

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“Cd, Pb, V Y Zn EN TEJIDO MUSCULAR DE *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758) DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO”

TESIS

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

PRESENTA

BIOL. MAR. ESTRELLA ALARCÓN REYES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JESÚS MONTOYA MENDOZA

CODIRECTOR:

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

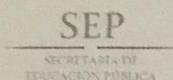
ASESORES:

DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

M. C. ROSA ELENA ZAMUDIO ALEMÁN

JUNIO, 2019

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Boca del Río

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Boca del Río, Ver., **03/Junio/ 2019**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**BIOL. ESTRELLA ALARCÓN REYES
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE**

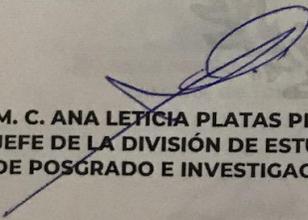
De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

"Cd, Pb, V Y Zn EN TEJIDO MUSCULAR DE *Pterois volitans* (LINNAEUS, 1758) DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO."

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

ATENTAMENTE

*Excelencia 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 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290
Tel: (01 229) 6995010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx | www.itboca.edu.mx



www.itboca.edu.mx/index.php/graficos/verano



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro **A-0501-2150817**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 15:00 horas del día 20 del mes de mayo 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:

"Cd, Pb, V Y Zn EN TEJIDO MUSCULAR DE *Pterois volitans* (LINNAEUS, 1758) DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO."

Que presenta el (la) alumno(a):

BIOL. ESTRELLA ALARCÓN REYES

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:

Dr. Jesús Montoya Mendoza
Director de Tesis

Dra. María del Refugio Castañeda Chávez
Co Director

Dra. Fabiola Lango Reynoso
Asesor

M.C. Rosa Elena Zamudio Alemán
Asesor



**“Cd, Pb, V Y Zn EN TEJIDO MUSCULAR DE *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758)
DEL PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO”**

RESUMEN

El Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) es el sistema arrecifal más impactado en el Golfo de México, pues se encuentra en una zona de desarrollo urbano, agrícola e industrial; además la presencia de la especie invasora *P. volitans* representa un riesgo para el equilibrio ecológico de este ecosistema, ya que este pez no tiene un depredador natural en la zona; lo que la convierte en un organismo que podría utilizarse como especie centinela o bioindicadora. Por lo cual, el presente trabajo tuvo como objetivo cuantificar la concentración de Cd, Pb, V y Zn en el tejido muscular de *P. volitans*. Se capturaron 30 organismos provenientes de los arrecifes Pájaros, Isla Verde, Isla de Sacrificios, Arrecife de Enmedio y Anegada de Afuera. La determinación de metales se llevó a cabo en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Thermo Scientific Modelo Ice 30500 AA System, equipado con lámparas de cátodo hueco, mediante el método de absorción atómica por flama. Las concentraciones siguieron el orden $V > Zn > Pb > Cd$. La concentración media de Cd fue de 0.0256 ± 0.0075 , Pb 0.6605 ± 0.0724 , V 7.3444 ± 0.6514 y Zn 0.6948 ± 1.2197 . No existieron diferencias significativas entre las concentraciones encontradas en los organismos capturados en arrecifes del norte y sur del PNSAV; además, no se observó una correlación significativa entre las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn encontradas en tejido muscular de *P. volitans* y las variables peso y longitud total de los organismos. La concentración media de Cd resultó por debajo del límite máximo permisible por la norma mexicana NOM-242-SSA1-2009; mientras que la concentración media de Pb resultó mayor a los límites establecidos en esta misma norma. No existen normas nacionales o internacionales que regulen el contenido de V y Zn en tejido muscular de peces, sin embargo, las concentraciones de estos dos metales resultaron menores a las reportadas en la zona. *P. volitans* podría considerarse como una opción para la realización de futuros trabajos de análisis de contaminación en el PNSAV, ya que se pueden realizar trabajos de monitoreo del Parque, al mismo tiempo que se colabora con el control de esta especie al elegirla como medio de estudio.

Palabras clave: Metales tóxicos, arrecife, *P. volitans*.

“Cd, Pb, V and Zn in muscular tissue of *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758) of the Veracruz Reef System National Park)”

ABSTRACT

The Veracruz Reef System National Park (PNSAV) is the most impacted reef system in the Gulf of Mexico, as it is located in an area of urban, agricultural and industrial development; In addition, the presence of the invasive species *P. volitans* represents a risk to the ecological balance of this ecosystem, since this fish does not have a natural predator in the area; which makes it an organism that could be used as a sentinel species. Therefore, the objective of this work was to quantify the concentration of Cd, Pb, V and Zn in the muscle tissue of *P. volitans*. 30 organisms from the reefs Pájaros, Isla Verde, Isla de Sacrificios, Arrecife de Enmedio and Anegada de Afuera were captured. The determination of metals was carried out in a Thermo Scientific Model Ice 30500 AA System atomic absorption spectrophotometer, equipped with hollow cathode lamps, by the method of atomic absorption by flame. The concentrations followed the order V > Zn > Pb > Cd. The average concentration of Cd was 0.0256 ± 0.0075 , Pb 0.6605 ± 0.0724 , V 7.3444 ± 0.6514 and Zn 0.6948 ± 1.2197 . There were no significant differences between the concentrations found in the organisms caught in the north and south reefs of the PNSAV; furthermore, no significant correlation was observed between the concentrations of Cd, Pb, V and Zn found in muscle tissue of *P. volitans* and the variables weight and total length of the organisms. The average concentration of Cd was below the maximum limit allowed by the Mexican norm NOM-242-SSA1-2009; while, the average concentration of Pb was higher than the limits established in this same norm. There are no national or international standards that regulate the content of V or Zn in fish muscle tissue, however, the concentrations of these two metals were lower than those reported in the area. *P. volitans* could be considered as an option for carrying out future pollution analysis work in the PNSAV, since it is possible to carry out monitoring works of the Park, at the same time that it collaborates with the control of this species when choosing it as a means of study.

Key words: Toxic metals, reef, *P. volitans*.

DEDICATORIA

A mi novio Jorge Cuevas Barradas, quien siempre me ha apoyado de manera incondicional en todo lo que me propongo. Te agradezco por estar presente en mis proyectos personales y profesionales, y sobre todo por ser sensible con la naturaleza y siempre colaborar conmigo para adoptar buenos hábitos que ayuden al cuidado del ambiente.

A mis sobrinas Sofía, Ana y Mariana gracias por darle alegría a mi vida y ser unas niñas tan lindas, las quiero muchísimo.

A mis compañeros de vida Bruno, Lore y Malao, quienes son mi inspiración y me ayudan a ver la vida de manera sencilla y genuina.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento de proyecto, clave: 6109.19-P.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca número 621796 que me fue otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Instituto Tecnológico de Boca del Río, por brindarme la oportunidad de estudiar este posgrado en sus instalaciones.

A mi director de tesis el Dr. Jesús Montoya Mendoza, gracias por su paciencia y dedicación para corregirme y orientarme durante la realización de esta tesis.

De igual manera, muchas gracias a mi codirectora la Dra. María del Refugio Castañeda Chávez, por sus observaciones para mejorar este trabajo.

A la Dra. Fabiola Lango Reynoso por sus observaciones y correcciones durante la revisión de esta tesis y durante las clases.

A la M.C. Rosa Elena Zamudio Alemán por toda su ayuda en el trabajo de laboratorio, donde me enseñó a llevar a cabo el análisis de mis muestras, siempre con una sonrisa.

Al Dr. Alfonso Vázquez Botello, por recibirme amablemente en las instalaciones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología durante mi estancia.

A la Dra. Susana Villanueva Fragoso, por los valiosos consejos que me dio durante mi estancia, los cuales me fueron de gran ayuda.

A mi amigo Ronaldo Desir, gracias por acompañarme durante estos dos años y apoyarme siempre.

También estoy muy agradecida con Ángel Roberto Reyes Aguilar, gracias por tus consejos para la realización de este trabajo.

A los pescadores del municipio de Antón Lizardo, que me facilitaron los organismos para este de estudio.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contaminación en el Golfo de México.....	1
1.2 Contaminación en Veracruz.....	2
1.3 Metales tóxicos	3
1.3.1 Dinámica de los metales en el océano y su impacto en peces	3
1.3.2 Cadmio.....	3
1.3.3 Plomo.....	4
1.3.4 Vanadio.....	4
1.3.5 Zinc	5
1.4 Contaminación en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.....	7
1.5 Características generales de <i>Pterois volitans</i>	11
2. ANTECEDENTES	12
2.1 Estudios de metales tóxicos realizados en <i>P. volitans</i>	12
2.2 Estudios de metales tóxicos realizados en el litoral veracruzano	14
2.3 Estudios de metales tóxicos realizados en el PNSAV	16
2.4 <i>P. volitans</i> : Especie invasora y especie centinela	18
3. JUSTIFICACIÓN	19
4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	20
5. HIPÓTESIS	20
6. OBJETIVOS.....	21
6.1 Objetivo general.....	21
6.2 Objetivos particulares	21
7. MATERIALES Y MÉTODOS	22
7.1 Área de colecta.....	22

7.2 Colecta	24
7.3 Toma de muestra y datos morfométricos	25
7.4 Procesamiento de las muestras	26
7.4.1 Secado de las muestras	26
7.4.2 Limpieza de material	26
7.4.3 Digestión en horno de microondas	27
7.4.4 Filtración.....	28
7.5 Lectura.....	29
7.6 Análisis estadístico	31
8. RESULTADOS	32
8.1 Puntos de descargas de aguas residuales en Veracruz-Boca del Río	32
8.2 Resultados generales	33
8.3 Resultados por sitio de colecta	35
8.3.1 Cadmio.....	39
8.3.2 Plomo.....	41
.....	41
8.3.3 Vanadio	42
8.3.4 Zinc	44
8.4 Comparación Zona Norte y Sur	45
8.4.1 Cadmio.....	45
8.4.2 Plomo.....	47
8.4.3 Vanadio.....	48
8.4.4 Zinc	50
8.5 Correlación	51
8.5.1 Peso Húmedo.....	51
8.5.2 Longitud Total.....	54
8.6 Dendograma de similitud de concentraciones.....	56
8.6.1 Cadmio.....	56
8.6.2 Plomo.....	57
8.6.3 Vanadio	58
8.6.4 Zinc	58
9. DISCUSIÓN	60

9.1 Cadmio	60
9.2 Plomo	62
9.3 Vanadio	63
9.4 Zinc.....	65
9.5 Concentraciones por arrecife	66
9.6 Correlación	67
10. CONCLUSIONES.....	68
11. REFERENCIAS.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. Los arrecifes sombreados representan las zonas de colecta. INEGI, 2016. Escala 1:50000. .	24
Figura 2. A) <i>P. volitans</i> recién capturado. B) <i>P. volitans</i> en bolsa hermética.	25
Figura 3. A) Longitud total. B) Peso húmedo.	25
Figura 4. Proceso de secado de muestras de tejido muscular de <i>P. volitans</i> . A) Muestras en báscula digital. B) Muestras dentro de horno de secado y esterilización.	26
Figura 5 . Vasos de digestión colocados sobre el rotor del microondas de digestión.	28
Figura 6. Filtración de muestras en bomba de vacío.	29
Figura 7. Lectura de muestras en espectrofotómetro de absorción atómica.	30
Figura 8. Puntos de descarga de aguas residuales y pluviales en Veracruz-Boca del Río. (Tomado de INEGI, 2016. Escala 1:50000).	32
Figura 9. Gráfica de concentraciones individuales de Cd, Pb, V y Zn en tejido muscular de <i>P. volitans</i> capturado en el PNSAV.	34
Figura 10. Gráfica de caja de Cd, Pb, V y Zn. Letras distintas indican diferencias significativas para la prueba de Tukey ($p < 0.05$). El traslape de los valores de Pb y Zn está marcado por las letras B.	35
Figura 11. Distribución espacial de los metales encontrados en tejido muscular de <i>P. volitans</i> . El tamaño del círculo es proporcional al número total de organismos analizados en cada arrecife de colecta. El color representa la concentración de los metales analizados.	37
Figura 12. Concentración media de Cd en tejido muscular de <i>P. volitans</i> colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000.	37
Figura 13. Concentración media de Pb en tejido muscular de <i>P. volitans</i> colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000.	38
Figura 14. Concentración media de V en tejido muscular de <i>P. volitans</i> colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000.	38

Figura 15. Concentración media de Zn en tejido muscular de *P. volitans* colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000. 39

Figura 16. Concentración de Cd en los organismos de *P. volitans* capturados en arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, C, Letras compartidas no presentan diferencias significativas entre los grupos de datos. 40

Figura 17. Concentración de Cd por individuo registradas en músculo de *P. volitans* en los arrecifes del PNSAV..... 40

Figura 18. Concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, C, D, E, letras no compartidas presentan diferencias significativas entre los grupos de datos. 41

Figura 19. Concentración de Pb por organismo capturado de *P. volitans* en los arrecifes del PNSAV..... 42

Figura 20. Concentración de V en tejido muscular de *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, C, D, E, letras compartidas no presentan diferencias significativas entre los grupos de datos. 43

Figura 21. Concentración de V por organismos colectado en tejido muscular de *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV. 43

Figura 22. Concentración de Zn en *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, letras compartidas no presentan diferencias significativas entre los grupos de datos. 44

Figura 23. Concentración de Zn en valores individuales encontrada en tejido muscular de *P. volitans* capturado en los arrecifes del PNSAV. 45

Figura 24. Concentración de Cd en tejido muscular de *P. volitans*. Comparación entre organismos colectados en la zona norte y sur del PNSAV. 46

Figura 25. Valores individuales de la concentración de Cd en los organismos analizados de *P. volitans* capturados en los arrecifes de la zona norte y sur del PNSAV..... 46

Figura 26. Concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans* capturado en los arrecifes de la zona norte y sur del PNSAV. 47

Figura 27. Valores individuales de la concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans*, donde se comparan las concentraciones encontradas en los organismos capturados en los arrecifes del norte y el sur del PNSAV..... 48

Figura 28. Concentraciones de V en tejido muscular de *P. volitans* comparadas entre los organismos capturados en arrecifes del norte y sur del PNSAV..... 49

Figura 29. Valores individuales de la concentración de V encontrada en organismos de *P. volitans* capturados en la zona norte y sur del PNSAV..... 49

Figura 30. Concentración de Zn en músculo de *P. volitans* donde se comparan las concentraciones de los organismos capturados en los arrecifes del norte y del sur del PNSAV..... 50

Figura 31. Valores individuales de la concentración de Zn en tejido muscular de *P. volitans* capturado en los arrecifes del norte y sur del PNSAV 51

Figura 32. Correlación el entre peso y la concentración de Cd en tejido muscular de *P. volitans*..... 52

Figura 33. Correlación entre peso y concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans*. 52

Figura 34. Correlación entre el peso de *P. volitans* y la concentración de V en los diferentes organismos analizados..... 53

Figura 35. Correlación de las variables peso y concentración de Zn en tejido muscular de *P. volitans*. 53

Figura 36. Correlación entre la concentración de Cd en tejido muscular de *P. volitans* y su longitud total..... 54

Figura 37. Correlación entre la concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans* y su longitud total..... 55

Figura 38. Correlación entre la longitud total de *P. volitans* y la concentración de V encontrada en su tejido muscular..... 55

Figura 39. Correlación de Zn en tejido muscular de *P. volitans* y su longitud total..... 56

Figura 40. Dendograma de similitud de las concentraciones de Cd en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S). 57

Figura 41. Dendograma de similitud entre las concentraciones de Pb en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S).57

Figura 42. Dendograma de similitud entre las concentraciones de V en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S).58

Figura 43. Dendograma de similitud entre las concentraciones de Zn en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S).59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes y formas de desecho de Cd, Pb, V y Zn en el ambiente. (Modificada de Adriano, 2001; Sparks, 2005; ATSDR, 2012).....	6
Tabla 2. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río-Medellín. (Tomado de CONAGUA, 2015).....	8
Tabla 3. Factores antropogénicos que son fuentes de contaminación al PNSAV (Tomado de Ortiz-Lozano <i>et al.</i> , 2018).....	10
Tabla 4. Concentración media e intervalo de Cd, Pb, V, Zn y Hg reportados en tejido muscular de <i>Pterois volitans</i>	14
Tabla 5. Concentración media e intervalo de Cd, Pb, V y Zn reportado en el litoral veracruzano.....	15
Tabla 6. Concentración media e intervalo de Cd, Pb, V y Zn reportado en el PNSAV.....	18
Tabla 7. Parámetros del Método Soil-3051 HP-500 para programación de Microondas MARS X CEM.	28
Tabla 8. Límite máximo permisible para pescados frescos, refrigerados y congelados (parte comestible).....	31
Tabla 9. Concentración media, desviación estándar e intervalos mínimos y máximos de los elementos analizados en el tejido muscular de <i>P. volitans</i>	33
Tabla 10. Datos generales de muestras de <i>P. volitans</i> analizadas.	34
Tabla 11. Correlación (r) de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn encontradas en músculo de <i>P. volitans</i> y el peso de los organismos.	51
Tabla 12. Correlación (r) de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn y la longitud total de <i>P. volitans</i>	54

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contaminación en el Golfo de México

Los océanos del mundo están sometidos a una presión cada vez mayor procedente de las actividades humanas, como la contaminación por metales tóxicos, la minería y la explotación de petróleo y gas en alta mar. Debido a la naturaleza única y compleja de los ecosistemas marinos, los efectos de las actividades humanas no se conocen plenamente (FAO, 2016). Sin embargo, se ha registrado que las presiones antropogénicas a las que están expuestos afectan su biodiversidad y diversidad funcional (Francisco y De la Cueva, 2017). Alrededor del 75% de la contaminación marina global es producto de las actividades humanas que tienen lugar en la superficie terrestre y un 90% de los contaminantes son transportados por los ríos al mar (Escobar, 2002).

El Golfo de México constituye una de las áreas que se encuentra en alto riesgo por la contaminación, debido a la gran actividad industrial que se lleva a cabo en su litoral (Beltrán *et al.*, 2005). Recibe grandes volúmenes de desechos tóxicos incluyendo metales, hidrocarburos del petróleo, derrames de aceites y contaminantes orgánicos persistentes como plaguicidas, dioxinas, DDT y PCB (Turner y Rabalais, 2019). Las actividades industriales y comerciales que se efectúan en los grandes complejos portuarios de Brownsville, Corpus Christi, Houston y Galveston en los Estados Unidos de América y los de Tampico-Madero, Altamira, Veracruz, Alvarado, Coatzacoalcos, Dos Bocas y Ciudad del Carmen en México, son fuentes potenciales de contaminantes al medio marino y costero en el Golfo de México (Vázquez-Botello *et al.*, 2004).

La mayoría de los metales son ampliamente utilizados en las diversas ramas de la industria en la región costera del Golfo de México, incluidas las del refinado del petróleo y la producción de fertilizantes. Las actividades mineras constituyen otra

de las fuentes principales de suministro de metales, debido a que se localizan más de cincuenta centros mineros en esta zona. Adicionalmente, los efluentes domésticos son otra fuente importante al aportar hacia los ríos descargas enriquecidas de Ni, Cr, Cu, Pb, Zn, Cd y Ag (Páez-Osuna, 2005).

1.2 Contaminación en Veracruz

En el litoral veracruzano la zona con mayor índice de contaminación es la cuenca baja del río Coatzacoalcos y Tonalá, debido a los abundantes drenes industriales y petroleros. En la zona norte, en las lagunas de Tampamachoco, Pueblo Viejo y Tamiahua, se considera que existe una contaminación crítica por HPAs, Pb, Cd y Cr (Sobrino-Figueroa *et al.*, 2005). En el estado existen seis plantas petroquímicas (Cosoleacaque, Cangrejera, Minatitlán, Morelos, Pajaritos y Poza Rica), las cuales elaboran productos petrolíferos y petroquímicos. También en la zona litoral se encuentran tres importantes campos petroleros (Agua Dulce, Poza Rica y Veracruz) donde se producen barriles de petróleo y gas natural que impactan el ambiente con sus desechos (Mendoza-Cantú *et al.*, 2010).

Otra fuente de contaminación en el estado de Veracruz son los desechos urbanos e industriales; en los 212 municipios del estado, existen 325 puntos de descargas de aguas residuales sin tratamiento, que son vertidas en su mayoría a ríos y arroyos (INEGI, 2014). En 2016 se descargaron 2 712.52 millones de m³ de aguas residuales industriales a diferentes cuerpos de agua (INEGI, 2017). Los desechos sólidos urbanos también son un grave problema, ya que no son separados y se arrojan sin conocer su contenido tóxico. En 2015 se generaron 2 millones 355 mil toneladas de basura en el estado, de los cuales Boca del Río generó 51 mil y Veracruz 256 mil toneladas. Además, el territorio veracruzano cuenta con una superficie total de terreno dedicado a la agricultura de 2 281 184.2 hectáreas, lo que implica la posibilidad de otra fuente de contaminación a través del uso de pesticidas y fertilizantes (INEGI, 2016).

1.3 Metales tóxicos

Entre los contaminantes más estudiados en el ambiente costero están los metales tóxicos, que pueden ser subdivididos en dos categorías: (1) metales de transición, tales como el cobalto, cobre, manganeso y zinc, los cuales son esenciales para el metabolismo en bajas concentraciones, pero pueden ser tóxicos en concentraciones elevadas; y (2) los metales y metaloides, tales como el plomo, cadmio, mercurio, arsénico, selenio y estaño, los cuales generalmente no son requeridos para el metabolismo y son tóxicos en bajas concentraciones.

1.3.1 Dinámica de los metales en el océano y su impacto en peces

Los metales entran al océano costero a través de diversas rutas, mayormente, a través del aporte fluvial, atmosférico, depositación y numerosas actividades antropogénicas (Páez-Osuna, 2005). Las concentraciones de metales en los vertebrados marinos se deben a la regulación del organismo o a la biodisponibilidad del metal (Millward y Turner, 2018)

1.3.2 Cadmio

El cadmio (Cd) se encuentra en la corteza terrestre asociado con minerales de zinc, plomo y cobre. Es un elemento no esencial para los sistemas biológicos y se puede encontrar presente como contaminante en los alimentos, agua o aire (Repetto, 1995). Por lo general está presente en el medio ambiente en niveles bajos, sin embargo, la actividad humana ha incrementado considerablemente esos niveles. El cadmio puede recorrer grandes distancias desde la fuente de emisión a través del aire. Se acumula rápidamente en muchos organismos, principalmente moluscos y crustáceos (WHO, 2010). En peces se ha encontrado que, en altas concentraciones, el Cd produce un aumento en los niveles de cortisol, lo que podría estar asociado con la disminución en la fagocitosis, además de provocar daños renales (Vargas *et al.*, 2012).

En humanos ingerir alimentos o tomar agua con niveles de Cd muy altos produce irritación grave del estómago, lo que produce vómitos y diarrea, daño en el riñón y en ciertas ocasiones la muerte. La exposición a bajos niveles de cadmio durante un período prolongado puede aumentar la fragilidad de los huesos de manera que se pueden quebrar fácilmente. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el cadmio es carcinogénico en seres humanos (ATSDR, 2012).

1.3.3 Plomo

El plomo (Pb) es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre; su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública. Entre las principales fuentes de contaminación ambiental destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y en algunos países, el uso persistente de pinturas y gasolinas con plomo. La OMS ha incluido el plomo dentro de una lista de diez productos químicos causantes de graves problemas de salud pública, por lo tanto, sugiere que no existen concentraciones de Pb que puedan considerarse seguras (WHO, 2018). Para que se desarrolle una intoxicación por plomo, no es necesaria una exposición aguda importante (Azcona-Cruz *et al.*, 2015).

En peces se ha demostrado que el Pb en concentraciones elevadas causa lesiones histopatológicas de las branquias, alteraciones temporales en la regulación del sodio e hiperglucemia asociada a la disminución de los lípidos y las proteínas (Martinez *et al.*, 2004).

1.3.4 Vanadio

El vanadio (V) se encuentra en 68 minerales diferentes, en los combustibles derivados del petróleo y el carbón y se utiliza principalmente en la industria

metalúrgica. Está relacionado con la contaminación por derrames de lodo y perforación en la industria petrolera (García-Cuéllar, 2004). En peces altas concentraciones de V puede provocar el incremento del nivel de glucosa en hígado, músculo y riñón, siendo los tejidos renales los más afectados. Además, provoca cambios en los parámetros bioquímicos del músculo hepático y renal (Bikkini y Nanda, 2016). Para los humanos, la principal fuente de exposición al V es la contaminación atmosférica producida por la quema de combustibles. Los efectos toxicológicos de preocupación para las personas son la genotoxicidad y la irritación de las vías respiratorias (García-Graciela, 2006).

1.3.5 Zinc

El zinc (Zn) es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. Se encuentra en el aire, el suelo, el agua y está presente en todos los alimentos. Tiene muchos usos comerciales como revestimiento para prevenir corrosión, en compartimientos de baterías y mezclado con otros metales para fabricar aleaciones como el latón y bronce. Algunos compuestos comunes de Zn que se encuentran en sitios de desechos peligrosos incluyen cloruro de zinc, óxido de zinc, sulfato de zinc y sulfuro de zinc. En humanos el Zn es un elemento esencial en la dieta, ingerir muy poco puede causar problemas, pero demasiado Zn también es perjudicial. La ingestión de grandes cantidades aun brevemente, puede causar calambres estomacales, náusea y vómitos. Si se ingieren grandes cantidades durante un período más prolongado puede causar anemia y disminución de los niveles del tipo de colesterol que es beneficioso (ATSDR, 2016). La toxicidad por Zn también incluye clorosis, inhibición de la fijación de CO₂ y crecimiento reducido en las plantas (Haslett *et al.*, 2001).

El Zn se puede acumular en los cuerpos de los peces, cuando viven en aguas contaminadas con este metal. Puede causar daños en su crecimiento, así como acumulación en las branquias, lo que provoca problemas en la respiración, que pueden causar la muerte. El Zn se considera muy peligroso debido a su persistencia

casi ilimitada en el medio ambiente, ya que se transforma de un estado de oxidación o complejo orgánico a otro y no puede ser destruido biológicamente. El Zn es un metal potencialmente tóxico para los peces, ya que causa alteraciones de la regulación ácido-base e iónico, alteración del tejido de las branquias e hipoxia (Afshan *et al.*, 2014). En la Tabla 1 se muestran las diferentes maneras en las que los metales Cd, Pb, V y Zn entran al ambiente y sus formas más comunes de desechos.

Tabla 1. Fuentes y formas de desecho de Cd, Pb, V y Zn en el ambiente. (Modificada de Adriano, 2001; Sparks, 2005; ATSDR, 2012).

Elemento	Fuente natural o minerales metálicos	Fuente antropogénica	Formas comunes en desechos
Cd	Minerales de carbonato y sulfuro de zinc, carbonato y sulfuro de cobre	Minería y fundición, acabado de metales, industria del plástico, microelectrónica, fabricación de pilas, vertederos y eliminación de desechos, fertilizantes de fosfatos, depuración de lodos, chatarra	Iones Cd^{2+} , halogenuros y óxidos Cd, complejos Cd-CN, lodos $Cd(OH)_2$
Pb	Galena (PbS)	Minería y fundición, industria siderúrgica, refinerías, industria de pinturas, escapes automotrices, plomería, manufactura de baterías, depuración de lodos, vertederos y eliminación de desechos, pesticidas	Pb metálico, óxidos y carbonatos de Pb, complejos de metal-oxianión de Pb
V	Patronita (sulfuro de vanadio), descloizita (vanadato de plomo-zinc), vanadinita, roscolita y carnotita	Petróleo crudo, depósitos de gases de combustión de los hornos caldeados con petróleo, ferrovanadio	Pentóxido de vanadio, los óxidos de vanadio
Zn	Esfalerita (ZnS), willemita (Zn_2SiO_4), smithsonita ($ZnCO_3$)	Minería y fundición, acabado de metales, textiles, microelectrónica, vertederos y eliminación de desechos, industria pirometalúrgica, depuración de lodos, pesticidas, chatarra	Zn metálico, iones Zn^{+2} , óxidos y carbonatos de Zn, aleaciones

1.4 Contaminación en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano

El sistema arrecifal más impactado en el Golfo de México es el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), ya que se encuentra en una de las zonas con mayor desarrollo urbano, agrícola e industrial del país. La zona coralina está situada junto a la ciudad costera más grande de México y por el Parque atraviesan los barcos del que es también el puerto más grande del país; con un tráfico anual de entre 1809 y 1505 buques. Las actividades portuarias del área provocan la resuspensión de sedimentos finos y además eventuales derrames de hidrocarburos y otras sustancias nocivas (Pérez-España, 2015). A la zona portuaria se le atribuye una fuerte presión hacia el parque; las operaciones de los buques emiten en su mayoría CO₂, NO_x y SO₂ a la atmósfera (Tami-Pimiento, 2013) y con el aumento en la extensión del Puerto, los daños a los arrecifes incrementarán (Valadez-Rocha y Ortiz-Lozano, 2013). Sin embargo, a pesar de las presiones antropogénicas que sufre, es carente aún de un programa de manejo que asegure la estabilidad del ecosistema (Jiménez-Badillo *et al.*, 2014). Además, el PNSAV tiene una fuerte influencia continental por las descargas de los ríos Jamapa, Papaloapan y La Antigua, las cuales aportan un escurrimiento natural superficial en promedio de 2,055, 42,887 y 2,145 millones de m³ al año, respectivamente. Las descargas fluviales acarrearán gran cantidad de diversos tipos de contaminantes urbanos, agrícolas e industriales, que son liberados en la cuenca de captación de estos sistemas fluviales, lo que, aunado a los escurrimientos directos de ciudades y pueblos a lo largo de las costas, da como resultado un ambiente marino litoral muy contaminado que alcanza las zonas arrecifales (Horta- Puga y Barba-Santos, 1999).

Los desechos sólidos del basurero de Veracruz han sido reportados como fuente de contaminación para metales como Ni, Cu, Zn y Cr⁶⁺ a través de los lixiviados. El basurero ha rebasado su capacidad y no tiene un plan de manejo, por lo que se encuentra colapsado emanando lixiviados directamente a un canal que los lleva al norte hacia el río Grande, el cual desemboca en la Bahía de Vergara en el PNSAV, poniendo en peligro la vida de la biota acuática (Susunaga-Miranda y Estévez-

Garrido, 2018). Otra fuente potencial de contaminación de metales tóxicos en la zona conurbada de Veracruz-Boca del Río-Medellín, son las 34 plantas de tratamiento de aguas residuales que existen, las cuales liberan las aguas tratadas a diferentes cuerpos de agua como arrollo Moreno, río Jamapa, o directamente al mar (CONAGUA, 2015), y no todas cuentan con un tratamiento eficiente por falta de mantenimiento o tecnología (CSVA, 2006) (Tabla 2).

Tabla 2. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río-Medellín. (Tomado de CONAGUA, 2015).

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Tratado	Cuerpo receptor o reúso
Alvarado	Antón Lizardo	Fracc. Buenavista	Rafa, Wasb+Humedal	3.0	3.0	Infiltración
Boca del Río	Boca del Río	U.H. Costa de Oro	Lodos Activados	152.7	152.7	Golfo de México
Boca del Río	Veracruz	Venustiano Carranza	Lodos Activados	230.0	200.0	Canal la Zamorana-Arrollo Moreno
Medellín	Medellín	18 de Marzo Playa de Vaca	Lodos Activados	4.2	4.2	Río Jamapa
Medellín	Medellín	Arboledas San Ramón	Lodos Activados	48.0	35.0	Arroyo Moreno
Medellín	Medellín	Desarrollo Habitacional Casa Blanca	Lodos Activados	12.0	10.7	Río Jamapa
Medellín	Medellín	Fracc. Puente Moreno	Lodos Activados	68.0	23.0	Arroyo Moreno
Medellín	Medellín	Palmas de Medellín	Lodos Activados	13.0	6.0	Río Jamapa
Medellín	Medellín	Rodríguez Alcaine	Biológico	7.5	1.3	Río Jamapa
Veracruz	Las Bajadas	Las Bajadas	Lodos Activados	37.0	20	Canal Dren F
Veracruz	Matacocuite	Matacocuite I	Lodos Activados	70.0	25.0	Canal Matacocuite
Veracruz	Veracruz	Condado Valle Dorado	Lodos Activados	16.0	8.0	Río Medio
Veracruz	Veracruz	Conjunto Residencial Torres Arrecifes	Lodos Activados	5.0	5.0	Mar/ riego de áreas verdes
Veracruz	Veracruz	GEO Villas del Puerto	Lodos Activados	60.0	45.0	Canal Dren F
Veracruz	Veracruz	GEO Villas del Sol	Lodos Activados	6.5	6.5	Canal pluvial
Veracruz	Veracruz	GEO Villas Los Pinos	Lodos Activados	150.0	70.0	Laguna artificial Geo Los Pinos
Veracruz	Veracruz	La Florida	Lodos Activados	27.0	27.0	Infiltración en rancho de la UV
Veracruz	Veracruz	Laguna Real	Lodos Activados	25.0	25.0	Laguna Olmecca
Veracruz	Veracruz	Las Palmas	Lodos Activados	30.0	30.0	Laguna Olmecca-Canal La Zamorana

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Veracruz	Veracruz	Lomas del Coyal	Lodos Activados	20.0	15.0	Laguna Innominada
Veracruz	Veracruz	Los Torrentes	Lodos Activados	81.0	56.0	Río Medio
Veracruz	Veracruz	Los Volcanes	Lodos Activados	40.0	40.0	Eje Hidráulico afluente Río Medio
Veracruz	Veracruz	Matacoquite	Lodos Activados	70.0	35.0	Arroyo sin nombre
Veracruz	Veracruz	Nuevo Veracruz	Lodos Activados	58.0	58.0	Canal de Alejamiento
Veracruz	Veracruz	Pescadería	Lodos Activados	1.0	1.0	Arrollo El Cable
Veracruz	Veracruz	Playa Norte	Filtros Biológicos o Rociadores o Percoladores	1600.0	1600.0	Mar
Veracruz	Veracruz	Residencial Campestre	Lodos Activados	4.0	4.0	Canal pluvial
Veracruz	Veracruz	U.H. Chiverias	Tanque Imhoff	28.0	11.0	Laguna sin nombre
Veracruz	Veracruz	U.H. La Floresta No. 1	Lodos Activados	75.0	62.8	Canal de La Zamorana
Veracruz	Veracruz	U.H. Las Vegas	Lodos Activados	20.9	20.9	Canal de La Zamorana
Veracruz	Veracruz	U.H. Lomas del Coyal	Lodos Activados	20.0	20.0	Laguna La Ilusión
Veracruz	Veracruz	U.H. Río Medio	Lagunas Aireadas	120.0	120.0	Río Medio
Veracruz	Veracruz	U.H. Valle Dorado	Anaerobio	17.0	4.2	Río Medio
Veracruz	Veracruz	U.H. Las Hortalizas	Filtros Biológicos o Rociadores Percoladores	17.2	17.2	Río Medio

Por otro lado, el PNSAV enfrenta otro problema ecológico: la llegada del pez león (*Pterois volitans*) a este sistema arrecifal. Este pez fue observado por primera vez en el PNSAV, en el arrecife Anegada de Adentro en 2012 (Santander-Monsalvo *et al.*, 2012). El pez león representa un riesgo para el ecosistema, pues se trata de una especie exótica que ha causado grandes pérdidas en la abundancia de las comunidades nativas de peces de tallas pequeñas en los arrecifes donde se ha introducido como especie invasora (Black *et al.*, 2014). Además, el aumento poblacional de *Pterois volitans* puede perturbar las redes tróficas que soportan valiosa pesca comercial y recreativa en la zona (Chagaris *et al.*, 2017).

La siguiente tabla engloba las problemáticas generales de origen antropogénico que aportan algún tipo de contaminación al PNSAV (Tabla 3).

Tabla 3. Factores antropogénicos que son fuentes de contaminación al PNSAV (Tomado de Ortiz-Lozano *et al.*, 2018).

Tipo de Daño	Problemática Ambiental	Fuentes
Daño Físico	Sedimentación en los arrecifes	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentos transportados por los ríos y lagunas • Tormentas • Nutrientes acarreados por los ríos • Contaminación por materia orgánica • Metales pesados acarreados por los ríos • Descarga de aguas residuales no tratadas o con tratamiento incompleto, proveniente de las cuencas de los ríos • Descarga de agua de lastre de barcos y cruceros • Dragado del muelle • Descarga de aguas de sentina por las embarcaciones • Construcción y mantenimiento de los canales • Residuos de agua y desechos de la planta nucleoelectrónica
Procesos de contaminación	Introducción de especies exóticas	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción de especies por tráfico portuario • Descarga de agua lastre de barcos y cruceros
	Contaminación por agroquímicos	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia y consecuente escurrimiento de agroquímicos proveniente de los ríos • Descarga de aguas residuales no tratadas o con tratamiento incompleto, proveniente de las cuencas de los ríos
	Contaminación por coliformes fecales	<ul style="list-style-type: none"> • Descarga de aguas residuales no tratadas o con tratamiento incompleto, proveniente de las cuencas de los ríos • Descarga de agua de lastre de barcos y cruceros
	Contaminación por petróleo y sus derivados	<ul style="list-style-type: none"> • Derrames accidentales de hidrocarburos en el área de influencia del sistema arrecifal • Petróleo y subproductos transportados por corrientes marinas • Derrame accidental de combustible por pequeñas embarcaciones • Derrames accidentales de combustible de los botes • Descarga de aguas de sentina por las embarcaciones
	Contaminación por materia orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Descarga de aguas residuales no tratadas o con tratamiento incompleto, proveniente en las cuencas de los ríos • Descarga de agua de lastre de barcos y cruceros • Nutrientes acarreados por los ríos • Residuos de vísceras de peces y moluscos • Deforestación de manglares y territorios aledaños.
	Contaminación a partir de residuos sólidos (basura y otros)	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos sólidos provenientes de los ríos y lagunas aledañas • Residuos sólidos generados por turistas y pobladores locales • Residuos sólidos generados en zonas urbanas y metropolitanas • Residuos sólidos generados en los puertos • Residuos sólidos generados por los buques y embarcaciones
	Contaminación por desechos industriales	<ul style="list-style-type: none"> • Desechos industriales provenientes de los ríos (Ingenio la Gloria) • Residuos de agua y desechos de la planta nucleoelectrónica
	Contaminación por metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> • Desechos industriales provenientes de los ríos • Descarga de aguas de sentina por las embarcaciones

1.5 Características generales de *Pterois volitans*

Pterois volitans es una especie marina, que vive asociada a los arrecifes coralinos, en profundidades de 2 a 55 metros, habita en climas tropicales en un rango de temperatura de 22°C - 28°C. Su distribución natural es en el Océano Pacífico en las Islas Cocos-Keeling, Australia Occidental, en el Océano Índico Oriental, Japón y el Sur de Corea. Tiene 13 espinas dorsales, 9-12 radios dorsales blandos, 3 espinas anales, 6-8 radios anales blandos y sus escamas son cicloides. Varían en color, generalmente en relación con el hábitat. Sus espinas dorsales son venenosas. A menudo son solitarios, se esconden en lugares no expuestos durante el día y cazan peces pequeños, gambas y cangrejos en la noche, usando sus aletas pectorales extendidas con las que atrapan a su presa acorralándola, aturdiéndola y luego tragándola de un solo golpe. (Fishbase, consultada 2018). En el Caribe, donde es considerado una especie invasora, se ha reportado que su alimentación consta principalmente de peces de las familias Gobiidae y Apogonidae (Ritger *et al.*, 2018).

En el PNSAV la dieta de *P. volitans* es heterogénea y consta de 18 taxa de peces que incluyen: *H. burekae*, Apogonidae, *Haemulon aurolineatum*, *Stegastes adustus*, *Rhomboplites aurorubens*, *Chromis* sp., *Pempheris schomburgkii*, *Ophioblennius atlanticus*, *Thalassoma bifasciatum*, *Labrisomus* sp., *Stegastes variabilis*, *Synodus intermedius*, *Halichoeres bivittatus*, *Centropyge argi*, *Stegastes planifrons*, y crustáceos decápodos (Caridea y otros camarones). El tipo de dieta del pez león en el PNSAV es especialista, basada en el pez endémico del Golfo de México, *H. burekae* (Acevedo-Lezama, 2015).

2. ANTECEDENTES

2.1 Estudios de metales tóxicos realizados en *P. volitans*

La mayoría de los trabajos realizados sobre la concentración de metales pesados en *P. volitans*, han estado enfocados a la concentración de HgT en el tejido muscular de este organismo (Huge *et al.*, 2013; Tremain y O'Donnell, 2014; Reyes-Aguilar, 2018), pues al ser una especie invasora, se considera que su consumo puede ayudar a controlar su crecimiento poblacional en los arrecifes (Chapman *et al.*, 2016; Carrillo-Flota y Aguilar-Perera, 2017); y se sabe que el consumo de pescado contribuye significativamente a la exposición humana a los elementos traza tóxicos como el metilmercurio, volviéndolo la principal fuente de este contaminante para los seres humanos (Minganti *et al.*, 2010). Sin embargo, existen otros trabajos en donde se ha analizado la concentración de diferentes metales tóxicos en pez león, ya que el estudio de este organismo también brinda la posibilidad de obtener información de las concentraciones de contaminantes que pueden dañar la biota de los arrecifes y al ser humano.

Huge *et al.* (2013) analizaron la concentración de HgT de 107 muestras de tejido muscular de *P. volitans* capturados en Keys National Marine Sanctuary, Florida, EUA, con el fin de establecer si era seguro su consumo como medida de control para esta especie invasora. Las concentraciones de HgT detectados no rebasaron los límites máximos establecidos por la WHO (World Health Organization) y la FDA (Food and Drug Administration).

En un trabajo realizado en Jamaica por Hoo Fung *et al.* (2013) analizaron la exposición dietética de *P. volitans* con respecto a la ingesta de la población a las concentraciones de As, Ba, Br, Ca, Cd, Ce, Cr, Cs, Cu, Eu, Fe, Hg, K, La, Mg, Mn, Na, Pb, Rb, Sc, Se, Sm, Sr, Th, Zn. Se analizaron 25 muestras de tejido muscular de *P. volitans* y los resultados demostraron que, desde un punto de vista de nutrición elemental, *P. volitans* es seguro para el consumo humano, ya que no representa un

riesgo significativo a la exposición de elementos tóxicos; además contribuye modestamente a la nutrición de minerales y oligoelementos. Los autores señalaron que sólo una muestra resultó alta en la concentración de Cd con $8.70 \mu\text{g kg}^{-1}$, considerando que la World Health Organization (WHO) estableció la ingesta semanal tolerable provisional (PTWI) para cadmio de $7 \mu\text{g kg}^{-1}$.

Tremain y O'Donnell (2014) analizaron 260 muestras de tejido muscular de pez león colectado a lo largo del Golfo de México de Florida y Costas del Atlántico, encontraron que las concentraciones detectadas de HgT no rebasaron el límite máximo establecido para el consumo humano.

En tanto, Ritger *et al.* (2018) examinaron 25 organismos de pez león para obtener la concentración de diferentes metales pesados en la isla Curazao, al sur del Caribe. Reportaron que el pez león es seguro para el consumo humano ya que las concentraciones de HgT estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles (0.5 mg kg^{-1}) por la WHO (World Health Organization).

Por su parte, Reyes-Aguilar (2018) analizó la concentración de Pb > Cd > Cr > Hg (patrón de concentración) en 52 muestras de tejido muscular de *P. volitans* en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. En este trabajo, los niveles promedios de Cd, Cr y Pb excedieron los límites permisibles de legislaciones internacionales, por lo cual señaló que existe un posible riesgo a la salud pública si es consumido.

La siguiente tabla muestra las concentraciones de Cd, Pb, V, Zn y Hg reportadas en tejido muscular de *P. volitans* en diferentes trabajos (Tabla 4).

Tabla 4. Concentración media, desviación estándar e intervalo de Cd, Pb, V, Zn y Hg reportados en tejido muscular de *Pterois volitans*.

Lugar	Especie	Media ± DE (Intervalo) (mg kg ⁻¹)					Referencia
		Cd	Pb	V	Zn	Hg	
Jamaica	<i>P. volitans</i> (n=25)	0.00442 ± 0.00089 (<0.00424 -0.0087)	0.0203± 0.03256 (<0.0138 -0.177)	NA	4.46 ± 0.605 (3.55–5.76)	0.04 ± 0.01 (0.016-0.061)	Hoo Fung <i>et al.</i> , 2013
Florida Keys National Marine Sanctuary, EUA.	<i>P. volitans</i> <i>P. miles</i> (n=107)	NA	NA	NA	NA	0.13 ± 0.08 (0.03-0.48)	Huge <i>et al.</i> , 2013
Costa de Florida, EUA	<i>P. volitans</i> <i>P. miles</i> (n=260)	NA	NA	NA	NA	0.069 ± 0.050 (0.012-0.336)	Tremain y O'Donnell, 2014
Curazao	<i>P. volitans</i> <i>P. miles</i> (n=25)	ND	ND-0.0074	ND	2.829 ± 0.4955 (1.991- 3.929)	0.026 ± 0.017 (0.008-0.106)	Ritger <i>et al.</i> , 2018
Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano	<i>P. volitans</i> (n=52)	0.1430± 0.1349 (0.002- 0.51)	0.3284± 0.2996 (0.001- 0.87)	NA	NA	0.0466±0.052 (0.001-0.21)	Reyes-Aguilar, 2018

n, número de peces examinados; ± DE, desviación estándar; NA, no analizado; ND, no detectado.

2.2 Estudios de metales tóxicos realizados en el litoral veracruzano

Se han realizado diversos estudios con respecto a la concentración de metales tóxicos en el litoral veracruzano. Mendoza-Díaz *et al.* (2013) analizaron la concentración de Hg, Pb, Cd, Cr y As en 19 muestras de hígado de *Carcharhinus limbatus* capturado en la laguna de Tamiahua. Los autores señalan que las muestras analizadas no rebasaron los límites máximos permisibles por las leyes mexicanas. Al igual que en el trabajo realizado por Núñez-Nogueira (2005), quien evaluó las concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Se y Zn en branquias, hígado, cerebro y músculo de 42 organismos de *Carcharhinus limbatus* y *Rhizoprionodon terraenovae* capturados en playa Chachalacas y el Puerto de Veracruz.

Por otro lado, también se han analizado las concentraciones de diferentes metales en sedimentos (núcleos) en las costas del río la Antigua, Jamapa y en la Laguna de Alvarado (Celis-Hernández *et al.*, 2017; Botello *et al.*, 2018).

Susunaga-Miranda y Estévez-Garrido (2018) encontraron que las concentraciones medias de Ni, Cu, Zn, Cr6+ provenientes de lixiviados del basurero de Veracruz no sobrepasan los límites máximos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, sin embargo, este estudio confirmó la presencia de estos contaminantes en el basurero, los cuales eventualmente podrían llegar por medio de la descarga del río Grande al PNSAV.

La siguiente tabla muestra las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn reportadas en el litoral veracruzano en sedimento, agua y diferentes organismos (Tabla 5).

Tabla 5. Concentración media, desviación estándar e intervalo de Cd, Pb, V y Zn reportado en el litoral veracruzano.

Lugar	Muestra	Media \pm DE (Intervalo) mg kg ⁻¹				Referencia
		Cd	Pb	V	Zn	
Playa Chachalacas y Veracruz	<i>C. limbatus</i> <i>R. terraenovae</i> (Músculo)	0.34 \pm 0.13	2.91 \pm 2.16	NA	27.94 \pm 23.35	Núñez-Nogueira, 2005
Laguna de Tamiahua	<i>C. limbatus</i> (Hígado)	0.214 (0.282-0.434)	ND	NA	NA	Mendoza-Díaz <i>et al.</i> , 2013
Zona costera del río La Antigua	Sedimento	NA	5-16.5	60.25-89.6	76.6-88.9	Celis-Hernández <i>et al.</i> , 2017
Zona costera del río Jamapa	Sedimento	NA	3.1-12.4	59.05-82.2	68-75.2	Celis-Hernández <i>et al.</i> , 2017
Laguna de Alvarado	Sedimento	(0.016-0.0417)	(31.86-40.35)	(161.07-190.73)	NA	Botello <i>et al.</i> , 2018
Veracruz Basurero	Agua mg l ⁻¹	NA	NA	NA	0.200	Susunaga-Miranda y Estévez-Garrido, 2018

\pm DE, desviación estándar; NA, no analizado; ND, no detectado.

2.3 Estudios de metales tóxicos realizados en el PNSAV

En el PNSAV se han realizado estudios de metales tóxicos en sedimentos y diferentes organismos, pues resulta de gran importancia estudiar el estado de este sistema arrecifal, ya que representa una comunidad biológica de importancia, que a su vez se encuentra en riesgo por la contaminación de origen antropogénico (Pérez- España, 2015).

Morlán-Cahue y Opengo-Piña (2005), señalan que las actividades antropogénicas están afectando directamente las condiciones ambientales de los arrecifes del PNSAV. En este estudio se obtuvieron las concentraciones de Fe, Mn, Zn y Pb de diferentes especies de macroalgas de los arrecifes del PNSAV. Para Pb, no encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de los diferentes arrecifes analizados (Blanquilla, Gallega, Galleguilla, Hornos, Pájaros, Anegada, Sacrificios y Verde). Para los demás metales, Gallega fue el arrecife que en la mayoría de los casos presentó las concentraciones más altas de metales y Verde y Blanquilla las más bajas.

Rosales-Hoz *et al.* (2007) analizaron los valores Fe > V > Cr > Zn > Ni > Pb > Cu (orden según las concentraciones medias encontradas) en sedimentos de la Isla de Sacrificios en el PNSAV. La concentración más alta en todos los elementos analizados (con excepción de Zn) ocurrió en octubre, lo cual atribuyen a la temporada de lluvias, que introduce mayor sedimento a la zona. Encontraron que los puntos de muestreo localizados cerca de la zona de vertido del río Jamapa, tuvieron la más alta concentración de Cu y V, lo que sugiere que este río es una fuente para estos metales.

Horta-Puga *et al.* (2013) analizaron la concentración de Cd, Cu y Pb en macroalgas bentónicas del PNSAV. Las concentraciones medias resultaron bajas y los autores señalan que las concentraciones de Cd y Pb están influenciadas por la descarga

del río Jamapa, lo que evidencia su control fluvial sobre los niveles de metales traza en la costa.

Domínguez-Castanedo *et al.* (2014) analizaron 15 muestras en sedimentos del PNSAV, con el fin de observar las diferencias en las concentraciones de los metales dentro y fuera de las lagunas arrecifales. En este estudio se determinó que los arrecifes pueden actuar como estructuras de protección y aislamiento, ya que los valores de los metales analizados resultaron más altos fuera de las lagunas que dentro de las mismas.

Zamudio-Alemán *et al.* (2014) reportaron las concentraciones de Cu, Cd y Zn en los sedimentos del PNSAV. Los autores encontraron una elevada concentración de Zn en los sedimentos del PNSAV (el valor más alto lo registraron en el arrecife Isla Verde), lo que consideran que está asociada a las descargas de aguas residuales de la zona.

En el estudio realizado por Horta-Puga *et al.* (2016) determinaron los niveles de los metales pesados Cd, Cu y Pb en macroalgas bentónicas durante el verano de 2007 en el PNSAV, los resultados fueron muy bajos, por lo cual los autores consideran que el PNSAV no debe ser considerado como un área contaminada, a pesar de la gran presión que sufre por las actividades humanas.

Horta-Puga (2016) analizó la concentración de Pb en 15 muestras de sedimentos del PNSAV, sus resultados marcaron que los sedimentos terrígenos son una fuente importante de plomo en el Parque.

La siguiente tabla muestra las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn en macroalgas y sedimento en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (Tabla 6).

Tabla 6. Concentración media, desviación estándar e intervalo de Cd, Pb, V y Zn reportado en el PNSAV.

Lugar	Muestra	Media \pm DE (Intervalo)				Referencia
		Cd	Pb	V	Zn	
PNSAV	Macroalgas mg kg ⁻¹	NA	63.23 \pm 4.38	NA	10.51 \pm 1.29	Morlán-Cahue y Opengo-Piña, 2005
PNSAV Isla de Sacrificios	Sedimento mg kg ⁻¹	NA	10.97 (5.3-42.4)	163.30 (9.9-257)	80.87 (19.9-79.7)	Rosales-Hoz <i>et al.</i> , 2007
PNSAV	Macroalgas mg kg ⁻¹	0.018 \pm 0.015 (<0.005- 0.0823)	0.295 \pm 0.347 (<0.05-1.803)	NA	NA	Horta-Puga <i>et al.</i> , 2013
PNSAV	Sedimento mg kg ⁻¹	0.013	10.953	25.73	95.6	Domínguez-Castanedo <i>et al.</i> , 2014
PNSAV	Sedimento mg kg ⁻¹	0.001	NA	NA	2.3606	Zamudio <i>et al.</i> , 2014
PNSAV	Macroalgas mg kg ⁻¹	0.0137 \pm 0.0095	0.0228 \pm 0.013	NA	NA	Horta-Puga <i>et al.</i> , 2016
PNSAV	Sedimento mg kg ⁻¹	NA	80.4 \pm 10.5	NA	NA	Horta-Puga, 2016

\pm DE, desviación estándar; NA, no analizado.

2.4 *P. volitans*: Especie invasora y especie centinela

En un estudio realizado en la Isla de Guadalupe, en las Antillas por Dromard *et al.* (2016) encontraron que la concentración media de clordecona en *P. volitans* resultó mayor que la de otras cinco especies de peces colectados en sitios similares. Se considera que esto es debido a su posición en el tope de la red trófica, lo cual lo llevó sufrir una bioacumulación de clordecona en su organismo. Estas características hacen que *P. volitans* pueda ser utilizado como una especie centinela para evaluar y controlar el nivel de contaminación del ambiente marino debido a su abundancia y su posición en la cadena alimenticia en los ecosistemas marinos.

Las especies centinela son una herramienta útil para el seguimiento de la exposición de metales pesados en el tiempo y el ecosistema, además de servir de alerta temprana. Por ello, el estudio de las poblaciones animales en su relación con los ecosistemas, mediante el conocimiento de sus dietas es necesario para la

comprensión de la contaminación en el ambiente y la postulación de mecanismos para su control (Echeverría-García y Gold-Bouchot, 2014). El valor de estas especies depende de cómo los metales se acumulan en los organismos, y las cantidades que causan efectos; deben ser lo suficientemente sensibles para proporcionar un aviso temprano y fáciles de controlar durante largos períodos de tiempo en grandes áreas espaciales. El análisis de contaminantes en especies centinela ha sido un indicador útil de la salud ambiental (Peakall y Burger, 2003). Los depredadores del nivel superior a menudo han proporcionado alerta temprana de problemas ambientales, incluyendo contaminación por metales pesados (Peakall y Burger, 2003; Jiménez *et al.*, 2005).

3. JUSTIFICACIÓN

El PNSAV se encuentra compuesto por miles de especies y representa un punto estratégico importante en las rutas de dispersión de las especies bénticas arrecifales; entre estas especies se encuentran los corales escleractinios, que son los principales constructores del arrecife, lo que favorece la conectividad entre las poblaciones arrecifales en el Golfo de México. Además, los servicios ambientales que el PNSAV presta a la región son muy importantes social y económicamente (Horta-Puga, 2003). Sin embargo, a pesar de la relevancia antes mencionada, el PNSAV ha estado sujeto a diferentes daños ecológicos, como las descargas de aguas residuales municipales, industriales y agropecuarias de centros urbanos cercanos, el vertimiento de contaminantes en las cuencas hidrológicas, además de las actividades portuarias que provocan derrames de hidrocarburos y otras sustancias nocivas (DOF, 1992).

Otro problema que enfrenta el Parque, es la llegada de la especie invasora *Pterois volitans* que puede causar graves daños a la biodiversidad de los arrecifes. Por lo tanto, es muy importante su monitoreo, ya que los estudios realizados ayudarán a la implementación de las estrategias pertinentes para el control de la población de

este organismo. Por otro lado, la posición que ha tomado como depredador tope, podría ayudar al estudio de contaminantes como Cd, Pb, V y Zn, los cuales han sido reportados en la zona por ser buenos indicadores de actividades antropogénicas, ya que son utilizados en diversas industrias ubicadas dentro y en las cercanías de la ciudad y puerto de Veracruz y tienen diferentes formas de ser introducidos al ecosistema, así como de desecho.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, el presente trabajo tiene como finalidad contribuir al conocimiento de la concentración de Cd, Pb, V y Zn en el tejido muscular de *Pterois volitans* del PNSAV.

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál será la concentración de los metales Cd, Pb, V y Zn en el tejido muscular de *P. volitans* proveniente del PNSAV, como indicadores de contaminantes del ambiente marino?

5. HIPÓTESIS

Considerando que en organismos del litoral veracruzano se ha reportado la presencia de Cd, Pb, V y Zn, esperamos detectar estos metales en tejido muscular del pez león, *Pterois volitans*, proveniente de los arrecifes del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Cuantificar la concentración de Cd, Pb, V y Zn en el tejido muscular de *Pterois volitans* capturado en los arrecifes del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

6.2 Objetivos particulares

- Identificar los puntos de descarga de aguas residuales que afectan al PNSAV.
- Analizar las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn respecto al sitio de colecta, longitud total y peso de *Pterois volitans*.
- Comparar las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn detectados en musculo de *Pterois volitans* respecto a la zona norte y la zona sur del PNSAV.
- Analizar la similitud de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn en tejido muscular de *P. volitans* respecto a los puntos de colecta en el PNSAV.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Área de colecta

El Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) se encuentra situado entre las coordenadas 19°00'00"-19°16'00"N y 95°45'00"-96°12'00"W, en el centro del Estado de Veracruz. A nivel local, está ubicado frente a los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado. El PNSAV fue decretado como Parque Marino Nacional el 24 de agosto de 1992 (DOF, 1992) y la poligonal fue cambiada a una extensión de 65,516.47 hectáreas en 2012 (DOF, 2012). Fue decretado Reserva de la Biósfera por la UNESCO en 2006 y es considerado como un humedal de importancia internacional en la lista de Ramsar en 2004 (Ortiz-Lozano *et al.*, 2013). Comprende 23 arrecifes, los cuales están influenciados por las aguas entrantes de los ríos La Antigua, Jamapa y Papaloapan. La importancia de este sistema arrecifal radica en la gran biodiversidad que ostenta, así como su alta productividad en términos de pesquerías. Se considera que está sometido a una gran presión antropogénica, debido a las descargas de drenaje de la zona conurbada, así como de derrames de hidrocarburos por el movimiento de embarcaciones en el recinto portuario (FIR, 2004). De manera natural se encuentran divididos geográficamente en dos áreas: norte y sur. La parte intermedia son aguas sobre fondos suaves y arenosos poco explorados (Pérez-España *et al.*, 2015) (Figura 1).

El arrecife Isla de Sacrificios se encuentra en las coordenadas 19°10'35"N 96°05'30"W, es un arrecife de tipo plataforma emergente, tiene 1000 m de longitud y 500 m de ancho, se encuentra 1 km de distancia de la ciudad de Veracruz y tiene una profundidad de 0-14 metros (Tunnell *et al.*, 2007). En este arrecife se llevan actividades de pesca todo el año, principalmente de pulpo (*Octopus vulgaris*) y huachinango (*Lutjanus campechanus*) (Reyna, 2014).

El arrecife Pájaros es de tipo plataforma emergente, con un tamaño de 1870 m de longitud por 750 m de ancho, se encuentra en las coordenadas 19°11'18"N

96°05'22W, a 3 m de distancia de la ciudad de Veracruz, tiene una profundidad de 0-18 m (Tunnell *et al.*, 2007). Los principales organismos que se pescan en este arrecife son el pulpo (*Octopus vulgaris*) y el balajú (*Hemiramphs brasiliensis*) (Reyna, 2014).

El arrecife Isla Verde se encuentra en las coordenadas 19°12'09"N 96°03'58"W, a 5 km de distancia de la ciudad de Veracruz, tiene un tamaño de 1120 m de longitud por 750 m de ancho, su profundidad es de 0-27 m y es un arrecife de tipo plataforma emergente (Tunnell *et al.*, 2007). En este arrecife se llevan a cabo actividades recreativas como buceos deportivos y snorkeling, además de pesca de pulpo (*Octopus vulgaris*) y balajú (*Hemiramphs brasiliensis*) (Reyna, 2014).

El arrecife de Enmedio está ubicado en las coordenadas 19°06'21"N 95°56'18"W, a 6 km de distancia de Antón Lizardo, tiene una longitud de 2250 m por 1800 m de ancho, es un arrecife de tipo plataforma emergente y su profundidad es de 0-24 m (Tunnell *et al.*, 2007). En este arrecife se llevan a cabo actividades recreativas de snorkeling y buceo deportivo, los principales organismos que se pescan son el pulpo (*Octopus vulgaris*), balajú (*Hemiramphs brasiliensis*), peto (*Scomberomorus cavalla*), rubia (*Ocyurus chrysurus*), sábalo (*Megalops atlanticus*), dorado (*Coryphaena hippurus*) y caracol canelo (*Strombus pugilis*) (Reyna, 2014).

El arrecife Anegada de Afuera se encuentra en las coordenadas 19°09'25"N 95°51'15"W, a 16 km de Antón Lizardo, su profundidad máxima es de 45 m, es un arrecife de tipo plataforma emergente y tiene un tamaño de 4370 m de longitud por 1125 de ancho (Tunnell *et al.*, 2007). En el arrecife se llevan a cabo actividades de buceo deportivo y pesca de pulpo (*Octopus vulgaris*), balajú (*Hemiramphs brasiliensis*), tiburón (*Carcharhinus* sp., *Rhizoprionodon terranova* y *Sphyrna* sp.), peto (*Scomberomorus cavalla*), sierra (*Scomberomorus maculatus*), rubia (*Ocyurus chrysurus*), huachinango (*Lutjanus campechanus*), sábalo (*Megalops atlanticus*), dorado (*Coryphaena hippurus*), cubera (*Lutjanus cyanopterus*), langosta espinosa (*Palinurus argus*) y villajaiba (*Lutjanus synagris*) (Reyna, 2014).

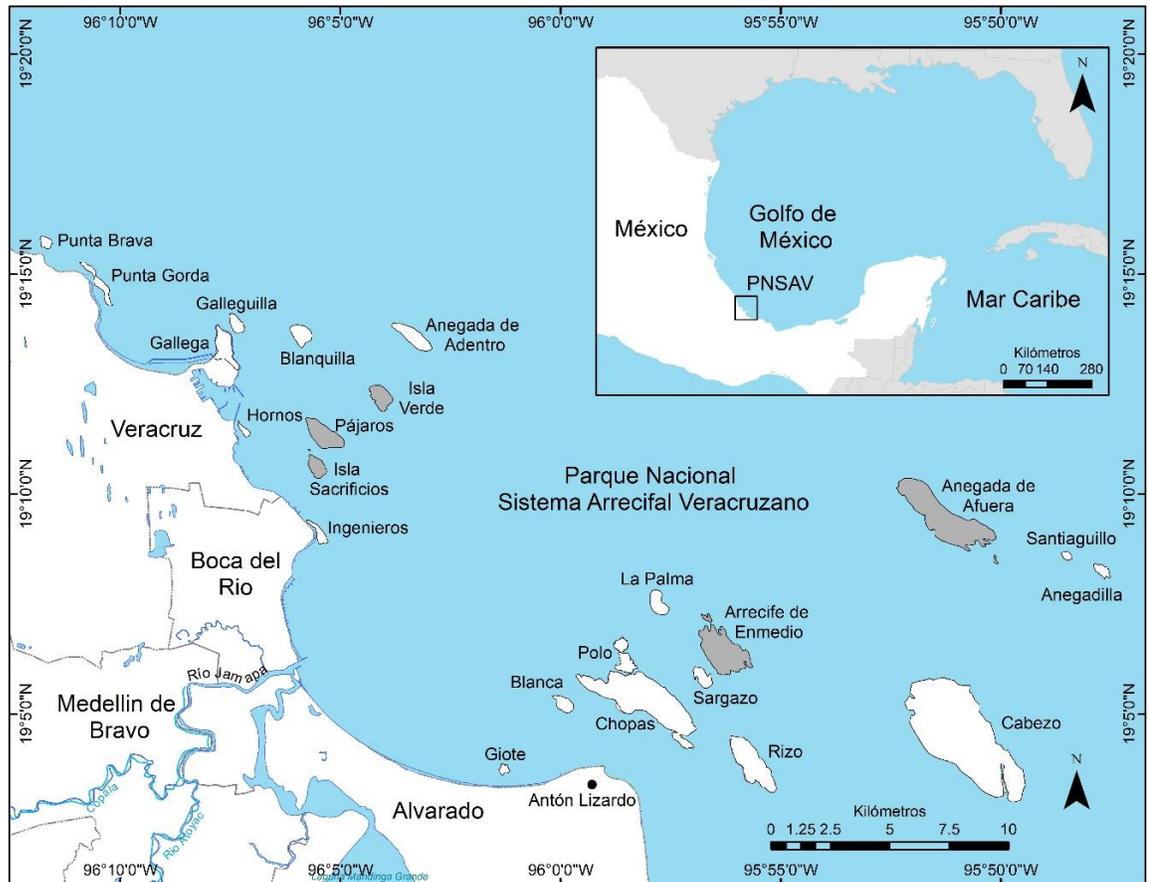


Figura 1. Ubicación geográfica del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. Los arrecifes sombreados representan las zonas de colecta. INEGI, 2016. Escala 1:50000.

7.2 Colecta

Se obtuvieron 30 especímenes de *P. volitans* de los arrecifes Isla de Sacrificios, Pájaros, Isla Verde, Arrecife de Enmedio y Anegada de Afuera del PNSAV (Figura 1). La colecta se realizó en abril de 2018; los organismos fueron capturados con arpones de tipo lanza, por pescadores de la zona. Los peces fueron depositados en bolsas herméticas etiquetadas con la fecha y el nombre del arrecife donde fueron colectados. Se transportaron dentro de una hielera a una temperatura de 4 °C aproximadamente, al Laboratorio de Investigación en Recursos Acuáticos (LIRA) en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Boca del Río (Figura 2).



Figura 2. A) *P. volitans* recién capturado. B) *P. volitans* en bolsa hermética.

7.3 Toma de muestra y datos morfométricos

Los peces fueron procesados en el laboratorio siguiendo las normas de procedimientos operativos que minimizan el riesgo de contaminación cruzada (EPA, 2000; CODEX, 2017). Los organismos fueron pesados (peso húmedo) en una báscula digital y se registró la longitud total con un ictiómetro (Figura 3). Se tomó una muestra de tejido muscular sin piel (20 g) de un corte en la parte lateral del organismo. Los cortes fueron realizados con un bisturí, las navajas de bisturí utilizadas fueron limpiadas con agua del grifo y alcohol etílico entre cada muestra, para evitar la mezcla de tejido muscular de los diferentes organismos. Las muestras fueron colocadas en una bolsa hermética limpia y etiquetada con los datos antes mencionados y se mantuvieron congeladas hasta que se llevó a cabo la digestión.

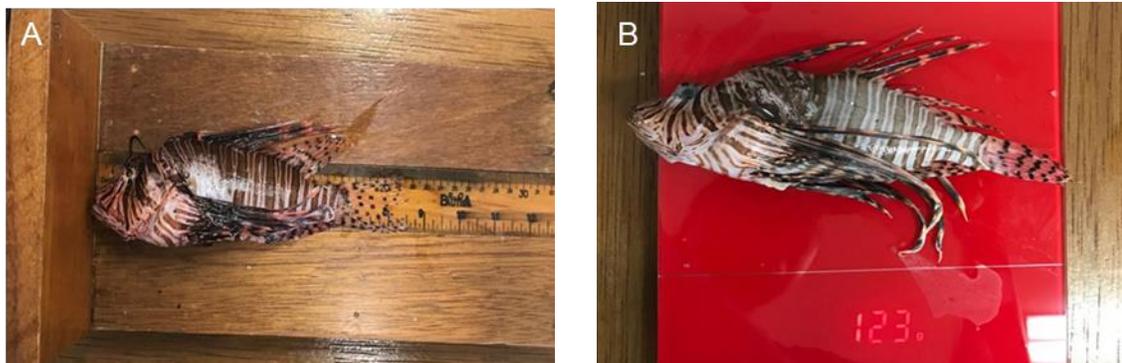


Figura 3. A) Longitud total. B) Peso húmedo.

7.4 Procesamiento de las muestras

7.4.1 Secado de las muestras

Se pesó 10 g (peso fresco) de cada muestra en una balanza analítica marca Adam. Cada muestra de tejido muscular fue colocada en cápsulas de porcelana rotuladas y se introdujeron en un horno de secado y esterilizado, donde permanecieron durante 24 horas a 60 °C (Figura 4). Posteriormente las muestras fueron trituradas en un mortero de porcelana, con el fin de lograr su homogenización.

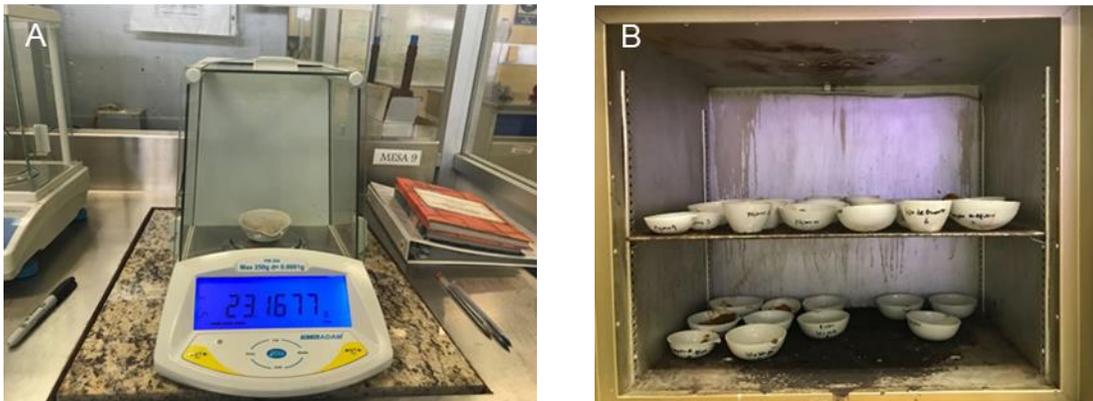


Figura 4. Proceso de secado de muestras de tejido muscular de *P. volitans*. A) Muestras en báscula digital. B) Muestras dentro de horno de secado y esterilización.

7.4.2 Limpieza de material

La limpieza del material y la digestión de las muestras se realizó según lo marca la técnica de la Norma Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994.

La limpieza del material de digestión y cristalería se llevó a cabo con jabón neutro, libre de fosfato al 10 %. Este jabón es utilizado con el fin de evitar interferencias iónicas en la lectura del espectrofotómetro. Después de enjabonar el material, se enjuagó con agua corriente. Posteriormente, fue sumergido en solución de agua destilada con ácido nítrico HNO_3 al 20 %.

Los vasos de teflón permanecieron entre 1 a 2 horas en esta solución, mientras que la cristalería se mantuvo durante 24 horas. Una vez que concluyó el proceso de remoción de cualquier residuo de metales en la solución de HNO_3 , el material se sumergió en agua tipo II o bidestilada, donde permanecieron tanto la cristalería como los vasos de teflón durante 24 horas, esto con el fin de asegurar la remoción completa del ácido.

Finalmente, el material se retiró del agua tipo II y fue escurrido sobre una franela. El material limpio y seco fue almacenado en bolsas herméticas y posteriormente en recipientes con tapa, debidamente rotulados.

7.4.3 Digestión en horno de microondas

La digestión se llevó a cabo con 0.5 g (peso seco) de cada una de las muestras antes secadas y trituradas, las cuales fueron pesadas en charolas de plástico en una balanza analítica marca Adam. Cada muestra se depositó en un vaso de teflón de HP-500, colocados en una gradilla rotulada para su identificación. Dentro de una campana de extracción se agregó con una pipeta graduada 10 ml de HNO_3 grado reactivo al 70 % (suprapuro) en cada vaso de digestión. Por cada corrida se añadió un blanco con agua destilada y una muestra duplicada los cuales fueron usados como control de calidad de las lecturas. Los vasos de digestión fueron armados y se cerraron a presión con la ayuda de un tuerquímetro mecánico a 1.6 lb de presión; se colocaron de forma equilibrada dentro del rotor del horno de microondas para digestión marca MARSX CEM, donde permanecieron durante 15 minutos (a una temperatura de 150 °C los primeros 5 minutos y a 190 °C los siguientes 10 minutos) (Figura 5).



Figura 5 . Vasos de digestión colocados sobre el rotor del microondas de digestión.

Estos parámetros fueron obtenidos del manual del aparato, el cual varía según la cantidad de vasos introducidos y la muestra a la que se le realizará la digestión. Para la digestión de las muestras de tejido muscular de *P. volitans* se llevó a cabo el Método Soil- 3051 HP500, el cual constó de dos rampas de temperatura y presión (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros del Método Soil-3051 HP-500 para programación de Microondas MARS X CEM.

ETAPA	POTENCIA		RAMPA	PSI	°C	MANT.
	MAX	%				
1	300W	100	05:00	0100	150	05:00
2	300W	100	10:00	0120	190	05:00

7.4.4 Filtración

Una vez terminada la digestión, las muestras se filtraron en una botella Nalgene con filtros de membrana nitrocelulosa millipore HAWP04700 de 0.45µm en una bomba de vacío BUCHI Vacuum Pump V-700. La solución obtenida se transfirió a un matraz aforado de 50 ml con la ayuda de un embudo de vidrio; y se enrasó con agua destilada. Las muestras fueron homogeneizadas y después vertidas en frascos de

polietileno previamente rotulados. Finalmente, se colocó parafilm millipore en la boca de los frascos y se mantuvieron en refrigeración a 4°C aproximadamente; hasta la realización de las lecturas en el espectrofotómetro de absorción atómica (Figura 6).



Figura 6. Filtración de muestras en bomba de vacío.

7.5 Lectura

Las lecturas de Cd, Pb, V y Zn se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Thermo Scientific Modelo Ice 30500 AA System, equipado con lámparas de cátodo hueco, específicas para la determinación de cada metal. Se realizó el método de absorción atómica por flama (Figura 7). Se llevó a cabo la técnica recomendada por el fabricante (CEM, 2001), siguiendo lo marcado en la Norma Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994. Se realizaron curvas de calibración con estándares de concentración conocida High Purity Stand Ards de cada uno de los elementos analizados. El intervalo de confianza en cada curva de calibración fue de 99% para V y Zn y 95% para Pb y Cd. Los valores de la curva de calibración fueron para Pb: 0.2, 0.5 y 0.8; para Zn: 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0; para Cd: 0.1, 0.5, 0.8 y 1.0 y para V: 4.0, 6.0 y 8.0.

Los estándares empleados en el espectrofotómetro de absorción atómica, para la lectura de las muestras fueron los siguientes: para Cd 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 7.0mm y un flujo de combustión de 1.2 L

min^{-1} . En el caso de Pb fue usada una longitud de onda de 217.0nm; con una corriente de lámpara de 75%; empleando una llama de Aire-C₂H₂, una altura de mechero de 7.0mm y un flujo de combustión de 1.1 L min^{-1} . Para la lectura de V, fue usada una longitud de onda de 318.5nm; con una corriente de lámpara de 75%; empleando una llama de Aire-C₂H₂, una altura de mechero de 7.0mm y un flujo de combustión de 4.5 L min^{-1} . Por último, para Zn fue usada una longitud de onda de 213.9nm, con una corriente de lámpara de 75%, empleando una llama de Aire-C₂H₂, con una altura de mechero de 7.0mm y el flujo de combustión fue de 1.2 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. Y posteriormente, fue realizada la introducción y lectura de la absorbancia de las diferentes muestras digeridas. Para analizar los resultados de las concentraciones obtenidas en las lecturas de los metales pesados, se utilizaron los criterios de la norma mexicana NOM-242-SSA1-2009, la norma establecida por la FAO-OMS CODEX STAN 193-1995 y la norma en la Unión Europea (UE) 2015/1005 y (UE) No 488/2014, que establecen los límites máximos permisibles para metales pesados contenidos en pescado (Tabla 8).



Figura 7. Lectura de muestras en espectrofotómetro de absorción atómica.

Tabla 8. Límite máximo permisible para pescados frescos, refrigerados y congelados (parte comestible).

Elemento	Límite máximo permisible (mg kg ⁻¹)	Norma
Cadmio	0.5	NOM-242-SSA1-2009
	0.05	(UE) No 488/2014
Plomo	0.5	NOM-242-SSA1-2009
	0.3	CODEX STAN 193-1995
	0.3	(UE) 2015/1005
Vanadio	57 ^a	NOAA
Zinc	150 ^b	NOAA

^aERL, rango de efectos mínimos en sedimentos marinos; ^bAET, umbrales de efectos aparentes en *Neanthes sp.*

7.6 Análisis estadístico

Mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un $\alpha=0.05$ se determinó la significancia estadística de las diferencias observadas y se aplicó el método de Tukey con el fin de comparar los resultados obtenidos.

Se realizó la correlación de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn registradas en tejido muscular de *P. volitans* respecto a la longitud total y del peso de los organismos. Se compararon las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn encontradas con las diferentes zonas de muestreo (zona norte y sur). Se realizó una comparación de las variaciones de Cd, Pb, V y Zn en los diferentes arrecifes por medio de un dendograma de similitud (Magurran, 2004). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo en el programa Minitab 16.1.0 (Minitab Inc, 2010) y Past 3.20 (Hammer, 2001).

8. RESULTADOS

8.1 Puntos de descargas de aguas residuales en Veracruz-Boca del Río

Se realizó un recorrido por el malecón de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, con el fin de determinar los puntos de descarga de aguas residuales que afectan al PNSAV y que pueden ser las vías de introducción de diferentes contaminantes como metales pesados. Se encontraron 87 puntos de descarga de agua al PNSAV (34 residuales y 53 pluviales) (Figura 8).



Figura 8. Puntos de descarga de aguas residuales y pluviales en Veracruz-Boca del Río. (Tomado de INEGI, 2016. Escala 1:50000).

8.2 Resultados generales

La concentración media y el intervalo de valores mínimos y máximos de Cd, Pb, V y Zn encontrado en tejido muscular de *P. volitans* se observan en la Tabla 9.

Tabla 9. Concentración media, desviación estándar e intervalos mínimos y máximos de los elementos analizados en el tejido muscular de *P. volitans*.

Elemento	Media (\pm DE) (mg kg ⁻¹)	Intervalo (mg kg ⁻¹)
Cd	0.0256 \pm 0.0075	0.0092 - 0.0378
Pb	0.6605 \pm 0.0724	0.4675 - 0.7446
V	7.3444 \pm 0.6514	5.9517- 8.3358
Zn	0.6948 \pm 1.2197	0.2946 - 7.0034

\pm DE, desviación estándar.

Las concentraciones máximas de Cd, Pb y V se registraron en las muestras de tejido muscular de *P. volitans* colectados en el arrecife Pájaros (0.03, 0.74 y 8.33 mg kg⁻¹, respectivamente) y la concentración máxima de Zn fue registrada en una muestra proveniente del arrecife Isla Verde (7.00 mg kg⁻¹). Las concentraciones mínimas de V y Pb fueron registradas en el arrecife Isla de Sacrificios, 5.95 y 0.46 mg kg⁻¹ respectivamente. La concentración mínima de Cd fue de 0.0092 mg kg⁻¹ proveniente de una muestra del arrecife Isla Verde y para Zn la concentración más baja se encontró en el arrecife Pájaros, 0.29 mg kg⁻¹ (Figura 9).

La longitud total máxima hallada en los organismos colectados fue de 36 cm, registrada en un organismo capturado en el arrecife Pájaros y la longitud mínima fue de 16 cm, proveniente de un organismo capturado en el mismo arrecife. El peso máximo registrado fue de 717 g, correspondiente a un pez capturado en el arrecife Anegada de Afuera y el peso mínimo fue de 32 g de un organismo colectado en el arrecife Isla Verde (Tabla 10).

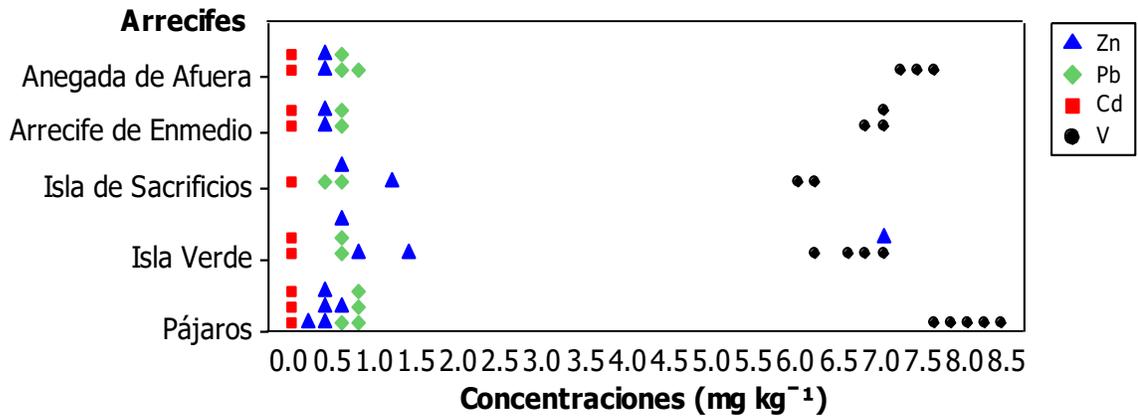


Figura 9. Gráfica de concentraciones individuales de Cd, Pb, V y Zn en tejido muscular de *P. volitans* capturado en el PNSAV.

Tabla 10. Datos generales de muestras de *P. volitans* analizadas.

Zona	Arrecife	Número de Organismos	Concentración Media (mg kg ⁻¹)				Long.Total (cm) mín-max	Peso húmedo (g) mín-max
			Cd	Pb	V	Zn		
Norte	Pájaros	11	0.03	0.72	8.02	0.36	16-36	56-833
	Isla de Sacrificios	2	0.01	0.48	6.10	0.86	21.5-22.9	160-169
	Isla Verde	5	0.01	0.58	6.65	2.12	17.5-23	32-186
Sur	Arrecife de En medio	6	0.02	0.63	7.00	0.37	17-21.5	69-418
	Anegada de Afuera	6	0.02	0.69	7.42	0.35	21.5-32.5	150-717

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que existen diferencias significativas en los valores encontrados de los diferentes metales analizados en el tejido muscular de *P. volitans* ($p < 0.0001$). El análisis realizado según indica el método de Tukey, señala que las concentraciones de los metales Vanadio y Cadmio fueron las que resultaron

con mayores diferencias, mientras que las concentraciones encontradas de Plomo y Zinc, resultaron con algunas semejanzas en los valores obtenidos (Figura 10).

Sin embargo, a pesar de las diferencias en las concentraciones de los metales analizados, sólo la concentración media de plomo resultó por encima de los valores señalados como límites máximos permisibles según la norma mexicana.

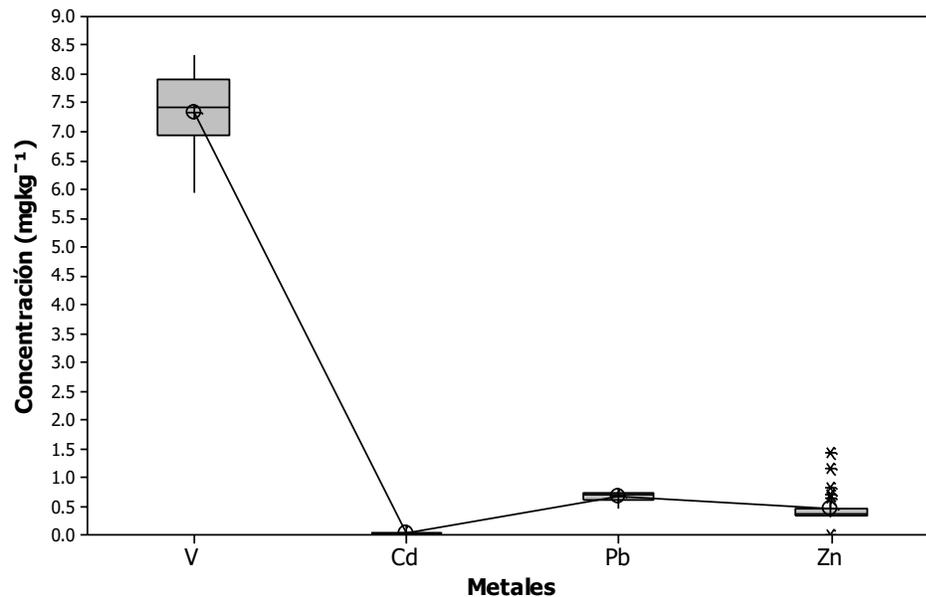


Figura 10. Gráfica de caja de Cd, Pb, V y Zn. Letras distintas indican diferencias significativas para la prueba de Tukey ($p < 0.05$). El traslape de los valores de Pb y Zn está marcado por las letras B.

8.3 Resultados por sitio de colecta

Los siguientes mapas muestran la concentración media de Cd, Pb, V y Zn (mg kg^{-1}) encontrada en el tejido muscular de *P. volitans* por arrecife de colecta dentro del PNSAV; donde se observa que el arrecife Pájaros tuvo la concentración media más alta de Vanadio (8.02), al que igual que de Cadmio (0.03) y de Plomo (0.72). La concentración media más alta de Zinc fue encontrada en el arrecife Isla Verde (2.12) (Figuras 11, 12, 13, 14 y 15).

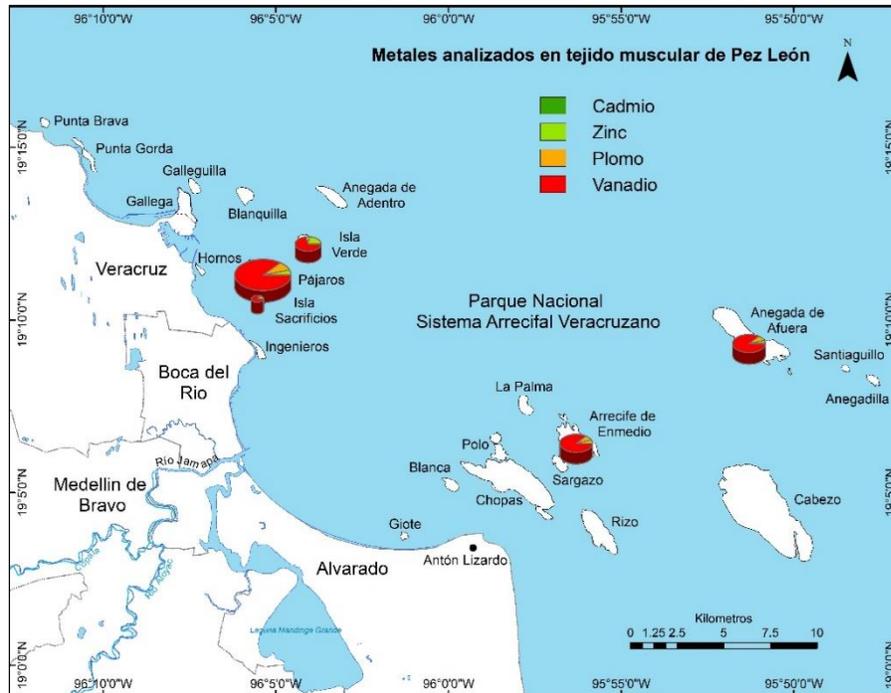


Figura 11. Distribución espacial de los metales encontrados en tejido muscular de *P. volitans*. El tamaño del círculo es proporcional al número total de organismos analizados en cada arrecife de colecta. El color representa la concentración de los metales analizados.

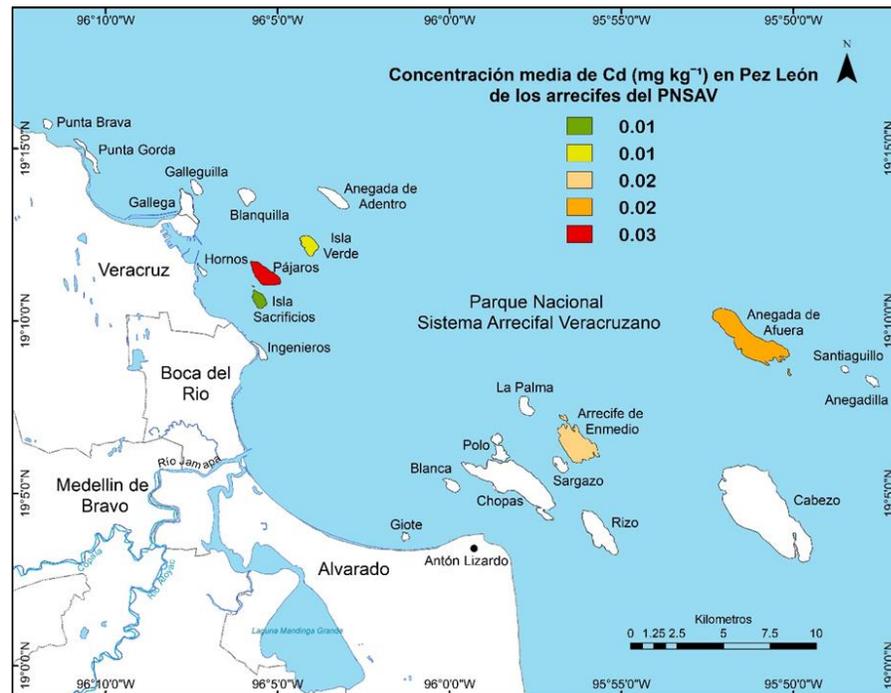


Figura 12. Concentración media de Cd en tejido muscular de *P. volitans* colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000.

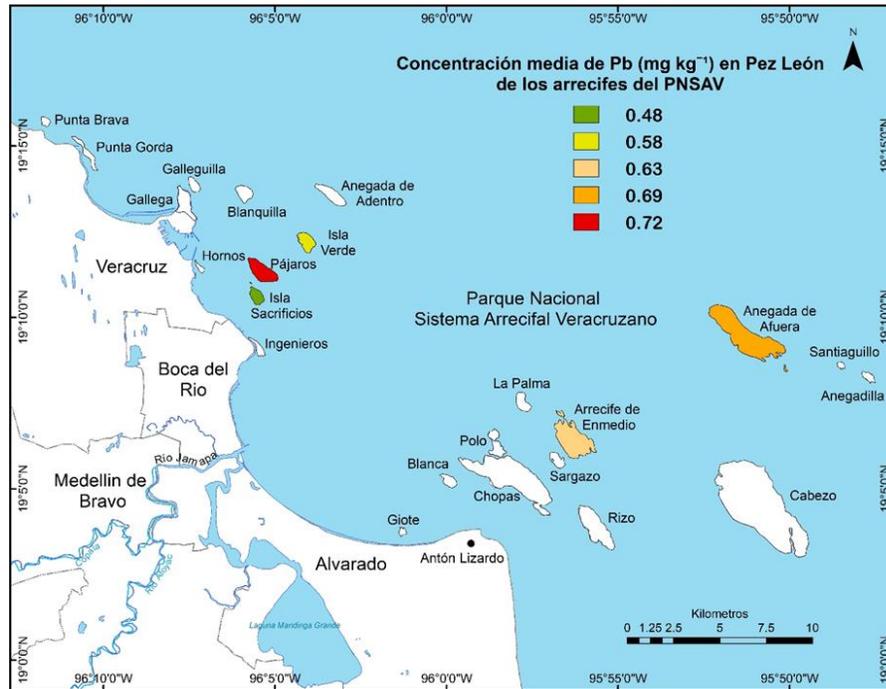


Figura 13. Concentración media de Pb en tejido muscular de *P. volitans* colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000.

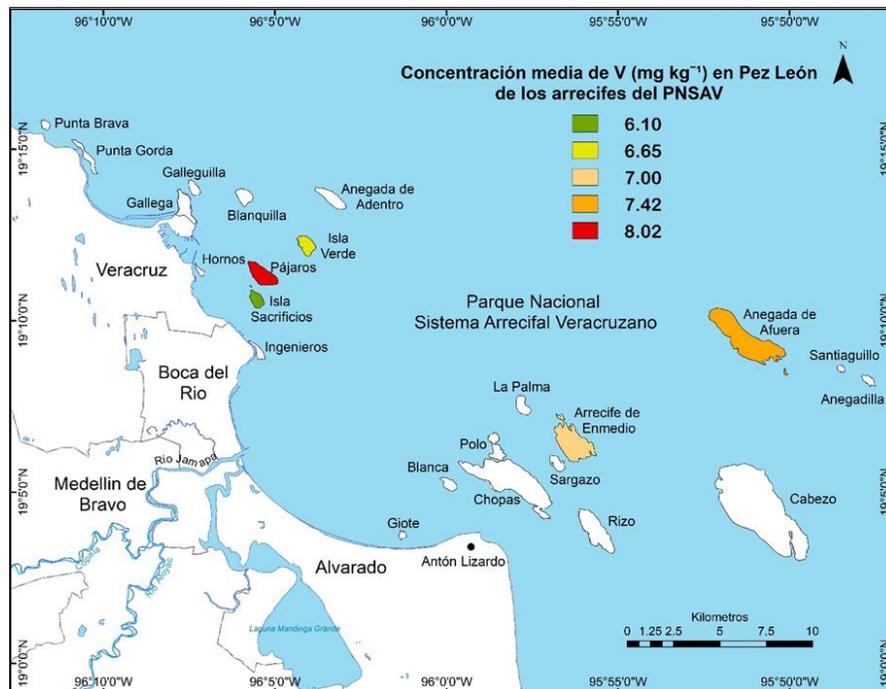


Figura 14. Concentración media de V en tejido muscular de *P. volitans* colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000.

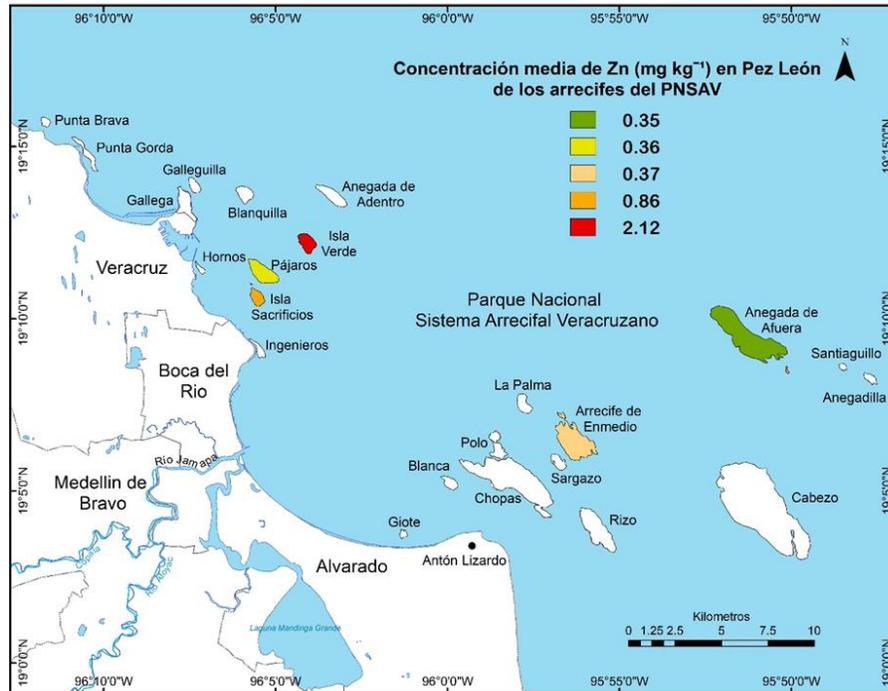


Figura 15. Concentración media de Zn en tejido muscular de *P. volitans* colectado en el PNSAV. INEGI, 2016. Escala 1:50000.

8.3.1 Cadmio

Las concentraciones de Cd en los organismos colectados de *P. volitans* indicaron según la ANOVA realizada, que existe una diferencia significativa en las concentraciones obtenidas por arrecife de colecta ($p < 0.0001$). El método de Tukey indicó que las concentraciones de Cd similares se encuentran en las muestras provenientes de los arrecifes Anegada de Afuera y Arrecife de Enmedio y en otro grupo se traslapan las concentraciones encontradas en las muestras de los arrecifes Isla Verde e Isla de Sacrificios (Figuras 16 y 17).

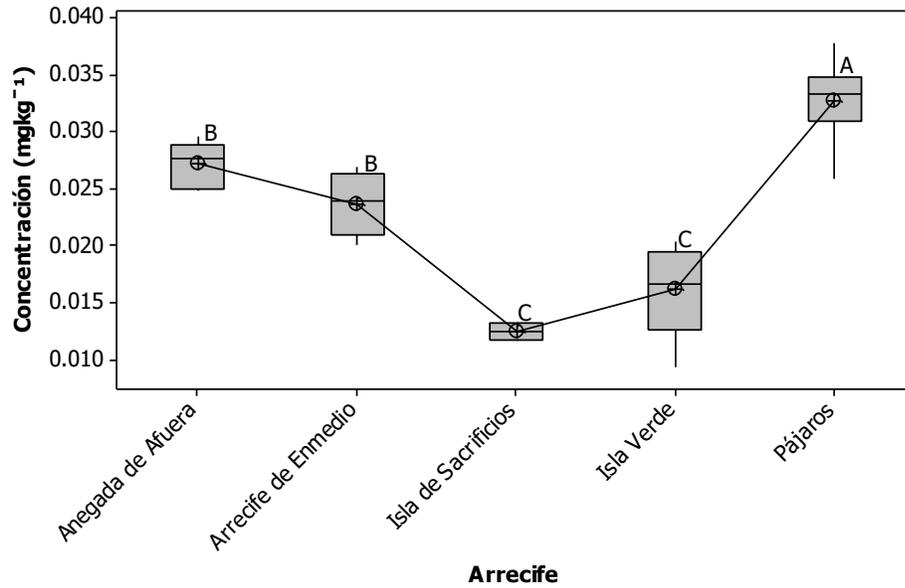


Figura 16. Concentración de Cd en los organismos de *P. volitans* capturados en arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, C, Letras compartidas no presentan diferencias significativas entre los grupos de datos.

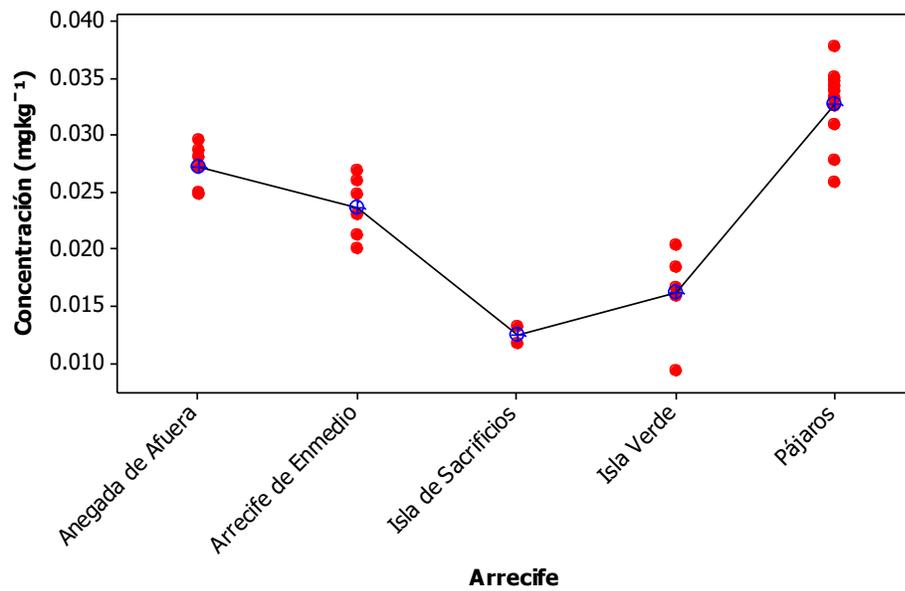


Figura 17. Concentración de Cd por individuo registradas en músculo de *P. volitans* en los arrecifes del PNSAV.

8.3.2 Plomo

La ANOVA indicó que existen diferencias significativas en las concentraciones de Pb encontradas en los organismos capturados en los diferentes arrecifes del PNSAV ($p < 0.0001$). El método de Tukey indicó que no existe traslape en las concentraciones de Pb obtenidas por arrecife. (Figuras 18 y 19).

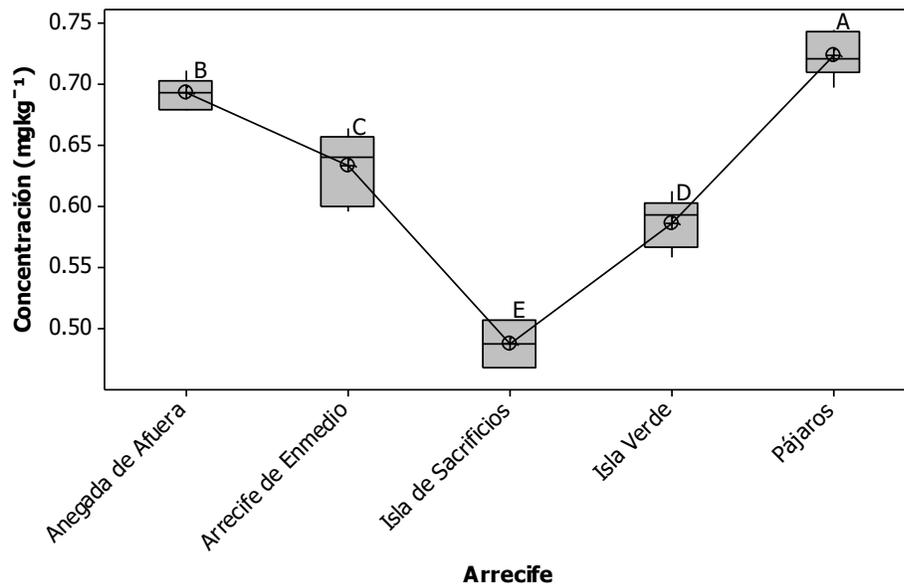


Figura 18. Concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, C, D, E, letras no compartidas presentan diferencias significativas entre los grupos de datos.

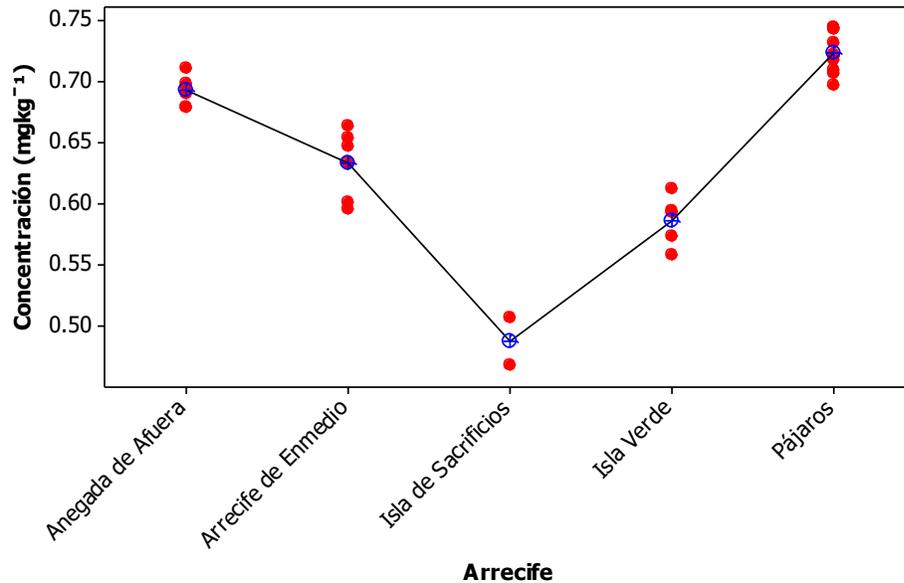


Figura 19. Concentración de Pb por organismo capturado de *P. volitans* en los arrecifes del PNSAV.

8.3.3 Vanadio

Las concentraciones de V en el músculo de *P. volitans* en las diferentes zonas de colecta fueron analizadas mediante una ANOVA, la cual arrojó que existe una diferencia significativa entre la concentración obtenida de con respecto a los arrecifes en donde fue capturado el organismo ($p < 0.0001$). Según el método de Tukey los arrecifes que comparten concentraciones similares de V son el arrecife de Enmedio y el arrecife Isla Verde (Figuras 20 y 21).

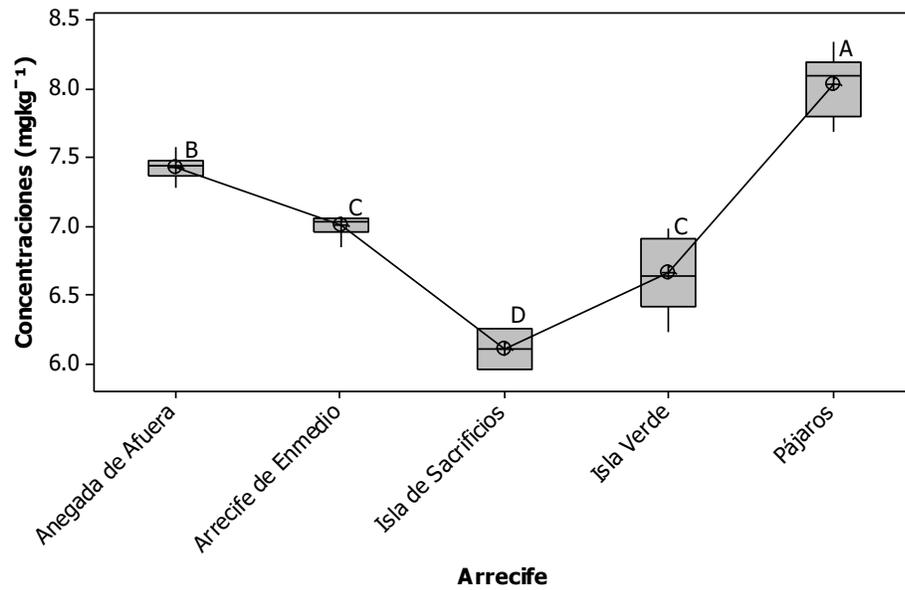


Figura 20. Concentración de V en tejido muscular de *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, C, D, E, letras compartidas no presentan diferencias significativas entre los grupos de datos.

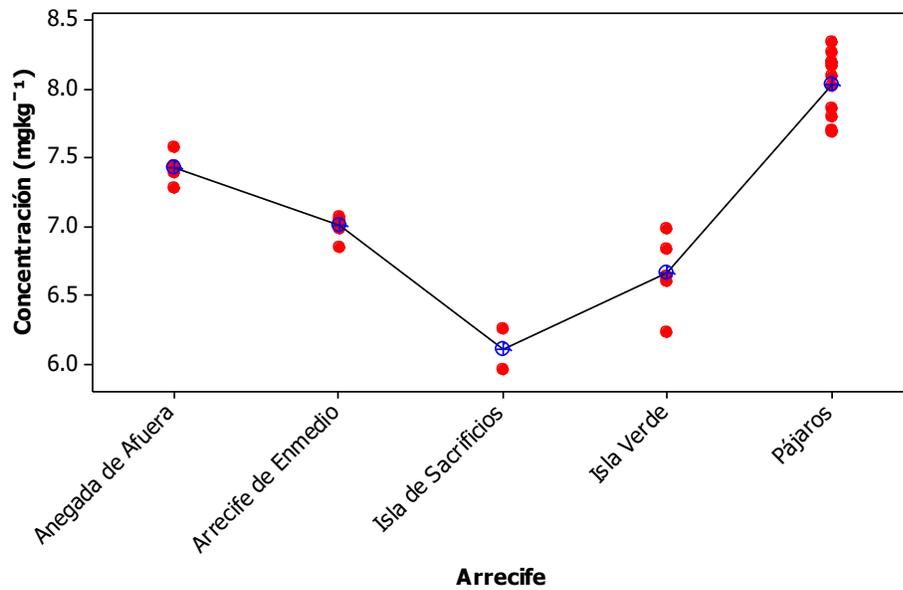


Figura 21. Concentración de V por organismos colectado en tejido muscular de *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV.

8.3.4 Zinc

La ANOVA indicó que las concentraciones de Zn encontradas en músculo de *P. volitans* capturado en los arrecifes del PNSAV, no presentan una diferencia significativa ($p=0.058$). El método de Tukey indicó que existe semejanza en las concentraciones de los organismos capturados en los arrecifes Isla Verde, Isla de Sacrificios, Arrecife de Enmedio y Anegada de Afuera y otro grupo muestra un traslape en las concentraciones encontradas en los arrecifes Isla de Sacrificios, Arrecife en Enmedio, Pájaros y Anegada de Afuera (Figuras 22 y 23).

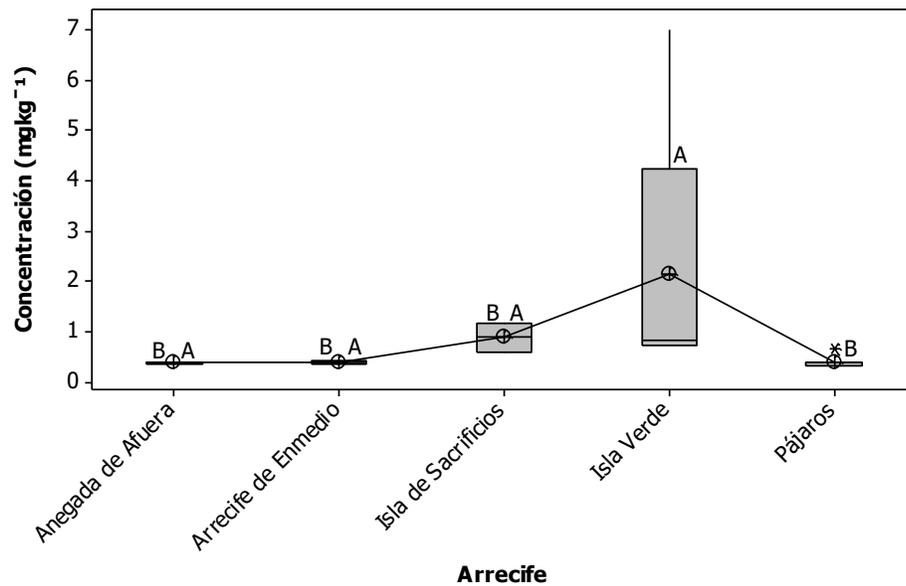


Figura 22. Concentración de Zn en *P. volitans* de los arrecifes del PNSAV. Método de Tukey: A, B, letras compartidas no presentan diferencias significativas entre los grupos de datos.

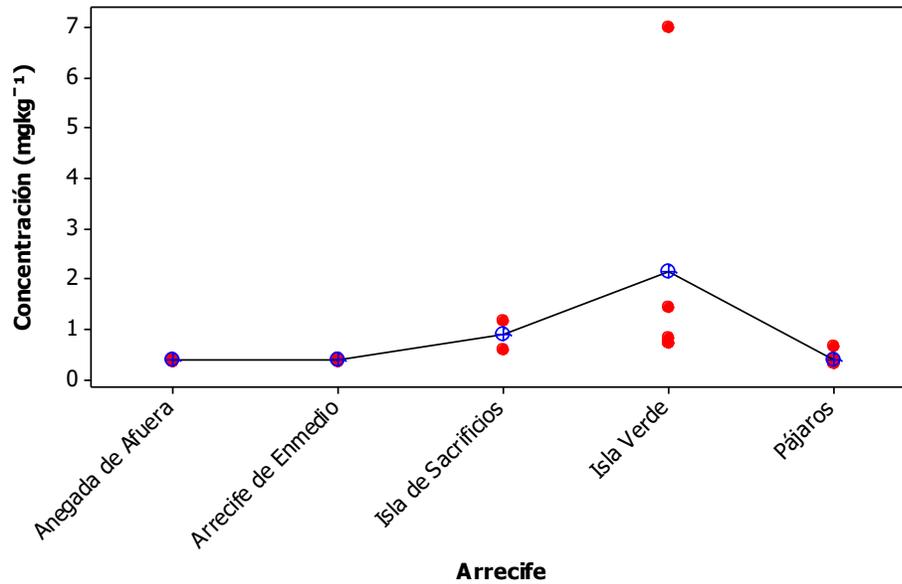


Figura 23. Concentración de Zn en valores individuales encontrada en tejido muscular de *P. volitans* capturado en los arrecifes del PNSAV.

8.4 Comparación Zona Norte y Sur

Se realizó la prueba t-Student con un valor de confianza del 95% para identificar las diferencias de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn encontradas en el tejido muscular de *P. volitans*, con respecto a los organismos colectados en la zona norte (Isla de Sacrificios, Isla Verde y Pájaros) y sur (Arrecife de Enmedio y Anegada de Afuera) del PNSAV. El número de organismos analizados en la zona norte fue de 18 y en la zona sur 12.

8.4.1 Cadmio

La media obtenida de las concentraciones de Cd fue de 0.02578 ± 0.00949 para los organismos colectados en los arrecifes del norte y de 0.02539 ± 0.00291 para los colectados en el sur. Los resultados indican que no existen diferencias significativas ($p=0.871$) de las concentraciones de Cd en los organismos colectados en las zonas antes mencionadas (Figuras 24 y 25).

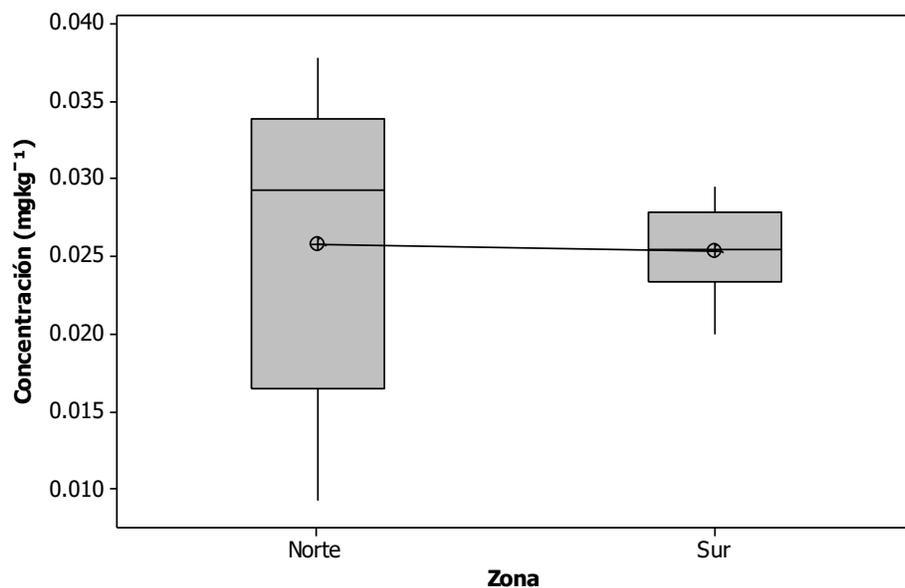


Figura 24. Concentración de Cd en tejido muscular de *P. volitans*. Comparación entre organismos colectados en la zona norte y sur del PNSAV.

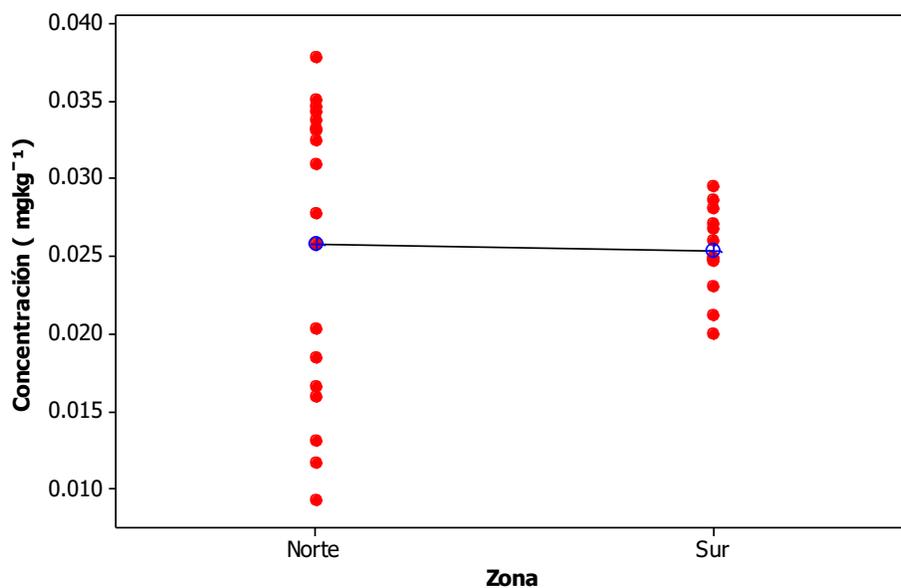


Figura 25. Valores individuales de la concentración de Cd en los organismos analizados de *P. volitans* capturados en los arrecifes de la zona norte y sur del PNSAV.

8.4.2 Plomo

La prueba t-Student indicó que las concentraciones de Pb en tejido muscular de *P. volitans* no reflejan una diferencia significativa ($p= 0.885$) con respecto a los organismos capturados en la zona norte y el sur del PNSAV. Las concentraciones medias fueron de 0.659 ± 0.0895 para los organismos capturados en los arrecifes de la zona norte, y de 0.6626 ± 0.0376 para los capturados en la zona sur (Figuras 26 y 27).

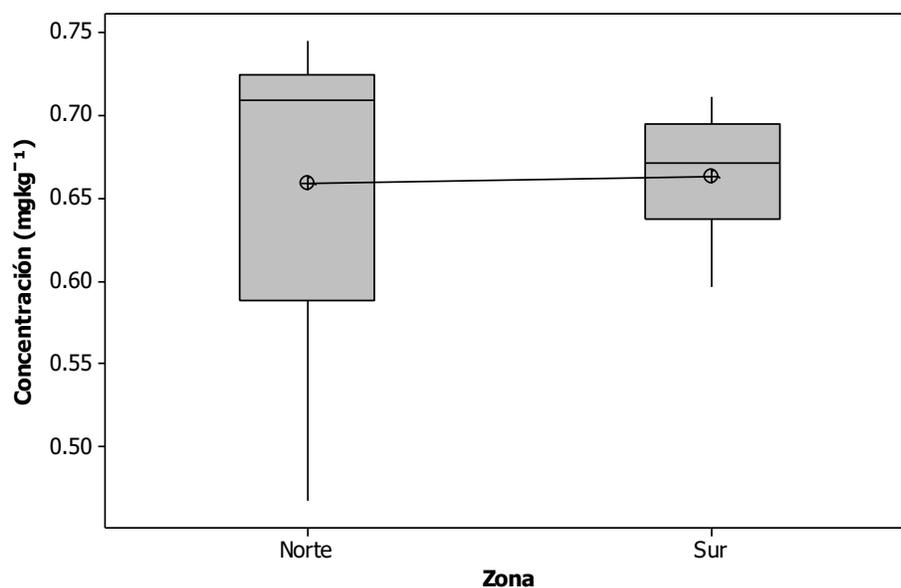


Figura 26. Concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans* capturado en los arrecifes de la zona norte y sur del PNSAV.

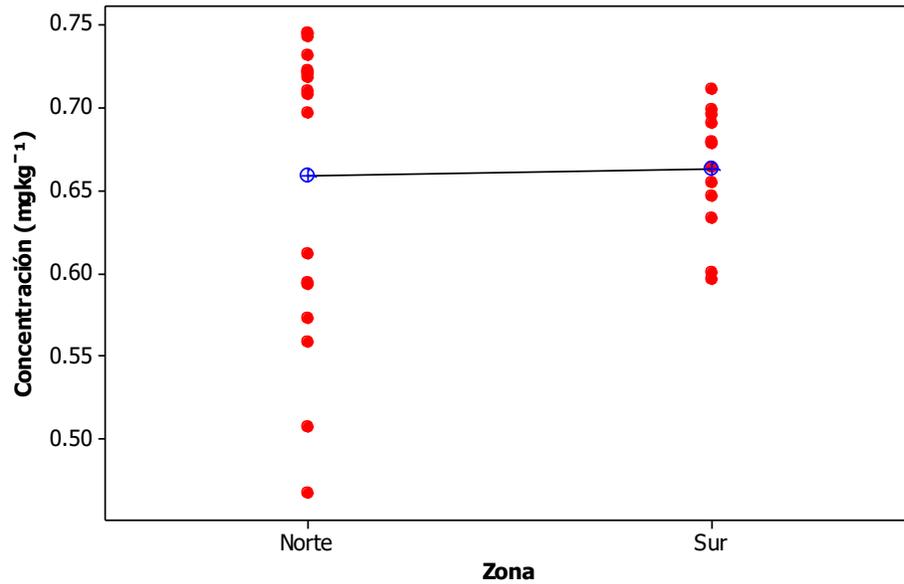


Figura 27. Valores individuales de la concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans*, donde se comparan las concentraciones encontradas en los organismos capturados en los arrecifes del norte y el sur del PNSAV.

8.4.3 Vanadio

Los resultados obtenidos indican que no existen diferencias significativas ($p = 0.292$) en las medias de la concentración de V encontradas en el tejido muscular de *P. volitans* capturados en los arrecifes de la zona norte del PNSAV (7.433 ± 0.8170) con respecto a los capturados en la zona sur (7.212 ± 0.236) (Figuras 28 y 29).

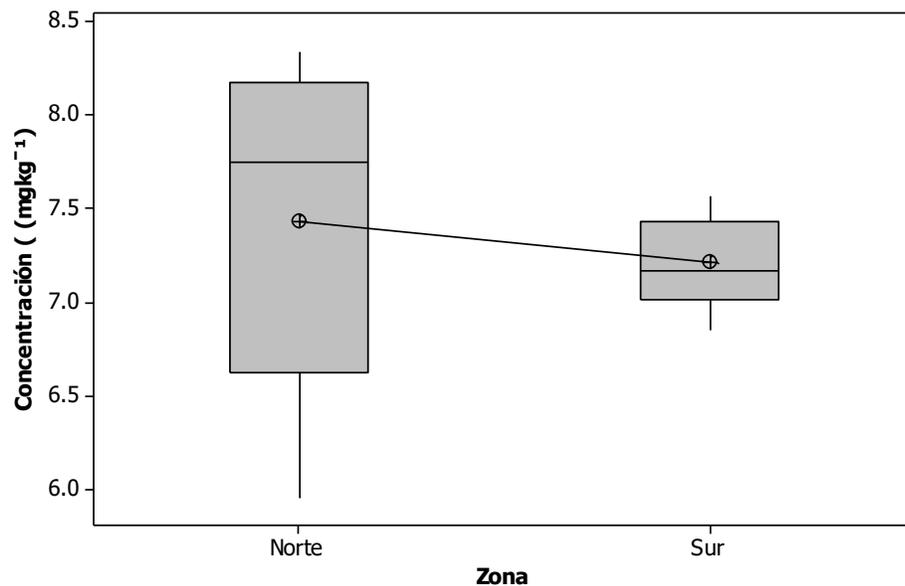


Figura 28. Concentraciones de V en tejido muscular de *P. volitans* comparadas entre los organismos capturados en arrecifes del norte y sur del PNSAV.

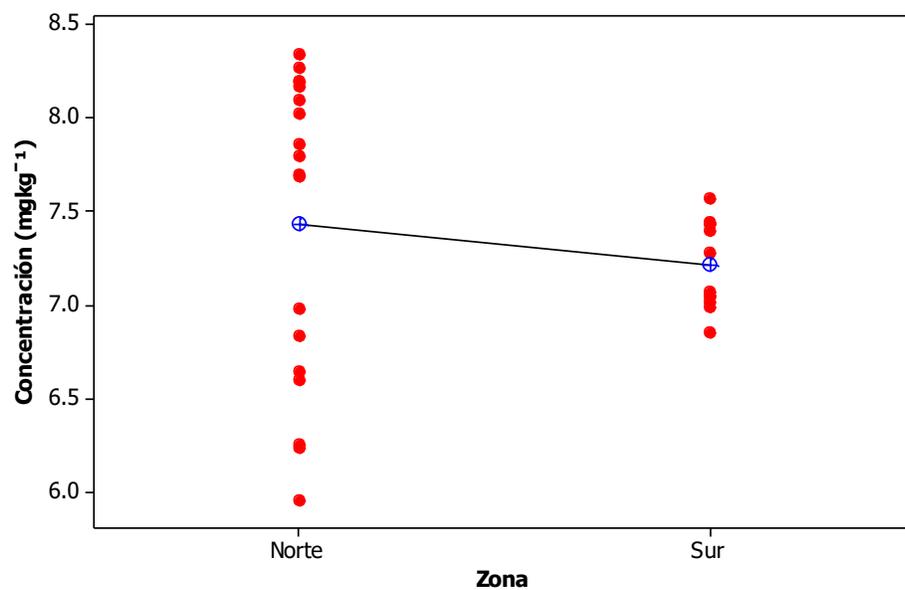


Figura 29. Valores individuales de la concentración de V encontrada en organismos de *P. volitans* capturados en la zona norte y sur del PNSAV.

8.4.4 Zinc

Los valores obtenidos de Zn indicaron que no existen diferencias significativas entre las concentraciones encontradas en los organismos capturados en los arrecifes del sur y del norte del PNSAV ($p=0.154$). Las concentraciones medias de Zn encontradas en los arrecifes del norte fueron de 0.91 ± 1.55 y las del sur fueron de 0.3675 ± 0.0224 (Figuras 30 y 31).

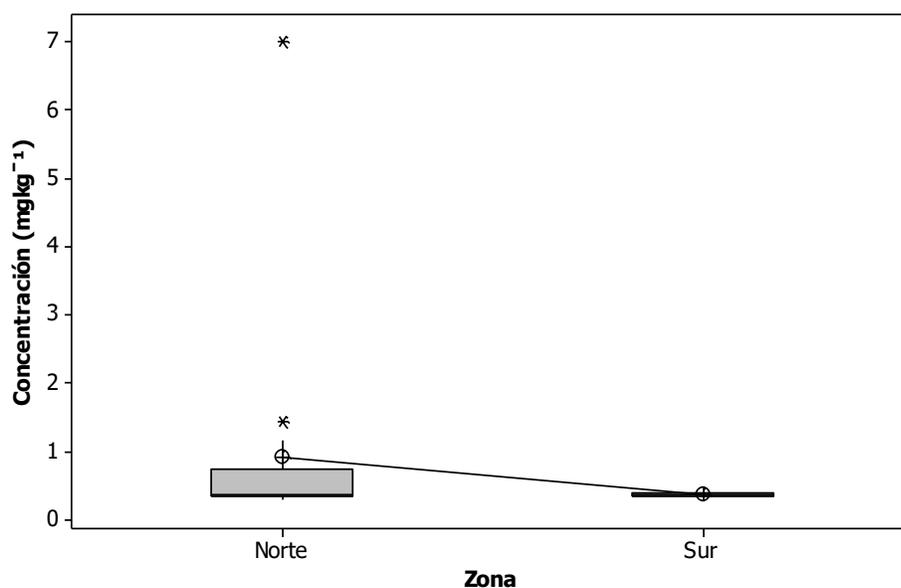


Figura 30. Concentración de Zn en músculo de *P. volitans* donde se comparan las concentraciones de los organismos capturados en los arrecifes del norte y del sur del PNSAV.

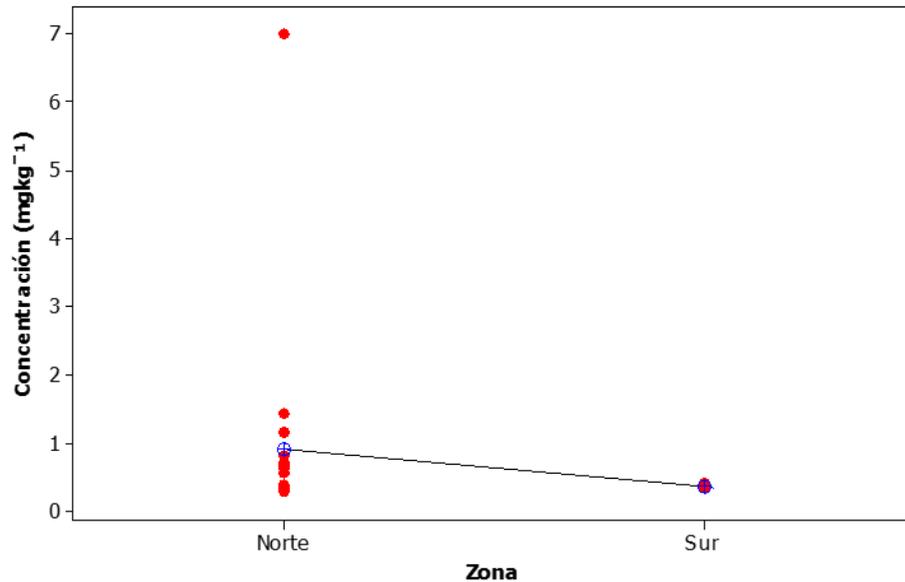


Figura 31. Valores individuales de la concentración de Zn en tejido muscular de *P. volitans* capturado en los arrecifes del norte y sur del PNSAV

8.5 Correlación

8.5.1 Peso Húmedo

Los resultados del análisis del coeficiente de correlación de Pearson de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn con respecto al peso registrado en los organismos analizados, muestran que no existe una correlación positiva entre estas dos variables. Como se observa en la Tabla 11 y las Figuras 32, 33, 34 y 35.

Tabla 11. Correlación (r) de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn encontradas en músculo de *P. volitans* y el peso de los organismos.

Metal	r	Correlación
Cd	0.114	no significativa
Pb	0.250	no significativa
V	0.086	no significativa
Zn	-0.152	no significativa

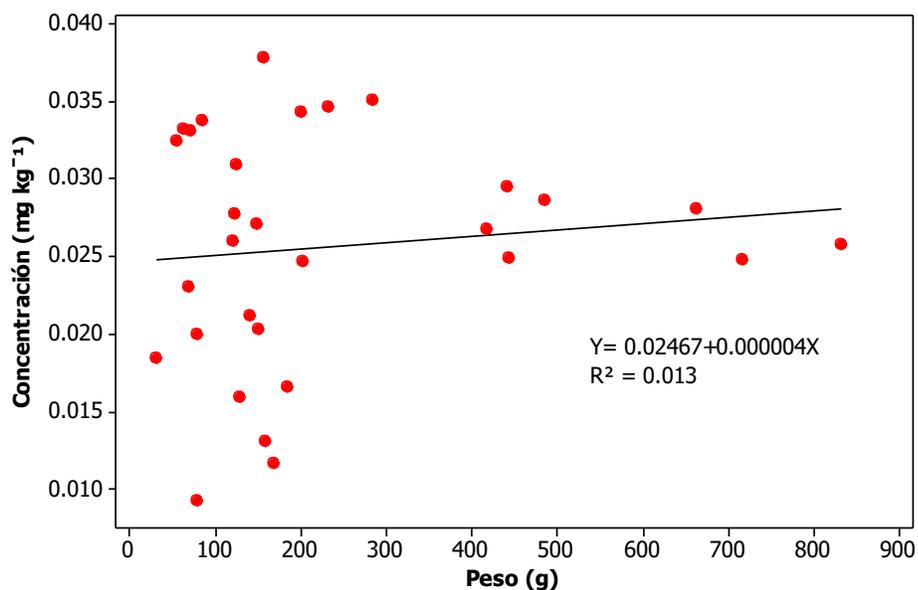


Figura 32. Correlación el entre peso y la concentración de Cd en tejido muscular de *P. volitans*.

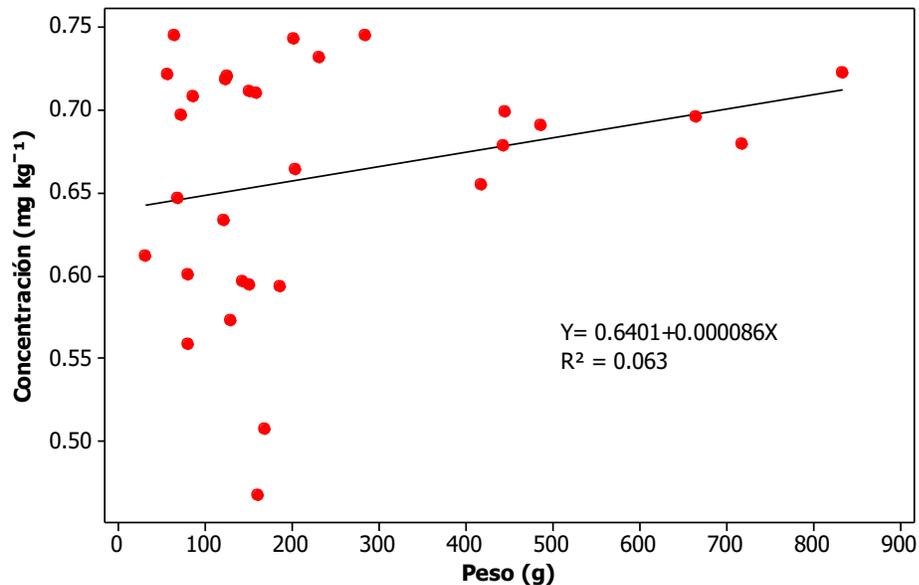


Figura 33. Correlación entre peso y concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans*.

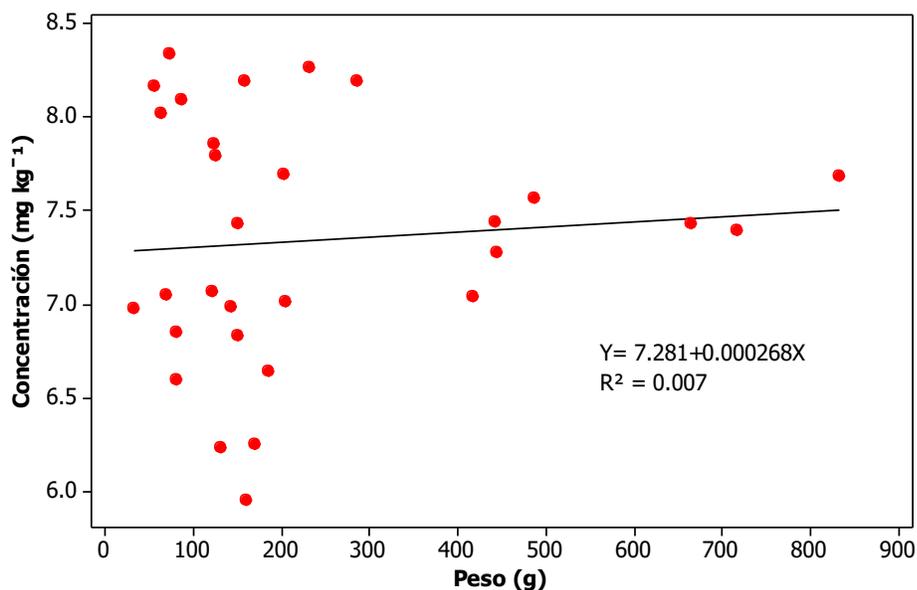


Figura 34. Correlación entre el peso de *P. volitans* y la concentración de V en los diferentes organismos analizados.

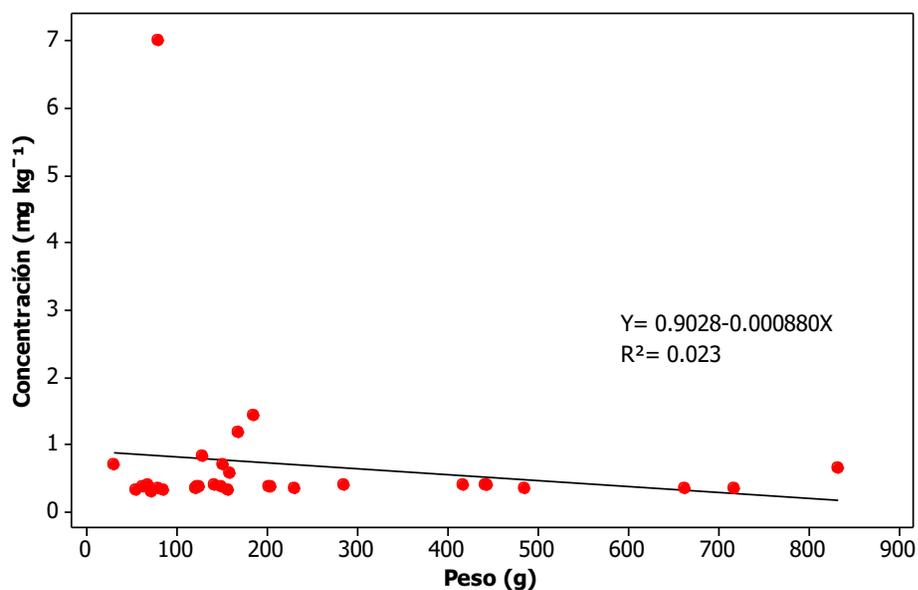


Figura 35. Correlación de las variables peso y concentración de Zn en tejido muscular de *P. volitans*.

8.5.2 Longitud Total

Los resultados del análisis del coeficiente de correlación de Pearson de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn en tejido muscular de *P. volitans* con respecto a la longitud total de los organismos colectados demuestran que no existe una correlación significativa entre estas dos variables (Tabla 12) (Figuras 36, 37, 38 y 39).

Tabla 12. Correlación (r) de las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn y la longitud total de *P. volitans*.

Metal	r	Correlación
Cd	0.105	no significativa
Pb	0.213	no significativa
V	0.034	no significativa
Zn	-0.172	no significativa

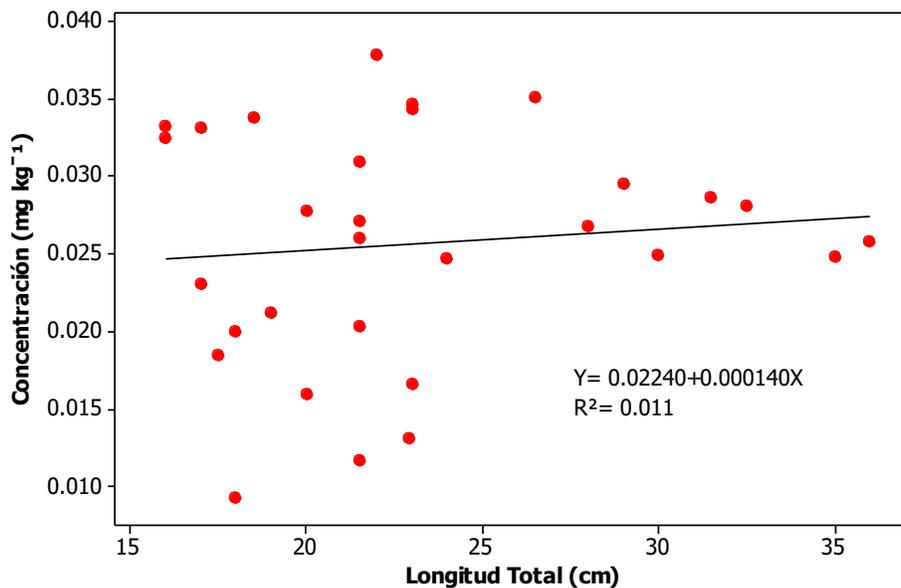


Figura 36. Correlación entre la concentración de Cd en tejido muscular de *P. volitans* y su longitud total.

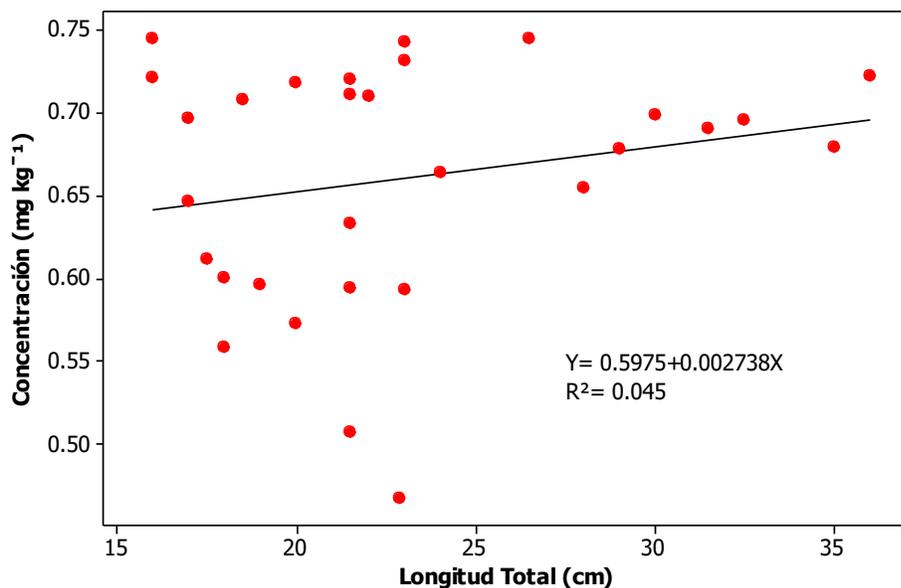


Figura 37. Correlación entre la concentración de Pb en tejido muscular de *P. volitans* y su longitud total.

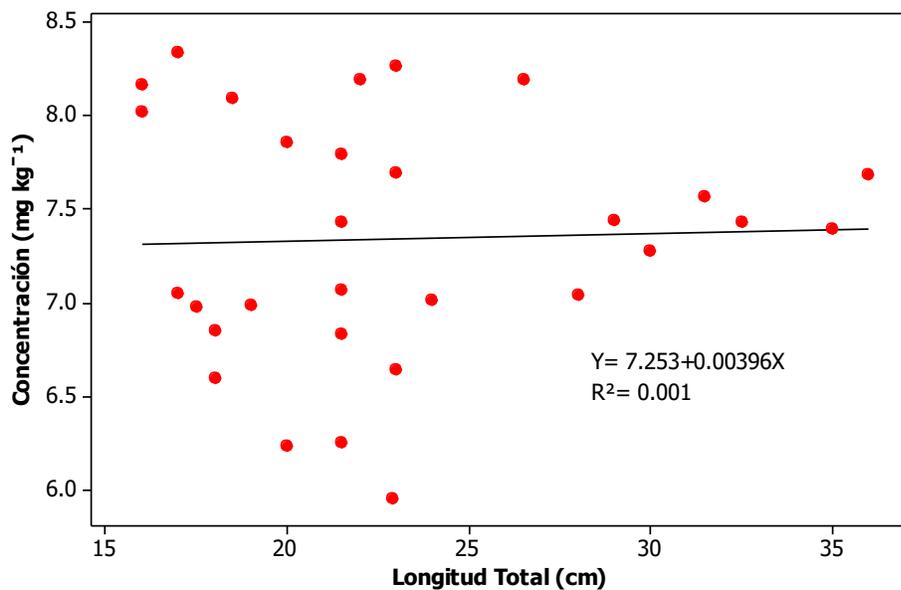


Figura 38. Correlación entre la longitud total de *P. volitans* y la concentración de V encontrada en su tejido muscular.

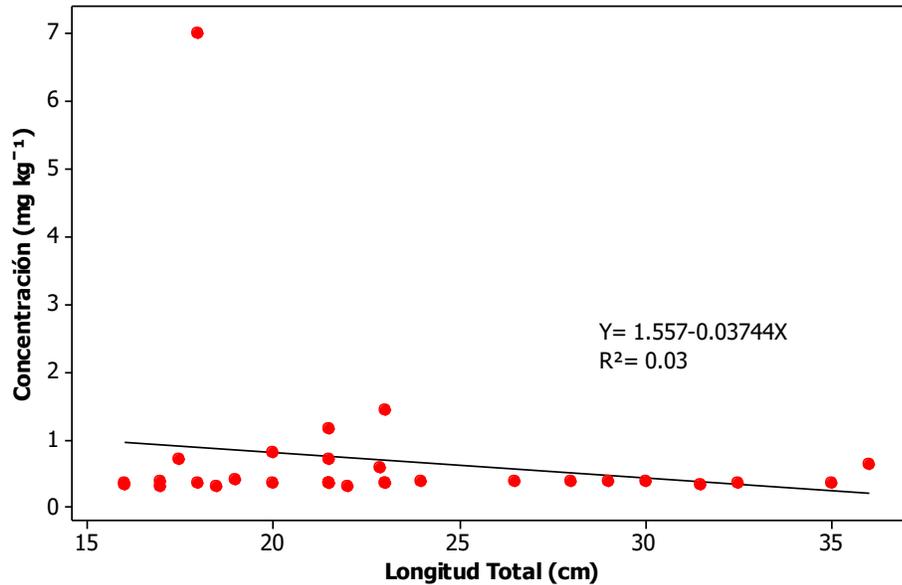


Figura 39. Correlación de Zn en tejido muscular de *P. volitans* y su longitud total.

8.6 Dendograma de similitud de concentraciones

Se realizaron dendogramas de similitud de las concentraciones medias de Cd, Pb, V y Zn en cada arrecife de colecta a través de un análisis por conglomerados jerárquicos con el método de Ward, utilizando la distancia Euclídea entre las concentraciones obtenidas, los cuales muestran los grupos establecidos por las variables.

8.6.1 Cadmio

Para Cd se observaron dos grupos de concentraciones similares. 1) Grupo compuesto por el arrecife Isla Verde e Isla de Sacrificios y 2) grupo formado por Arrecife Pájaros, Arrecife de Enmedio y Anegada de Afuera (Figura 40).

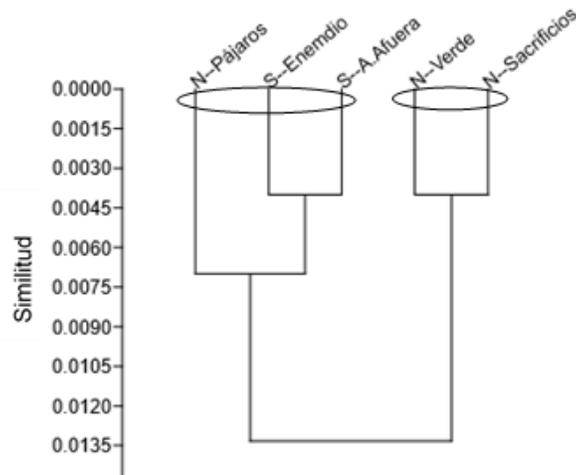


Figura 40. Dendrograma de similitud de las concentraciones de Cd en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S).

8.6.2 Plomo

En las concentraciones de Pb con respecto a los arrecifes de colecta se observaron las similitudes en las concentraciones en tres grupos. 1) Isla Verde y Arrecife de Enmedio, 2) Pájaros y Anegada de Afuera y 3) arrecife Isla de Sacrificios (Figura 41).

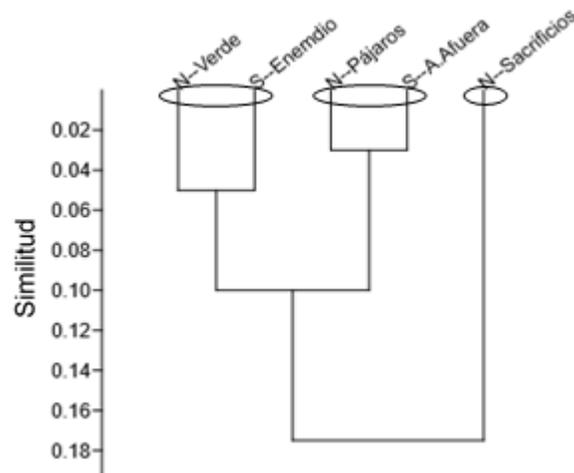


Figura 41. Dendrograma de similitud entre las concentraciones de Pb en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S).

8.6.3 Vanadio

Para V, se observó la similitud entre las concentraciones encontradas en tres grupos. 1) Grupo formados por arrecife Pájaros, 2) grupo formado por arrecife Isla Verde, arrecife de Enmedio y Anegada de Afuera y 3) grupo formado por Isla de Sacrificios (Figura 42).

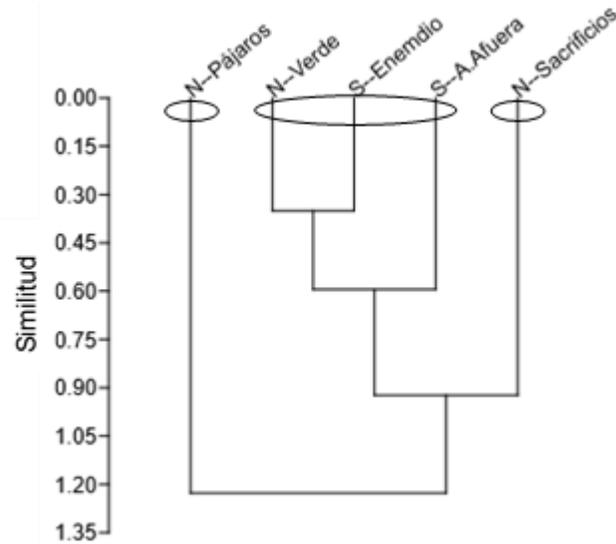


Figura 42. Dendrograma de similitud entre las concentraciones de V en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S).

8.6.4 Zinc

En las concentraciones de Zn en tejido muscular de *P. volitans*, se observaron las similitudes de las concentraciones en tres grupos de arrecifes de colecta. 1) Isla Pájaros, Arrecife de Enmedio y arrecife Anegada de Afuera, 2) Isla de Sacrificios y 3) De forma más aislada se encuentra el arrecife Isla Verde (Figura 43).

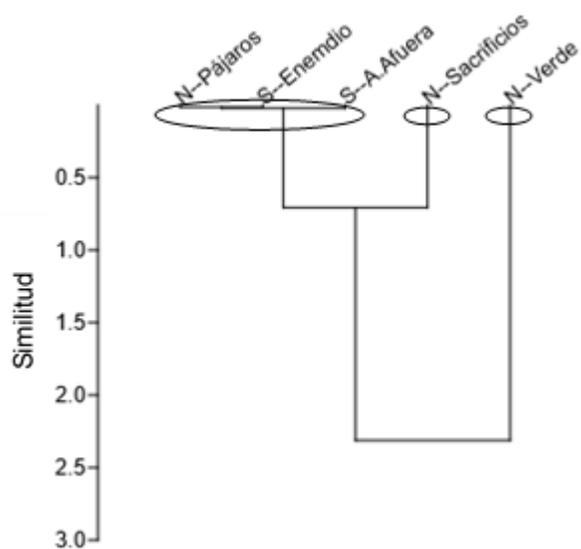


Figura 43. Dendrograma de similitud entre las concentraciones de Zn en tejido muscular de *P. volitans* y los arrecifes de muestreo. Arrecifes del norte (N), arrecifes del sur (S).

9. DISCUSIÓN

El estudio de *P. volitans* es de gran relevancia, ya que se trata de una especie exótica invasora, por lo cual se han realizado diversos trabajos referentes a las actividades de gestión y el control de la especie (Graham y Fanning, 2017), su distribución y abundancia (Vega *et al.*, 2015), su potencial para consumo humano (Carrillo-Flota y Aguilar-Perera, 2017), la interacción con otras especies (Marshak, 2018) y como es el caso de este trabajo, el análisis de las concentraciones de diferentes metales tóxicos en este organismo (Hoo Fung *et al.*, 2013; Hüge *et al.*, 2013; Tremain y O'Donnell, 2014; Ritger *et al.*, 2018; Reyes-Aguilar, 2018).

En el presente trabajo se observó que existen diferencias significativas entre las concentraciones medias de los metales analizados (Cd, Pb, V y Zn) en las muestras colectadas en los diferentes arrecifes del PNSAV. Los metales que resultaron con algunas concentraciones semejantes fueron el Pb y el Zn; estos metales son considerados buenos indicadores de actividades antropogénicas en la zona (Villanueva y Botello, 1982). Por otro lado, los puntos de descarga de aguas residuales reportados en el presente trabajo (34) son el primer aporte del recuento de los desagües que existen en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, los cuales impactan directamente sobre las comunidades arrecifales del PNSAV.

9.1 Cadmio

La concentración media de Cd en tejido muscular de *P. volitans* en este estudio fue de 0.0256 ± 0.0075 mg kg⁻¹, la cual es mayor que la concentración reportada para *P. volitans* en Jamaica (0.00442 ± 0.00089) aunque las dos son concentraciones muy bajas y no sobrepasan los límites máximos establecidos por distintas normas internacionales (Hoo Fung *et al.*, 2013). Ritger *et al.* (2018) también evaluaron las concentraciones de Cd en tejido muscular de pez león en la Isla de Curazao, sin obtener resultados, pues sus valores estuvieron por debajo del límite de detección.

Sin embargo, la concentración media de Cd reportada en muestras de *P. volitans* analizadas por Reyes-Aguilar (2018) en el PNSAV, fue mayor a la reportada en el presente trabajo ($0.1430 \pm 0.1349 \text{ mg kg}^{-1}$), aunque no rebasó los límites máximos permisibles de las normas mexicanas. Las concentraciones de este elemento por arrecife de colecta presentaron diferencias significativas, sin embargo, existieron algunas similitudes en las concentraciones medias de los arrecifes Anegada de Afuera y Arrecife de Enmedio (zona sur) y en otro grupo se traslaparon las concentraciones encontradas en las muestras de los arrecifes Isla Verde e Isla de Sacrificios (zona norte), lo cual coincide con lo encontrado en el dendograma de similitud.

En comparación con otros organismos, Núñez-Nogueira (2005) analizó en Playa Chachalacas y Veracruz las concentraciones de Cd en tejido muscular de *C. limbatus* y *R. terraenovae*, sus resultados ($0.34 \pm 0.13 \text{ mg kg}^{-1}$) también fueron superiores a los obtenidos en el presente trabajo, aunque por tratarse de una especie que ocupa una posición alta en la cadena alimenticia, se puede esperar que las concentraciones de Cd muestren una tendencia a biomagnificarse en los tejidos de consumidores tope como los tiburones (Gomes-Ferreira *et al.*, 2004).

De igual forma, la concentración media reportada por Mendoza-Díaz *et al.* (2013) para muestras de hígado de *C. limbatus* colectado en la Laguna de Tamiahua (0.214 mg kg^{-1}), resultó por encima a la reportada en el presente estudio, esta especie también es un organismo que se encuentra en la cima de la cadena alimenticia y además los análisis se llevaron a cabo en muestras de hígado, lo cual también influye en las concentraciones elevadas, pues el Cd se encuentra en cantidades más significativas en órganos como el hígado y el riñón, los cuales pueden ser dañados por este metal cuando se mantiene por periodos largos, causando efectos similares en los peces y en los humanos, como el daño en el funcionamiento de los órganos antes mencionados (Bradl, 2005; Millward y Turner, 2018).

En las concentraciones de Cd de las muestras de sedimento de la Laguna de Alvarado reportadas por Botello *et al.*, 2018, el rango mayor ($0.0417 \text{ mg kg}^{-1}$) resultó por encima de la media encontrada en el presente trabajo. Sin embargo, en muestras de sedimentos del PNSAV, la media (0.001 mg kg^{-1}) resultó menor a la reportada en el presente estudio (Zamudio *et al.*, 2014). En otros trabajos realizados en el PNSAV, las concentraciones medias de Cd en macroalgas reportadas por Horta-Puga *et al.* (2013) y Horta-Puga *et al.* (2016), resultaron menores a las reportadas en el presente trabajo (0.018 ± 0.015 y $0.0137 \pm 0.0095 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente). No obstante, se sabe que un contaminante con bajas concentraciones en agua, sedimentos o en organismos, puede biomagnificarse alcanzando concentraciones peligrosas en los tejidos de los consumidores (Tsipoura *et al.*, 2011).

9.2 Plomo

La concentración media de Pb en tejido muscular de *P. volitans* en el presente estudio fue de $0.6605 \pm 0.0724 \text{ mg kg}^{-1}$. Esta concentración es mayor a la reportada en otros trabajos en la misma especie. En Jamaica se reportó una concentración media de $0.0203 \pm 0.03256 \text{ mg kg}^{-1}$ (Hoo Fung *et al.*, 2013), en la Isla Curazao la concentración máxima fue de $0.0074 \text{ mg kg}^{-1}$ (Ritger *et al.*, 2018) y en el PNSAV, la concentración media fue de 0.3284 ± 0.2996 (Reyes-Aguilar, 2018).

Mendoza-Díaz *et al.* (2013) analizaron las concentraciones de Pb en hígado de *C. limbatus* capturado en la Laguna de Tamiahua, aunque no fue reportado, ya que las concentraciones estuvieron por debajo del límite de detección. Núñez-Nogueira, 2005 analizaron las concentraciones en músculo de *C. limbatus* y *R. terraenovae* capturado en Playa Chachalacas y Veracruz, donde encontraron una concentración media de $2.91 \pm 2.16 \text{ mg kg}^{-1}$, la cual es mayor a la reportada en el presente estudio, aunque hay que tomar en cuenta que se trata de una especie de mayor tamaño.

En muestras de sedimentos Celis-Hernández *et al.* (2017) analizaron la zona costera del río La Antigua y el río Jamapa con valores encontrados en rangos de 5-16.5 y 3.1-12.4 mg kg⁻¹, respectivamente. Botello *et al.*, 2018 reportaron para sedimentos de la Laguna de Alvarado una concentración de 31.86-40.35 mg kg⁻¹, estos valores también son mayores a los reportados en este trabajo, aunque no hay normas que establezcan el límite de detección de Pb en sedimentos, por lo tanto, no se tiene un control de este metal en sedimento.

La concentración media reportada en el presente estudio rebasó los límites máximos establecidos por la norma mexicana NOM-242-SSA1-2009, lo cual implica un riesgo para la salud a través del consumo de este pez. Además, el plomo en altas concentraciones genera una toxicidad aguda, la cual produce en los peces efectos hematológicos y neurológicos, así como oscurecimiento de la región caudal y curvaturas espinales (Martínez *et al.*, 2004). Por su parte, Horta-Puga (2016) señaló que la concentración de plomo biodisponible en el PNSAV (21.9-85.6 µg g⁻¹) indica que el sistema arrecifal se puede considerar un área moderadamente contaminada por este metal. El Pb podría tener un mecanismo de introducción vía aérea al Parque, dado las actividades de pintura que tienen lugar en los astilleros portuarios (Rosales-Hoz *et al.*, 2007).

No se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones encontradas en los organismos colectados en el norte y el sur del PNSAV. El dendograma de similitud arrojó grupos formados por arrecifes tanto del norte como del sur del PNSAV, lo cual señala la distribución homogénea del Pb en el sistema arrecifal.

9.3 Vanadio

Las concentraciones de V encontradas en el tejido muscular de *P. volitans* en el presente estudio, son las primeras reportadas en esta especie (7.3444 ± 0.6514 mg kg⁻¹), ya que Ritger *et al.* (2018) analizaron este elemento en tejido muscular del mismo organismo capturado en la Isla de Curazao, pero los resultados estuvieron

por debajo del límite de detección, así que no fue reportado. En el PNSAV se tiene referencia de las concentraciones medias de V en sedimentos de la Isla de Sacrificios (Rosales-Hoz *et al.*, 2007) y en diferentes arrecifes del PNSAV (Domínguez-Castanedo *et al.*, 2014), las cuales fueron concentraciones medias mucho más altas (163.30 y 25.73 mg kg⁻¹, respectivamente) que las encontradas en *P. volitans* en este trabajo (7.3444 ± 0.6514). De igual manera los reportes de concentraciones medias de V en sedimento de la zona costera del río La Antigua (60.25-89.6 mg kg⁻¹), la zona costera del río Jamapa (59.05-82.2) y de la Laguna de Alvarado (161.07-190.73 mg kg⁻¹) (Celis-Hernández *et al.*, 2017; Botello *et al.*, 2018) fueron significativamente mayores a los reportados en este estudio. Se considera que los contaminantes metálicos pueden resultar más bajos dado los hábitos dietéticos generalistas y las tasas de crecimiento rápido de *P. volitans*, de hecho, la tasa de crecimiento del pez león es considerablemente más alta que la de otros peces de arrecife generalistas nativos (Côté *et al.*, 2013).

Por otro lado, se sabe que el V es uno de los elementos traza presente en los combustibles de tipo fósil, por esta razón, la combustión de estos materiales es la fuente más importante de este elemento en el ambiente (Rodríguez-Mercado y Altamirano-Lozano, 2006). Lo cual en el PNSAV podría relacionarse con el tráfico portuario y los derrames de hidrocarburos ocurridos en el Parque (Valadez-Rocha y Ortiz-Lozano, 2013; Pérez-España, 2015).

Las concentraciones de V en el tejido muscular de *P. volitans* encontradas en el presente trabajo resultaron ser significativamente diferentes entre los arrecifes de colecta, y el dendograma de similitud arrojó que los arrecifes que comparten coincidencias en sus concentraciones fueron el arrecife Isla Verde, arrecife de Enmedio y Anegada de Afuera los cuales pertenecen a la zona norte y sur del PNSAV. Lo que coincide con los traslapes encontrados por el método de Tukey, que agrupa a los arrecifes de Enmedio e Isla Verde.

9.4 Zinc

La concentración media de Zn en tejido muscular de *P. volitans* encontrada en el presente trabajo ($0.6948 \pm 1.2197 \text{ mg kg}^{-1}$), es menor a las reportadas en otros trabajos realizados en tejido muscular de la misma especie. Hoo Fung *et al.* (2013) reportaron una concentración media de $4.46 \pm 0.605 \text{ mg kg}^{-1}$ en *P. volitans* capturado en Jamaica y Ritger *et al.* (2018) encontraron una concentración media de $2.829 \pm 0.4955 \text{ mg kg}^{-1}$ en tejido muscular de la misma especie, capturada en la Isla de Curazao.

Con respecto a los trabajos realizados en Veracruz, la concentración de Zn en tejido muscular de *C. limbatus* y *R. terraenovae* capturado en Playa Chachalacas y Veracruz ($27.94 \pm 23.35 \text{ mg kg}^{-1}$) fue mucho más alta que la encontrada en este estudio (Núñez-Nogueira, 2005). Las concentraciones de Zn en los sedimentos de la zona costera de los ríos La Antigua y Jamapa, también superaron las encontradas en el presente estudio ($76.6\text{-}88.9$ y $68\text{-}75.2 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) (Celis-Hernández *et al.*, 2017).

En el presente trabajo, las concentraciones de Zn en tejido muscular de *P. volitans* por arrecife de colecta, tampoco indicaron que existieran diferencias significativas. Esto significa que no hay una tendencia a encontrar este elemento en alguna de las zonas del PNSAV (norte y sur), lo que es corroborado por el dendograma de similitud, el cual marcó la existencia de un grupo formado por el arrecife Pájaros, Anegada de Afuera y arrecife de Enmedio, los cuales pertenecen a la zona norte y sur del PNSAV.

Las corrientes de plataforma de la zona oeste del Golfo de México presentan una marcada estacionalidad, siendo de norte a sur entre los meses de septiembre y marzo, revirtiendo su dirección (sur a norte) entre mayo y agosto, con ciclos de transición en los meses de marzo a abril y de agosto a septiembre (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003), Además en el PNSAV se encuentran la corriente de lazo y la

contracorriente mexicana (INEGI, 2005), lo cual podría influir en la distribución de los metales en todo el sistema arrecifal sin diferencias significativas.

9.5 Concentraciones por arrecife

La concentración media más alta tanto de Cd, Pb y V se registraron en muestras colectadas en el arrecife Pájaros, (0.03, 0.72 y 8.02 mg kg⁻¹, respectivamente) lo que puede estar relacionado con la cercanía de este arrecife a la costa, ya que en el PNSAV los metales tienden a tener una distribución en gradientes, con valores más altos cerca a la costa que disminuyen al alejarse, lo cual está relacionado con las descargas de aguas continentales, así como con las actividades portuarias (Domínguez-Castanedo *et al.*, 2014; Reyna-González, 2014). Sin embargo, la concentración media más alta reportada por Reyes-Aguilar (2018), para Cd (0.285±0.1537) al igual que para Pb (0.6183±0.1953) en tejido muscular de *P. volitans* correspondió a peces capturados en el arrecife Santiaguillo, el cual se encuentra en la zona sur del PNSAV y está más influenciado por las descargas del río Papaloapan, el cual también ha sufrido de contaminación por desechos industriales, urbanos, sanitarios, pesqueros y agrarios (Botello *et al.*, 2018).

La concentración media más alta de Zn se registró en el arrecife Isla Verde, el cual se encuentra muy cerca del arrecife Pájaros, en la zona norte del PNSAV. En donde también se le atribuyen efectos contaminantes a las descargas de la planta de tratamiento de Playa Norte que afectan en especial al arrecife Hornos y a los arrecifes cercanos a la costa como el arrecife Pájaros e Isla Verde (Rosales-Hoz *et al.*, 2009; Morlán-Cahue y Opengo- Piña 2005). Además, el aporte de este metal podría estar relacionado al influjo de los ríos, dado que el Zn puede ser atribuido principalmente a influjos domésticos, industriales y aportes terrígenos (Morlán-Cahue y Opengo-Piña, 2005). Por su parte, Salas-Monreal *et al.* (2009) observaron que se generan giros ciclónicos de pequeña escala bajo vientos constantes del sur en la boca del río Jamapa, los cuales posiblemente contribuyen a la resuspensión

de partículas sedimentarias previamente depositadas y por ende al ingreso de metales al PNSAV en esta zona.

9.6 Correlación

En el presente estudio no se encontró una correlación significativa entre los metales analizados en tejido muscular de *P. volitans* (Cd, Pb, V y Zn) y las variables longitud total y peso húmedo. De forma similar, Hüge *et al.* (2013) analizaron la correlación entre el peso húmedo y la longitud estándar con las concentraciones de HgT encontradas en tejido muscular de *P. volitans*, y obtuvieron como resultado que no existe una correlación significativa entre estas dos variables. Sin embargo, Tremain y O'Donnell (2014) analizaron 260 muestras de tejido muscular de pez león colectado a lo largo del Golfo de México de Florida y Costas del Atlántico, donde encontraron que los niveles de HgT incrementaron logarítmicamente con la longitud del pez en todas las regiones analizadas. En tanto, en el trabajo de Ritger *et al.* (2018) analizaron la correlación de la concentración de diferentes metales y la longitud estándar, condición corporal y sitio de muestreo del pez león, y no encontraron relaciones significativas entre estas variables. Por lo tanto, el contenido de metales en estos organismos podría estar basado en la biología y las particularidades para cada sitio (Gutiérrez-Mejía *et al.*, 2009).

10. CONCLUSIONES

Las concentraciones de los metales analizados en tejido muscular de *P. volitans* capturado en el PNSAV siguieron el orden descendiente: V > Zn > Pb > Cd.

Las concentraciones medias de Cd resultaron por debajo del límite máximo permisible por la norma mexicana NOM-242-SSA1-2009

La concentración media de Pb resultó mayor a los límites establecidos en la norma mexicana NOM-242-SSA1-2009, lo que implica un riesgo potencial para los organismos del PNSAV.

No existen normas nacionales o internacionales que regulen el contenido de V o Zn en tejido muscular de peces, sin embargo, las concentraciones de estos dos metales resultaron menores a las reportadas en la zona y a las concentraciones establecidas como ERL (rango de efectos mínimos en sedimentos marinos) y AET (umbrales de efectos aparentes en *Neanthes* sp.) propuestos por la NOAA.

En los organismos capturados en los arrecifes Pájaros e Isla Verde se registraron las concentraciones más altas de Cd, Pb, V y Zinc, probablemente se deba a la cercanía de estos arrecifes a la costa.

No se observó una correlación entre las concentraciones de Cd, Pb, V y Zn encontradas en tejido muscular de *P. volitans* y las variables peso y longitud total de los organismos.

Por las características de *P. volitans* como especie invasora y depredador tope, podría considerarse como una opción para la realización de futuros trabajos de análisis de contaminación en el PNSAV, ya que se pueden realizar trabajos de monitoreo del Parque, al mismo tiempo que se colabora con el control de esta especie al elegirla como medio de estudio.

11. REFERENCIAS

- Acevedo-Lezama, D. 2015. Ecología alimentaria del pez león (*Pterois* spp.) en el Sistema Arrecifal Veracruzano, Suroeste del Golfo de México. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Boca del Río. p. 12-27.
- Adriano, D.C. 2001. Trace Elements in the Terrestrial Environment: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. Second Edition. New York: Springer-Verlag. p. 61.
- Adriano, D.C., Boal, N.S., Vangronsveld, J. y Wensel, W.W. 2005. Heavy metals. pp. 175-182. En: Encyclopedia of Soils in the Environment. Hillel, D. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. 2200 pp.
- Afshan, S., Shafaqat, A., Uzma, S.A., Mujahid F., Saima, A. B., Fakhir, H. y Rehan, A. 2014. Effect of Different Heavy Metal Pollution on Fish. Research Journal of Chemical and Environmental Sciences. 2:74-79.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). 2012. Reseña Toxicológica del Vanadio. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. Atlanta, Georgia.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). 2016. ToxFAQs™ - Cinc (Zinc). Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. Atlanta, Georgia.
- Azcona-Cruz, M.I., Ramírez y Ayala, R. y Vicente-Flores, G. 2015. Efectos tóxicos del plomo. Revista de Especialidades Médico Quirúrgicas. 20: 72-77.
- Beltrán, J., Villasol, A., Botello, A.V y Palacios, F. 2005. Condición actual del ambiente marino-costero de la región del Gran Caribe, p. 1-24. En A.V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.).

- Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 pp.
- Black, A.N., S.R. Weimann, V.E. Imhoff, M.L. Richter y M. Itzkowitz. 2014. A differential prey response to invasive lionfish, *Pterois volitans*: Prey naiveté and risk-sensitive courtship. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 460: 1-7.
- Bikini, A., y Nanda, P. 2016. Vanadium toxicity to fish *Heteropneustes fossilis* (Bloch). *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 4: 316-317.
- Botello, A.V., Villanueva, F.S., Rivera, R.F., Velandia, A.L. y 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*. 75:157-173.
- Buchman, M.F. 2008. NOAA Screening quick reference tables, NOAA OR&R Report 08-1. Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle. p. 2.
- Bradl, H. 2005. Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation. Vol. 6. Elsevier/Academic Press. London. p. 69-71.
- Carrillo-Flota, E.C. y Aguilar-Perera, A. 2017. Stakeholder perceptions of red lionfish (*Pterois volitans*) as a threat to the ecosystem and its potential for human consumption in Quintana Roo, Mexico. *Ocean & Coastal Management*. 136: 113-119.
- Celis-Hernández, O., Rosales-Hoz, L., Cundy, A.B. y 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: 204-213.

CE/UE. 2006. Diario Oficial de la Unión Europea. Reglamento (CE) No 1881/2006 de la Comisión de 19 de diciembre de 2006 por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. 364/5.

Chagaris, D., Binion-Rock, S., Bogdanoff, A., Dahl, K., Granneman, J., Harris, H., Mohan, J., Rudd, M.B, Swenarton, M.K., Ahrens, R., Patterson III, W.F., Morris Jr., J.A. y Allen, M. 2017. An Ecosystem-Based Approach to Evaluating Impacts and Management of Invasive Lionfish, *Fisheries*. 42: 421-431.

Chapman, J.K., Anderson, L.G, Gough, C.L.A. y Harris A.R. 2016. Working up an appetite for lionfish: A market-based approach to manage the invasión of *Pterois volitans* in Belize. *Marine Policy*. 73: 256-262.

CODEX STAN 193-1995. 2017. Norma General para los Contaminantes y las Toxinas Presentes en los Alimentos y Piensos. Codex Alimentarius. Normas Internacionales de los Alimentos. FAO-OMS.

CONAGUA, 2015. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Contreras-Cadena, D.A., Gómez-Pech, C., Rangel-García, M., Ruiz-Hernández, A., Martínez-Bulit, P. y Barba-Behrens, N. 2014. La importancia del vanadio en los seres vivos. *Educación Química*. 25: 245-253.

- Côté, I.M., Green, S.J. y Hixon, M.A. 2013. Predatory fish invaders: Insights from Indo-Pacific lionfish in the western Atlantic and Caribbean. *Biological Conservation*.164: 50-61.
- CSVA. 2006. Proyecto de Programa Hidráulico del Estado de Veracruz. Consejo del Sistema Veracruzano del Agua. Resumen Ejecutivo. Veracruz. 40 pp.
- DOF, 1992. Diario Oficial de la Federación. DECRETO 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 superficie de 52,238-91-50 hectáreas.
- DOF, 2012. Diario Oficial de la Federación. 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.
- Domínguez-Castanedo, N., Granados-Barba, A., Rojas-López, R. y Solís-Weiss, V. 2014. Metales pesados en sedimentos de la plataforma interna en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. p. 563-578. En: Botello, A.V., Rendón von Osten, J., Benítez, J.A y Gold-Bouchot, G. (eds.). Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Unidad Mérida. 1176 pp.
- Dromard R.C., Bouchon-Navaro, Y., Sebastien, C. y Bouchon, C. 2016. The invasive lionfish, *Pterois volitans*, used as a sentinel species to assess the organochlorine pollution by chlordecone in Guadeloupe (Lesser Antilles). *Marine Pollution Bulletin*. 107:102-106.

Echeverría García, A.W. y Gold-Bouchot, G. 2014. Metales pesados en la fauna silvestre. pp. 521-546. En: Botello, A.V., Rendón von Osten, J., Benítez, J.A y Gold-Bouchot, G. (eds.). Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV- Unidad Mérida. 1176 pp.

EPA (United States), 2000. Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories: EPA 823/B-00-007. V.1, third ed. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Escobar, J. 2002. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Serie Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile. 1799 pp.

FAO/OMS, 2000. Informe de la 32ª reunión del Comité Codex sobre Aditivos Alimentarios y Contaminantes de los Alimentos. <http://www.codexalimentarius.net>.

FAO. 2016. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. El petróleo y la pesca. Roma. 93. 224 pp.

FIR, 2004. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. Sitio Ramsar No. 1346 a nivel internacional No. 33 a nivel nacional. 15 pp.

Francisco, V. y De la Cueva, H. 2017. Nuevas perspectivas en la diversidad funcional de ambientes marinos. Latin American Journal of Aquatic Research. 45: 261-275.

Fishbase consultado en febrero de 2018. Disponible en: <http://www.fishbase.se/summary/Pterois-volitans.html>.

- García-Cuéllar, J., Arreguín-Sánchez A.F., Hernández- Vázquez, S. y Iluch-Cota, D.B. 2004. Impacto ecológico de la industria petrolera en la sonda de Campeche, México tras tres décadas de actividad. *Interciencia*. 29: 311-319.
- García-Graciela, B. 2006. El Vanadio, un elemento ambiguo. *Acta Toxicológica Argentina*.14: 32-36.
- Graham, R.E. y Fanning, L.M. 2017. A comparison of eight country plans for the Invasive Indo-Pacific Lionfish in the Wider Caribbean. *Global Ecology and Conservation*. 12: 253-262.
- Gomes-Ferreira, A., Vieira, F.V., Veiga De Carvalho, C.E., Teixeira, L.R.P. y Santana Da Silva, F.M. 2004. Total mercury in the night shark, *Carcharhinus signatus* in the western equatorial Atlantic Ocean. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 47: 1-9.
- Gutiérrez-Mejía, E., Lares, M.L. y Sosa-Nishizaki, O. 2009. Mercury and arsenic in muscle and liver of the golden cownose ray, *Rhinoptera steindachneri*, Evermann and Jenkins, 1891, from the upper Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 83: 230-234.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica* 4: 9 pp.
- Haslett, B.S., Reid, R.J. y Rengel, Z. 2001. Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Annals of Botany*. 87: 379-386.
- Hoo Fung, L.A., Antoine, J.M.R., Grant, C.N. y Buddo, D.St.A. 2013. Evaluation of dietary exposure to minerals, trace elements and heavy metals from the muscle tissue of the lionfish *Pterois volitans* (Linnaeus 1758). *Food and Chemical Toxicology*. 60: 205-212.

- Horta-Puga, G. y Barba-Santos, G. 1999. Veracruz Reef System, Gulf of México. AGRRA Field Reports. Consultado en diciembre de 2018. Disponible en: <http://www.coral.noaa.gov/agra/reports/Veracruz.html>.
- Horta-Puga, G. 2003. Condition of selected reef sites in the Veracruz Reef System (stony corals and algae). Atoll Research Bulletin. 496: 360-369.
- Horta-Puga, G., Cházaro-Olvera, S., Winfield, I., Ávila-Romero, M. y Moreno-Ramírez, M. 2013. Cadmium, copper and lead in macroalgae from the Veracruz Reef System, Gulf of Mexico: Spatial distribution and rainy season variability. Marine Pollution Bulletin. 68: 127-133.
- Horta-Puga, G., Cházaro-Olvera, S., Winfield, I., Lozano-Aburto, M.A. y Arenas-Fuentes, V. 2016. Metales pesados en macroalgas del Sistema Arrecifal Veracruzano, sur del Golfo de México. Revista Bio Ciencias. 3: 326-339.
- Horta-Puga, G. 2016. Geochemical partitioning of lead in biogenic carbonate sediments in a coral reef depositional environment. Marine Pollution Bulletin. 116: 71-79.
- Huge D.H., Schofield, P.J., Jacoby, C.A. y Frazer, T.K. 2013. Total mercury concentrations in lionfish (*Pterois volitans/miles*) from the Florida Keys National Marine Sanctuary, USA Marine Pollution Bulletin. 78: 51-5.
- INEGI. 2005. Cartografía del Territorio Insular de México. Continuo Nacional, primera edición, escala 1: 250,000. Instituto Nacional de Geografía y Estadística, Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI, 2014. Agua Potable y Saneamiento. Puntos de descarga de aguas residuales municipales sin tratamiento según tipo de cuerpo receptor por entidad federativa, 2014. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015. Módulo 5 Agua Potable y Saneamiento.

- INEGI, 2016. Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 1167 pp.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 1222 pp.
- Jiménez, B., Rodríguez-Estrella, R., Merino, R., Gómez, G., Rivera, L., González, M.A, Abad, E. y Rivera, J. 2005. Results and evaluation of the first study of organochlorine contaminants (pcdds, pcdfs, pcbs and ddts), heavy metals and metalloids in birds from Baja California, Mexico. *Environmental Pollution*. 133: 139-146.
- Jiménez-Badillo, M.L., Cruz Rodas, S., Lozano Aburto, M.A. y Rodríguez Quiroz, G. 2014. Problemática ambiental y socioeconómica del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 60: 58-64.
- Magurran, A.E. 2004. *Measuring biological diversity*. Blackwell Science, Ltd. 132 pp.
- Marshak, A.R., Heck, K.L. Jr. y Jud, Z.R. 2018. Ecological interactions between Gulf of Mexico snappers (Teleostei: Lutjanidae) and invasive red lionfish (*Pterois volitans*). *PLoS ONE*. 13.
- Martinez, C.B.R., Nagae, M.Y., Zaia, C.T.B.V y Zaia, D.A.M. 2004. Acute morphological and physiological effects of lead in the neotropical fish *Prochilodus lineatus*. *Brazilian Journal of Biology*. 64: 797-807.
- Mendoza-Cantú, A., Cram-Heydrich, S., Sommer-Cervantes, I. y Oropeza-Orozco, O. 2010. Atlas regional de impactos derivados de las actividades petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 122 pp.

- Mendoza-Díaz, F., Serrano, A., Cuervo-López, L., López-Jiménez, A., Galindo, J.A. y Basáñez-Muñoz, A. 2013. Concentración de Hg, Pb, Cd, Cr y As en hígado de *Carcharhinus limbatus* (Carcharhiniformes: Carcharhinidae) capturado en Veracruz, México. *Revista de Biología Tropical*. 61: 821-828.
- Millward, G.E. y Turner, A. 2018. Metal Pollution, p. 77-85. En DellaSala, D.A. y Goldstein, M.I. (Eds.). *Encyclopedia of the Anthropocene*. Vol. 1. Elsevier. Oxford, UK. 491 pp.
- Minganti, V., Drava, G., De Pellegrini, R. y Siccardi, C. 2010. Trace elements in farmed and wild gilthead seabream, *Sparus aurata*. *Marine Pollution Bulletin*. 60: 2022-2025.
- Minitab 16.1.0 Statistical Software. 2010. Computer software. State College, PA: Minitab, Inc. Disponible en: <https://www.minitab.com>.
- Morlán-Cahue, Y., y Opengo-Piña, H. 2005. Determinación de metales (Fe, Mn, Pb, y Zn) en macroalgas clorofitas del Sistema Arrecifal Veracruzano, México, p. 373-388. En: Botello, A.V., Rendón-von Osten, J., Gold-Bouchot, G. y Agraz-Hernández C. (Eds.). *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma De México, Instituto Nacional de Ecología. 696 pp.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994. Diario Oficial de la Federación.1995. NOM-117-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009. Diario Oficial de la Federación. 2011. NORMA Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009, Productos y

servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba.

Núñez-Nogueira, G., 2005. Concentration of essential and non-essential metals in two shark species commonly caught in mexican (Gulf of Mexico) coastline, p. 451-474. En: Botello, A.V., Rendón-von Osten, J., Gold-Bouchot, G. y Agraz-Hernández, C. (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 pp.

Ortiz-Lozano, L., Martínez-Esponda, F.X., Escorcía-Quintana, M., García-Maning, G., Ramos-Pedruza Ceballos, X. y Colmenares-Campos, C. 2018. El Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México. Retos y Oportunidades para su Protección. Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA). p. 26-29.

Páez-Osuna, F. 2005. Fuentes de metales en la zona costera marina. p. 329-342. En: A.V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 pp.

Páez-Osuna, F., 2014. Metales y metaloides: origen, movilidad y ciclos biogeoquímicos. p. 505-520. En: A.V. Botello, J. Rendón von Osten, J. A. Benítez y G. Gold-Bouchot (eds.). Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Unidad Mérida. 1176 pp.

Peakall, D., y Burger, J. 2003. Methodologies for assessing exposure to metals: speciation, bioavailability of metals, and ecological host factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 56: 110-121.

Pérez-España, H., Bello-Pineda, J., Ávila-Santiago, P., Berumen-Solorzano, P., Melo-Merino, S., Flores-Arévalo, R.R., Santander-Monsalvo, J., Gómez-Villada, R.S., Román-Vives, M.A., Ruiz-Lozano, C., Alvarado-Tejeda, M., Roldán-Ubando, A.A. y Cabrera-Valenzuela, A. 2015. Monitoreo del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano: Segunda Etapa. Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto GM004, México D.F. 97 pp.

Reglamento UE, 2014. Diario Oficial de la Unión Europea. REGLAMENTO (UE) No 488/2014 DE LA COMISIÓN de 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. Bruselas, Bélgica. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2014/138/L00075-00079.pdf>.

Reglamento UE, 2015. Diario Oficial de la Unión Europea. REGLAMENTO (UE) 2015/1005 DE LA COMISIÓN de 25 de junio de 2015 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de plomo en determinados productos alimenticios. Bruselas, Bélgica. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2015/161/L00009-00013.pdf>.

Reyes-Aguilar, A.R. 2018. Concentración de metales pesados y metaloides en *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758) en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Boca del Río. 105 pp.

Reyna-González, P.C. 2014. Modelo de soporte para la toma de decisiones en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de doctorado. Instituto

de Ciencias Marinas y Pesquerías Doctorado en Ecología y Pesquerías. Universidad Veracruzana. 152 pp.

Ritger, A.L., Curtis, A.N. y Chen, C.Y. 2018. Bioaccumulation of mercury and other metal contaminants in invasive lionfish (*Pterois volitans/miles*) from Curazao. *Marine Pollution Bulletin*. 131: 38-44.

Rodríguez-Mercado, J.J. y Altamirano-Lozano, M.A. 2006. Vanadio: Contaminación, metabolismo y genotoxicidad. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 22: 173-189.

Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A. y Celis-Hernández, O. 2007. Environmental Implications of Heavy Metals in Surface Sediments near Isla de Sacrificios, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 78: 353-357.

Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanvicente-Añorve, L., Alatorre-Mendieta, M.A. y Rivera-Ramirez, F. 2009. Distribution of Dissolved Trace Metals Around the Sacrificos Coral Reef Island, in the Southwestern Gulf of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 83: 713-719.

Salas-Monreal, D., Salas de León, D.A., Monreal-Gómez, M.A. y Riverón-Enzastiga, M.L. 2009. Current rectification in a tropical coral reef system. *Coral Reefs*. 28: 871-879.

Santander-Monsalvo, J., López-Huerta, I., Aguilar-Perera, A. y Tuz-Sulub, A. 2012. First record of the red lionfish (*Pterois volitans* [Linnaeus, 1758]) off the coast of Veracruz, Mexico. *BiolInvasions Records*. 1: 121-124.

Susunaga-Miranda, M.A y Estévez-Garrido, B.M. 2018. Metales pesados en los lixiviados provenientes del basurero no controlado de la Ciudad de Veracruz. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 5: 2334-2501.

- Sobрино-Figueroa, A., Botello, A. y Villanueva-Fragoso, S. 2005. Efectos de compuestos genotóxicos de tres sistemas costeros de Veracruz, p. 141-156. En: Botello, A.V., Rendón-von Osten, J., Gold-Bouchot, G. y Agraz-Hernández, C. (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 pp.
- Sparks, D.L. 2005. Toxic metals in the environment: The role of surfaces. *Elements*. 1: 193-197.
- Tami-Pimiento, L.M. 2013. Realización del inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz, México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de México. 153 pp.
- Tremain D.M. y O'Donnell, K.E. 2014. Total mercury levels in invasive lionfish, *Pterois volitans* and *Pterois miles* (Scorpaenidae), from Florida Waters. *Bulletin Marine Science*. 90: 565-578.
- Tsipoura, N., Burger, J., Newhouse, M., Jeitner, C., Gochfeld, M y Mizrahi, D. 2011. Lead, mercury, cadmium, chromium, and arsenic levels in eggs, feathers, and tissues of Canada geese of the New Jersey Meadowlands. *Environmental Research*. 111: 775-84.
- Tunnell Jr.J., Chávez, E. y Withers, K. 2007. Coral reefs of the southern Gulf of Mexico. 1st ed. Texas A&M University Press, College Station. Texas, USA. 360pp.
- Turner, R.E. y Rabalais, N.N. 2019. The Gulf of Mexico. *World Seas: An Environmental Evaluation (Second edition)*. Europe, the Americas and West Africa. 1: 445-464.

- Valadez-Rocha, V. y Ortiz-Lozano, L. 2013. Spatial and Temporal Effects of Port Facilities Expansion on the Surface Area of Shallow Coral Reefs. *Environmental Management*. 52: 250-260.
- Vargas A., Blanco Y. y Salazar-Lugo, R. 2012. Efecto del cobre y del cadmio sobre la respuesta inmune innata del pez *Colossoma macropomum*. *Revista de Toxicología*. 29: 90-94.
- Vázquez-Botello, A., Villanueva-Fragoso, S. y Rosales-Hoz, L. 2004. Distribución y contaminación de metales en el Golfo de México. En: Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, Vol. 2.
- Vázquez, F., Florville-Alejandre, T.R., Herrera, M. y Díaz de León, L.M. 2008. Metales pesados en tejido muscular del bagre *Ariopsis felis* en el sur del golfo de México (2001-2004). *Latin American Journal of Aquatic Research*. 36: 223-233.
- Vega, A., Reynaldo, E., Fernández, A., Cruz, J., Ocaña, F. y Córdova, E. 2015. Abundancia y distribución del pez león *Pterois volitans* (Teleostei: Scorpaenidae) en el litoral turístico de Holguín, Cuba. *Solenodon*. 12: 72-83.
- Villanueva, S. y Botello, A. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: Una Revisión. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 8: 47-61.
- WHO, 2010. Preventing disease through healthy environments exposure to cadmium: A major public health concern. World Health Organization. Disponible en: <https://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf?ua=1>.
- WHO, 2018. Intoxicación por plomo y salud. World Health Organization. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>.

Zamudio-Alemán, R.E., Castañeda-Chávez, M.R., Lango-Reynoso, F., Galaviz-Villa, I., Amaro-Espejo, I.A. y Romero-González, L. 2014. Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 1: 160-168.

Zavala-Hidalgo, J., Morey, S.L. y O'Brien, J.J. 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research*. 108: 1-19.