; soldaduras, pigmentos y pinturas. Las concentraciones de Pb total, no superaron los valores de ERL y ERM. El patrón de distribución por temporadas fue el siguiente; Secas>lluvias >nortes.

Para las concentraciones biodisponibles de Cd las concentraciones más altas se obtuvieron en los arrecifes Gallega y Galleguilla, situado en la parte norte del PNSAV, no se excede los valores de ERM Y ERL. El patrón dentro de la evaluación por temporada fue el siguiente: nortes>lluvias>secas.

Para las concentraciones biodisponibles de Pb, el arrecife Blanquilla (2.04 mg/kg) obtuvo las concentraciones más altas, el cual se encuentra ubicado en la zona norte.

Las concentraciones no rebasan los valores de ERM y ERL: El patrón de distribución de concentraciones biodisponibles de Pb por temporada muestreada fue la siguiente: nortes>lluvias>secas.

La presencia de Cd y Pb en los sedimentos está asociada directamente con la textura de grano, encontrándose las mayores concentraciones en la fracción de grano tipo limo.

Los niveles de metales en las aguas del PNSAV, así como en el Golfo de México se encuentra asociada principalmente a la entrada elementos químicos los cuales entran en medio por la influencia de factores externos como son; descargas de aguas residuales, industriales, galvanoplastia, y agrícola.

10 LITERATURA CITADA

- Al-Najjar, T., Fawaz, J.B., Manasrah, R., Al-Zibdah, M., Abu-Hilal, A., 2008. Variations of heavy metals concentration in suspended matter and physiochemical properties in the coastal surface water of the Gulf of Aqaba. *Jordan J. Biol. Sci.* 1 (4), 153–158.
- Ahmed- El, N., El-Said, G.F., Khaled, A., Ragab, S. 2016. Distribution and ecological risk assessment of some heavy metals in coastal surface sediments along the Red Sea, Egypt. Environmental Division, National Institute of Oceanography and Fisheries, Kayet Bey, Alexandria, Egypt. *International Journal of sediment Research.* 164-172 pp.
- Castañeda-Chávez, M.R., Lango-Reynoso, F., & Navarrete-Rodríguez, G. 2017. Heavy metals in sediment from Alvarado Lagoon System in Veracruz, Mexico. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, 2(3): 1209-1214.
- Bastami, K.D., Afkhami, M., Mohammadizadeh, M., Ehsanpour, M., Chambari, S., Aghaei, S., Esmaeilzadeh, M., Neyestani, M.R., Lagzaee, F., Baniamam, M., 2015a. Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments and mullet *Liza klunzingeri* in the northern part of the Persian Gulf. *Mar. Pollut. Bull.* 94, 329e334.
- Botello, A.V., Villanueva, F.S., Rivera, R.F., Velandia, A.L., & de la Lanza, G.E. 2018. Analysis and tendencies of metals and POPs in a sediment core from the Alvarado Lagoon System (ALS), Veracruz, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 75(1): 157-173.
- Celis-Hernández, O., Rosales-Hoz, L., & Carranza-Edwards, A. 2013. Heavy metal enrichment in Surface sediments from the SW Gulf of Mexico. *Environ Monit Assess*, 185: 8891-8907.
- Celis-Hernández, O., Rosales-Hoz, L., Cundy, A. & Carranza-Edwards, A. 2017. Sedimentary heavy metal(loid) contamination in the Veracruz shelf, Gulf of Mexico: a baseline survey from a rapidly developing tropical coast. *Marine Pollution Bulletin*, 119(2): 204-213.
- Celis-Hernández, O., Rosales-Hoz, L., Cundy, A.B., Carranza-Edwards, A., Croudace, I.W., & Hernández-Hernández, H. 2018. Historical trace element

accumulation in marine sediments from the Tamaulipas shelf, Gulf of Mexico: an assessment of natural vs anthropogenic inputs. *Science of the Total Environment*, 622-623: 325-336.

Choque, L.F.C., Ramos, O.E.R., Castro, S.N.V., Aspiazu, R.R.C., Mamani, R.G.C., Alcazar, S.G.F., Sracek, O., Bhattacharya, P., 2013. Fractionation of heavy metals and assessment of contamination of the sediments of Lake Titicaca. *Environ. Monit. Assess.* 185, 9979–9994.

De la Cruz-Landero, N., Alderete-Chávez, Á., & Laffón-Leal, S. 2013. Acumulación de metales pesados en sedimentos del ecosistema manglar en laguna de Términos, Campeche, México. *Foresta Veracruzana*, 15(1): 25-30.

Díaz-Del Alba, M.I. 2013. Avances en el control de la contaminación por metales: nuevas metodologías de análisis y especiación metálica en sistemas acuáticos. Estudios en la Bahía de Algeciras. Tesis doctoral, Universidad de Cádiz, 562 p.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2012. Decreto que modifica al diverso por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano, ubicada frente a las costas de los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado del Estado de Veracruz Llave, con una superficie de 52,238-91-50 hectáreas, publicado los días 24 y 25 de agosto de 1992. Tercera Sección. 29 de noviembre de 2012.

González- Soto, E., Alonso- Rodríguez, E., Rodríguez; D.P. (2000). Heavy Metals. Pp. 439-458. In *Handbook of Water Food Science and Technology* (Marcel Dekker, Inc). CRC Press. 920 pp.

Ghrefat, H., Yusuf, N., 2006. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan. *Chemosphere* 65, 2114e2121.

Hédouin, L., Reichelt- Brushett, A., Gates, R. 2009. Assesments of metals and a metalloid in sediments from Hawaiian coral reef ecosystems. Hawaii Institute of Marine Biology, University of Hawaii, 46-007 Lilipuna Road, Hawaii 96744, United States.

- Hussein- Kehinde, O., Oluwafunso-Ige, J., Ajibola-Iyiola, O., Ngila, Jane. 2017. Fractionation profile, mobility patterns and correlations of heavy metals in estuary sediments from Olonkoro River, in tede catchement of westerns region, Nigeria. Material and Enviromental- Analitical Research Group, Department of Industrial Chemistry, University of Ilorin, Nigeria. Enviromental Nanotechnology, Monitoring & Management. Pp 53-62.
- Horta-Puga, G. 2016. Geochemical partitioning of lead in biogenic carbonate sediments in a coral reef depositional environment. *Marine Pollution Bulletin*, 116(1-2): 71-79.
- Jin-Jun, L., Zhi-Xin, N., Zeng-Hui, D., Yong-Xia H. y Xiang-Rong X. 2018. Contamination level, chemical fraction and ecological risk of heavy metals in sediments from Daya Bay, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 128 (2018) 132–139.
- Krishnakumar, S., S, Ramasamy., Chandrasekar, N., Peter-Simon, T., Gopal, V., Godson-Prince S and Magesh, N.S. 2017. Trace element concentrations in reef associated sediments of Koswari Islans, Gulf of Mannar biosphere reserve, southeast coast of India. Departament of Enviromental Sciences, University of Kerala, Kariavattom campus, Thiruvananthapuram, India. *Mariene Pollution Bulletin*, Pp 515-522.
- Liu, B., Hu, K., Jiang, Z., Xu, F., Su, X., 2011. A 50-year sedimentary record of heavy metals and their chemical speciations in the Shuangtaizi River estuary (China): implications for pollution and biodegradation. *Front. Environ. Sci. Eng. China* 5 (3), 435–444.
- Long, E.R., Macdonald, D.D., Smith, S. L., Calder, F.D., 1995. Indice of adverse biological effect within ranges of chemical concentracions in marine and estuarine sediments. *Enviromental Management* 19,81-97.
- Loring, D.H., 1991, Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. *Journal of Marine Science*, 48, 101-115.
- Martorelli, J.J. 2010. Biodisponibilidad de metales pesados en dos ecosistemas acuaticos de la costa, Sur Atlantica Andaluza afectados por contaminacion difusa. Tesis doctoral, Universidad de Cádiz.

- Naidu, A.; Blanchard, A.; Kelley, J. ; Goering, J. ; Hameed, M. & Baskaran, M. 1997. Heavy metals in Chukchi Sea sediments as compared to selected Circum-arctic Shelves. *Mar. Pollut. Bull.*, 35 (7): 260-269.
- Nordberg, M., D.M., Templeton, O., Andersen, J.H., Duffus. 2009. Glossary of terms used in ecotoxicology (IUPAC recomendations 2009). *Pure and Applied Chemistry*, 81(5): 829-970.
- Passos, E.A., Alves, J.C., Santos, I.S., Alves, J.P., Garcia, C.A.B., Costa, A.C.S., 2010. Assessment of trace metals contamination in estuarine sediments using a sequential extraction technique and principal component analysis. *Microchem. J.* 96, 50–57.
- Ponce- Vélez, G., y Botello, A. V. 1991. Aspectos geoquimicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Terminos, Campeche. Laboratorio de contaminación marina, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. *Hidrobiologica*, Volumen 1(2).
- Ponce-Vélez, G., Botello, A.V., & Díaz-González, G. 2006. Organic and inorganic pollutants in marine sediments from northern and southern continental shelf of the Gulf of Mexico. *Int. J. Environmental and Pollution*, 26: 295-311.
- Rand, G.M. 1995. Fundamentals of aquatic toxicology in: *Effects, enviromental fate and risk assesment*. 2nd edition. Taylor and Francis (eds.) *Introduction to aquatic ecology* (chapter 1). 1125 pp.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Diaz Lagos, M y Gonzales-Jimenez, E.E. 2016. Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingenieria investigación y desarrollo*, volumen 16, número 2, paginas; 66- 77.
- Rubio, B.; Nombela, M. & Vilas, F. 2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): assessment of metal pollution. *Mar. Pollut. Bull.*, 40 (11): 968-980.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., & Celis-Hernández, O. 2007. Environmental implications of heavy metals in Surface sediments near Isla de Sacrificios, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 78(5): 353-357.

- Ruiz-Fernández, A.C., Sánchez-Cabeza, J.A., Pérez-Bernal, L.H., & Gracia, A. 2019. Spatial and temporal distribution of heavy metal concentrations and enrichment in the southern Gulf of Mexico. *Science of the Total Environment*, 651: 3174-3186.
- Saleem, M., J., Iqbal, G., Akhter, M.H., Shah. 2018. Fractionation, bioavailability, contamination and environmental risk of heavy metals in the sediments from a freshwater reservoir, Pakistan. *Journal of Geochemical Exploration*, 184(part a): 199-208.
- Song, Z., Dong, L., Shan, B., & Tang, W. 2017. Assessment of potential bioavailability of heavy metal in the sediments of land-freshwater interfaces by diffusive gradients in thin films. *Chemosphere*, 191: 218-225.
- Sheykhi, V., Moore, F., 2013. Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor river, southwest Iran. *Environ. Monit. Assess.* 185, 3219e3232.
- Toro, P.P.V., Bedoya, L.F.V., Correa, I.D., Franco, G.R.B., Alcántara-Carrión, J., Baena, J.A.P., 2016. Impact of terrestrial mining and intensive agriculture in pollution of estuarine surface sediments: Spatial distribution of trace metals in the Gulf of Urabá, Colombia. *Mar. Pollut. Bull.* 111, 311e320.
- Valdez J. Y Sifeddine, A. 2009. Composición elemental y contenido de metales en sedimentos marinos de la bahía Mejillones de Sur, Chile: Evaluación ambiental de la zona costera. *Latin American Journal of aquatic Research*. Vol.37, Num. 2, pp. 131-141.
- Vazques- Botello, A. Y Báez- Osuna, F., 1986. El problema crucial: la contaminación. Serie medioambiente en Coatzacoalcos. Centro de eco desarrollo. México, D.F.
- Vazquez, F.G., Sharma, V.K., & Pérez-Cruz, L. 2002. Concentrations of elements and metals in sediments of the southeastern Gulf of Mexico. *Environmental Geology*, 42: 41-46.
- Vazquez, F.G., & Sharma, V.K. 2004. Major and trace elements in sediments of the Campeche sound, southeast Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 48: 87-90.
- Xu, Xiaoda, Cao, Zhimin, Zhang, Zhixun, Li, Rihui, Hu, Bangqi, 2016. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the surface

sediments of the Bohai and Yellow Seas. *Mar. Pollut. Bull.* 110 (1), 596e602.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.079>.

Zamudio-Alemán, R.E., Castañeda-Chávez, M.R., Lango-Reynoso, F., Galaviz-Villa, I., Amaro-Espejo, A., & Romero-González, L. 2014. Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(4): 159-168.

Zhang, C., Z., Yu, G., Zeng, M., Jiang, Z., Yang, F., Cui, M., Zhu, L., Shen, L., Hu. 2014. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environmental International*, 73: 270-281.